

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения  
(наименование института полностью)

Кафедра «Оборудование и технологии машиностроительного производства»  
(наименование)

15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных  
производств»  
(код и наименование направления подготовки)

Технология автоматизированного машиностроения  
(направленность (профиль))

## **ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему Совершенствование термосиловой обработки маложестких валов

Студент

Дидык Е.О.

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный  
руководитель

к.т.н., доцент, Воронов Д.Ю.

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2020

## Оглавление

Введение.....	3
Глава 1 Исследование технологических процессов снижения напряжений в материале малоожестких валов.....	5
1.1 Анализ технологий изготовления горячекатаных стальных прутков.....	5
1.2 Термическая обработка стальных деталей.....	26
1.3 Вибрационные методы обработки.....	35
Выводы по главе 1.....	40
Глава 2. Исследование и усовершенствование процесса термосиловой обработки.....	41
2.1 Анализ сущности процессов, реализующих метод термосиловой обработки.....	41
2.2 Приблизительно-возможный вывод математической модели ТСО со скручивающим моментом.....	45
2.3 Технология и методика проведения испытаний ТСО.....	53
2.4 Разработка системы автоматического управления термосиловой обработки со скручивающим моментом и с комплексными колебаниями.....	65
2.5 О мерах безопасности при ТСО.....	79
Выводы по главе 2.....	82
Заключение.....	83
Список используемых источников.....	84
Приложение А Сертификаты и справки.....	91

## Введение

Маложесткие валы находят широкое применение в машиностроении, нефтяной и химической промышленности, в судостроении. Процесс производства таких валов является очень сложной и наукоемкой задачей, что делает их себестоимость изготовления очень высокой.

Так как маложесткие валы являются частью ответственных и дорогостоящих машин и механизмов, то обеспечение качества их изготовления становится важнейшей и первостепенной задачей. Причинами, существенно снижающими качество маложестких валов, являются значительные по величине и хаотичные по направлению напряжения в материале валов, которые приводят к короблению и как следствие к выходу из строя валов и механизмов, в которые они входят.

Постоянное повышение требований к качеству, надёжности и долговечности технических изделий становится ключевой задачей современного машиностроения. Вследствие создания всё более прочных и технологичных конструкций узлов и агрегатов, в современном машиностроении происходит естественное снижение металлоёмкости продукции и, как результат, формирование значительного класса маложестких деталей: валы, оси, ходовые винты, шпиндели станков, гребные винты и т.д. Такие детали зачастую лимитируют межремонтные, межсервисные и ресурсные интервалы изделий. Производство подобных деталей в нашей стране постоянно увеличивается, что обусловлено все возрастающей потребностью в прецизионных машинах, ростом скоростей вращения технологического оборудования в нефтяной, газовой, автомобильной, судостроительной и авиационной промышленности.

Поэтому, задачи разработки технологий изготовления деталей данного класса, являются актуальными задачами современного машиностроения, а поиск резервов повышения точности обработки и ее последующее сохранение – актуальной научной проблемой технологии машиностроения.

Основной проблемой при изготовлении маложестких деталей типа «Вал», является релаксация внутренних остаточных напряжений. Релаксация этих напряжений уже после изготовления детали приводит к непредсказуемому короблению. Таким образом, достигнув точности в ходе техпроцесса, мы можем потерять ее уже в ходе эксплуатации. Причем указанные трудности изготовления маложестких деталей возрастают с увеличением отношения их длины к диаметру, так как в данном случае наблюдается снижение жесткости изделий, а процессы релаксации напряжений способны оказывать все более значительное влияние на стабильность геометрической формы маложестких валов.

Для решения данной проблемы можно использовать термосиловую обработку, сочетающую термообработку с осевой пластической деформацией, способную снизить общий уровень и придать осевую направленность внутренних напряжений, исключая, таким образом коробление маложестких валов. Поэтому, тема магистерской диссертации является актуальной.

Тогда, цель магистерской диссертации может быть сформулирована следующим образом: повышение качества изготовления маложестких валов путем совершенствования процесса термосиловой обработки.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ перспективных технологий получения заготовок для маложестких валов и их термообработки;
- рассмотреть идеи способов получения заготовок, путем их сравнения;
- подробно рассмотреть наличие дефектов при разных способах изготовления;
- провести анализ сущности процессов, реализующих метод термосиловой обработки;
- разработать математическую модель термосиловой обработки;
- разработать систему автоматического управления термосиловой обработки.

- рассмотреть меры безопасности проведения испытаний ТСО.

## **Глава 1 Исследование технологических процессов снижения напряжений в материале маложестких валов**

### **1.1 Анализ технологий изготовления горячекатаных стальных прутков**

При изготовлении маложестких валов важнейшей операцией, влияющей на качество маложесткого вала, является термосиловая обработка (ТСО). Данная операция определяет уровень и характер распределения остаточных напряжений в материале маложесткого вала. Данный вопрос подробно рассмотрен и изложен в работах [1-20], авторами О.И. Драчевым, Д.Ю. Вороновым, Д.А. Расторгуевым. В работе [21] было доказано, что точность термосиловой обработки зависит от точности заготовки, прутка, из которого изготовлен вал.

Способам повышения качества прутка посвящены работы [22-25] указанных выше авторов. Для более подробного и альтернативного рассмотрения данного вопроса, которое, безусловно, дополнит информацию по данному вопросу, в данной главе будут проводиться литературные исследования.

Целью данных литературных исследований заключается в исследовании мирового уровня по вопросам изготовления заготовок для маложестких валов, с целью его анализа на возможность применения в качестве дополнения к технологии термосиловой обработки.

Существует множество способов изготовления прутков для маложестких валов, в данном подразделе будет рассмотрены методы получения горячекатаных прутков, с точки зрения повышения их качества.

Основой для исследования данного вопроса будет информация, изложенная в источниках [26-33], авторов Yaping (CN), GONG Yu (CN), Yezhong (CN), Hongxu (CN), патент РФ №2591788, патентообладатель BAOSHAN IRON & STEEL CO., LTD. (CN).

Данная идея относится к способу изготовления горячекатаной кремнистой стали, и более конкретно, к способу повышения качества кромок (снижения количества дефектов на кромках) кремнистой стали при изготовлении горячекатаной кремнистой стали.

В процессе изготовления горячекатаной кремнистой стали в ходе прокатки легко возникают различные дефекты на кромках, где концентрируются напряжения и изменение температуры является очень резким, что таким образом влияет на качество кремнистой стали в целом, снижает выход продукта и дополнительно снижает производительность. Более конкретно, дефект отслоения на кромках (edge seam defect) является одним из распространенных дефектов кромки горячекатаной кремнистой стали. Исследования показывают, что края и угловые участки заготовки всегда находятся при низкой температуре и в состоянии высокого напряжения и деформации в ходе прокатки. В ходе горизонтальной прокатки направленная внутрь сила трения вала на прокатной детали подвергает металл по углам воздействию сильного напряжения растяжения, и он в итоге течет к верхней поверхности прокатной детали; по мере прохождения прокатки после горизонтальной прокатки заново образованные границы раздела смещают исходные границы раздела гораздо дальше от кромок заготовки, и состояние сильного напряжения растяжения может вызывать возникновение дефекта «черной линии».

В настоящее время известны различные способы устранения указанных дефектов кромки. Например, в патентном документе [26] описана форма для непрерывного литья, в которой боковая стенка для короткой заготовки выполнена в форме круглой дуги, и четыре угла выполнены в виде скругленных углов. Чтобы обеспечить боковую поверхность отлитой заготовки с закругленными на круглую дугу углами, предотвратить загибание кромок или углов в процессе горячей прокатки заготовки, избежать быстрого охлаждения кромок, и таким образом устранить дефекты продольной черной линии и отслаивания. В патентном документе [27] описан

способ, с помощью которого можно достичь высокого качества поверхности кремнистой стали посредством регулирования температурного градиента между поверхностью плоской заготовки и позицией на определенной глубине кремнистой стали в ходе грубой прокатки и чистовой прокатки. В документе [28] описан профилированный валок и блок калибровочного пресса для заготовки (КППЗ) выпуклого типа для формирования вогнутой боковой поверхности заготовки. Чтобы избежать возникновения дефектов, и это решение имеет определенные недостатки: на профилированном валке легко могут появляться значительные царапины, и блок КППЗ выпуклого типа может привести к нестабильной вытяжке и, таким образом, к нестабильной прокатке. В документах [29] и [30] описан основной закон течения металла на краях и в углах заготовки в ходе процесса вертикально-горизонтальной прокатки в течение грубой прокатки, с использованием подхода расчета с помощью численного моделирования. Сделаны расчеты в отношении правила влияния различных форм вертикальных валков на течение металла по краям и в углах прокатной детали. Однако результаты исследований не прошли проверочные испытания серийной продукции, а также относятся к улучшенному способу в отношении вытяжки посредством использования вертикального валка при грубой прокатке. В документе [31] предложена другая, модифицированная конструкция вертикального валка прокатного стана для грубой прокатки, чтобы устранить механические повреждения в процессе производства. Кроме того, в производственной практике используемый блок КППЗ также в некоторых случаях был модифицирован для получения вогнутой боковой поверхности заготовки. Однако это ограничено нестабильным контактом между блоком КППЗ выпуклого типа и плоской заготовкой, что приводит к асимметричному потоку металла на две стороны и затрудняет регулирование формы заготовки при последующей грубой прокатке.

Однако все доступные в настоящее время документы уровня техники касаются модельных расчетов и фактического улучшения влияния формы



вертикального валка и прокатной детали при грубой прокатке на расстояние между дефектом и кромками (расстояние до кромки). В настоящее время отсутствуют сведения об устранении и уменьшении количества дефектов посредством изменения температуры прокатной детали, в частности посредством изменения температуры по поперечному сечению прокатной детали.

В свете описанных выше технических проблем авторы идеи провели множество испытаний, из которых было обнаружено, что существующий уровень количества дефектов кромки кремнистой стали можно значительно понизить путем изменения операции нагревания в процессе изготовления горячекатаной кремнистой стали и что такой уровень количества дефектов можно дополнительно снизить путем изменения операции грубой прокатки.

Более конкретно, целью данной идеи является обеспечение способа изготовления горячекатаной кремнистой стали, с помощью которого можно снизить количество дефектов кромки кремнистой стали посредством изменения операции нагревания и операции грубой прокатки, а также можно получить горячекатаную кремнистую сталь с поверхностью высокого качества.

Более конкретно суть данной идеи описана ниже.

1. Способ изготовления горячекатаной кремнистой стали, включающий операцию нагревания, операцию грубой прокатки и операцию чистовой прокатки заготовки из кремнистой стали, где указанную операцию нагревания проводят в нагревательной печи, включающей секцию предварительного нагревания, секцию нагревания и секцию выдержки, где секция предварительного нагревания удовлетворяет следующей формуле (1):

$$V_{\text{Тр}} > \frac{220 \text{ мин}}{t} \cdot \frac{100^{\circ}\text{C}}{T_c + 200^{\circ}\text{C}} \cdot 25^{\circ}\text{C/мин} \quad (1)$$

где  $V_{\text{Тр}}$  - скорость роста температуры в секции предварительного нагревания,  $^{\circ}\text{C/мин}$ ;

$t$  - общее время нагревания плоской заготовки в нагревательной печи, и  
 $t=180-240$ мин,

$T_C$  - начальная температура плоской заготовки при поступлении в печь, °C; секция выдержки удовлетворяет следующей формуле (2) или (3):

$$-10^{\circ}\text{C} \leq T_S \leq 30^{\circ}\text{C} \quad (2)$$

, когда содержание кремния в кремнистой стали составляет 1,5 масс. % или выше.

$$10^{\circ}\text{C} \leq T_S \leq 80^{\circ}\text{C} \quad (3)$$

, когда содержание кремния в кремнистой стали составляет менее 1,5 масс. %,

где  $T_S$  - подъем температуры в секции выдержки, т.е. разность между температурой плоской заготовки, которая полностью вынута из печи, и ее температурой в конце секции нагревания, °C; и подъем температуры в секции нагревания удовлетворяет следующей формуле:

подъем температуры в секции нагревания равно (температура плоской заготовки, которая полностью вынута из печи, - подъем температуры в секции выдержки) – температура в конце секции предварительного нагревания (3).

Где указанная секция предварительного нагревания представляет собой секцию от точки поступления, в которой заготовка поступает в печь, до точки, расположенной на расстоянии 1/6-1/3 длины печи от указанной точки поступления. Указанная секция выдержки представляет собой секцию от точки выхода, в которой плоскую заготовку вынимают из печи, до точки, расположенной на расстоянии 1/6-1/3 длины печи от указанной точки выхода, и указанная секция нагревания представляет собой секцию, которая находится между секцией предварительного нагревания и секцией выдержки.

2. Способ изготовления горячекатаной кремнистой стали по п. 1, в котором в указанной операции грубой прокатки используют от 1 до 6 проходов указанной вытяжки посредством вертикальной прокатки.

3. Способ изготовления горячекатаной кремнистой стали по п. 2, в котором вытяжка для каждой боковой вытяжки посредством вертикальной прокатки составляет 10-40 см.

4. Способ изготовления горячекатаной кремнистой стали по п. 2, в котором при грубой прокатке используют от 3 до 8 проходов горизонтальной вытяжки при суммарном коэффициенте вытяжки 70-90%.

5. Способ изготовления горячекатаной кремнистой стали по п. 2, в котором период времени от момента сразу после выемки из печи плоской заготовки до момента завершения последнего прохода грубой прокатки не превышает 360 секунд.

6. Способ изготовления горячекатаной кремнистой стали по п. 2, в котором в операции грубой прокатки используют калибровочный пресс для плоской заготовки, при этом боковая вытяжка составляет от 10 до 180 см.

Технический эффект настоящего изобретения: способ изготовления горячекатаной кремнистой стали можно применять для снижения частоты возникновения дефектов кромки кремнистой стали в процессе изготовления и, таким образом, для получения горячекатаной кремнистой стали с поверхностью высокого качества.

Краткое описание чертежей

На рисунке 1 проиллюстрирован принцип течения металла на краях и в углах заготовки при грубой прокатке.

На рисунке 2 показано распределение температуры в сечении для отлитой заготовки, полученное при операции нагревания по настоящему изобретению.

На рисунке 3 показана промежуточная заготовка с вогнутой боковой поверхностью, полученной после грубой прокатки посредством способа нагревания по настоящему изобретению.

На рисунке 4 и Рисунке 5 показаны фотографии дефектов отслоения на кромках горячекатаной кремнистой стали. На рисунке 4 представляет собой фотографию при выявлении дефектов в режиме реального времени, а рисунке 5 представляет собой фактическую фотографию.

На рисунке 6 показана фотография кромок кремнистой стали, изготовленной посредством способа нагревания по настоящему изобретению.

На рисунке 7 показана схема процесса изготовления горячекатаной кремнистой стали.

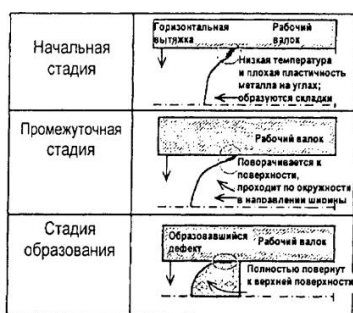


Рисунок 1 - Принцип течения металла при грубой прокатке



Рисунок 2 - Распределение температуры в сечении



Рисунок 3 - Промежуточная заготовка

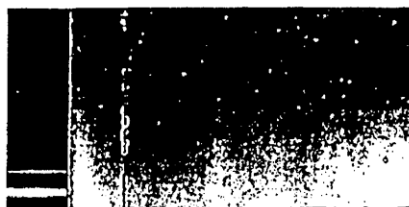


Рисунок 4 - Выявление дефектов в режиме реального времени



Рисунок 5 - Выявление дефектов фактическая фотография



Рисунок 6 - Фотография кромок кремнистой стали

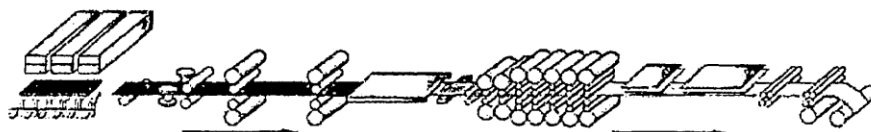


Рисунок 7 - Схема процесса изготовления горячекатаной стали

Способ изготовления горячекатаной кремнистой стали в основном включает операцию нагревания, операцию грубой прокатки и операцию чистовой прокатки заготовки из кремнистой стали.

Авторы настоящей идеи провели измерения температуры, наблюдения и модельные расчеты исходя из практического производства, на основании чего было сделано заключение. Что касается горячекатаной кремнистой стали, дефекты кромок возникают главным образом из-за того, что при грубой прокатке посредством горизонтальной прокатки и вертикальной прокатки верхние и нижние кромки на боковой поверхности плоской заготовки поворачиваются, соответственно, к верхней и нижней поверхностям как показано на рисунке 1. Для различных типов стали существует четыре возможных механизма образования дефектов после того, как кромки поворачиваются к поверхности.

#### Случай (1)

Для типов стали, имеющих низкую теплопроводность и плохую пластичность: в наиболее значительной степени под воздействием воздушного охлаждения кромки заготовки имеют минимальную температуру, и на них образуются дефекты после прокатки и поворота к поверхности кремнистой стали. Из-за низкой температуры кромок, они не соответствуют окружающим их структурам по сопротивлению деформации, что приводит к образованию трещин при вытягивании в ходе прокатки, и дефекты образуются вдоль направления прокатки при последующей прокатке из-за невозможности сварки.

#### Случай (2)

Для типов стали, имеющих относительно высокую температуру фазового перехода  $\gamma - \alpha$ : металл на кромках плоской заготовки находится в двухфазной зоне при грубой прокатке. Учитывая, что напряжение деформации феррита на 1/4 ниже, чем эта величина для аустенитной фазы, и что деформация концентрируется в ферритной фазе, локальная деформация может легко увеличиться в последующем процессе прокатки и привести к полному разрушению, в результате чего образуются дефекты в ферритной фазе.

#### Случай (3)

Для типов стали, чувствительных к перегреву: дефекты, возникающие вследствие перегрева на кромках и боковой поверхности заготовки, остаются на кромках поверхности, что приводит к дефекту отслоения на кромках.

#### Случай (4)

Для типов стали, у которых трудно удалить железную окалину: оксидный слой на кромках заготовки трудно удалить, и он остается на кромках поверхности, в результате чего возникает дефект отслоения на кромках.

Повышение качества кромок горячекатаной кремнистой стали охватывает только операцию нагревания и операцию грубой прокатки, а операция чистовой прокатки не ограничена особым образом, и может быть принята операция чистовой прокатки существующего способа изготовления горячекатаной кремнистой стали.

Ниже представлено подробное описание различных операций, которые задействованы в настоящем изобретении.

#### 1. Операция нагревания.

Операцию нагревания осуществляют в нагревательной печи. Нагревательная печь не ограничена особым образом; можно использовать нагревательную печь с шагающим подом, которую обычно применяют в способе изготовления горячекатаной кремнистой стали; форсунка может представлять собой традиционную форсунку или форсунку с регенерацией тепла.

Нагревательная печь для горячекатаной кремнистой стали обычно разделена на секцию предварительного нагревания, секцию нагревания и секцию выдержки. Однако для некоторых нагревательных печей горячей прокатки нового типа такое строгое разделение не принято (например, для печи с импульсным нагреванием), и указанные различные секции по настоящему изобретению определяют, исходя из следующих принципов:

- указанная секция предварительного нагревания представляет собой секцию от точки поступления, в которой плоская заготовка поступает в печь,

до точки, расположенной на расстоянии  $1/6-1/3$  длины печи от указанной точки поступления;

- указанная секция выдержки представляет собой секцию от точки выхода, в которой плоскую заготовку вынимают из печи, до точки, расположенной на расстоянии  $1/6-1/3$  длины печи от указанной точки выхода, и указанная секция нагрева представляет собой секцию, которая находится между секцией предварительного нагрева и секцией выдержки.

Нагревательные характеристики существующей системы нагрева заключаются в том, что секция предварительного нагрева имеет относительно низкую температуру, тогда как секция нагрева имеет относительно высокую температуру. Температура секции выдержки равна температуре выпуска металла, так что теплота, поглощенная заготовкой в нагревательной секции, непрерывно передается во внутреннюю часть, чтобы получить однородное распределение температуры по поперечному сечению заготовки. Однако особый тип кремнистой стали, изготавливаемой с использованием такой системы нагрева, имеет очень высокую частоту возникновения дефекта отслоения на кромках, и эта частота в некоторых случаях превышает 80%, и тогда требуется обрезка кромок для устранения таких дефектов.

Операция нагрева должна удовлетворять следующим требованиям:

1) Оптимизация температуры секции выдержки.

Целью является достижение распределения температуры по поперечному сечению заготовки, как показано на Рисунке 2, т.е. достижение относительно высокой температуры поверхности заготовки, в частности, достижение относительно высокой температуры кромок заготовки; при этом преследуют три специальные цели:

- Устранение дефектов, возникающих в описанном выше случае (1): относительно высокая температура кромок заготовки улучшает ее формовку при грубой прокатке, снижает различие между повернутыми кромками и



окружающими их структурами и снижает количество дефектов или позволяет избежать возникновения дефектов.

- Устранение дефектов, возникающих в описанном выше случае (2): при условии, что кромки заготовки в процессе нагревания достигли относительно высокой температуры, которая выше температуры фазового перехода в процессе грубой прокатки (или фазовый переход происходит до последнего прохода грубой прокатки), устраняют дефекты, возникающие из-за фазового перехода.

- Уменьшение расстояния между дефектами и кромками из-за высокого поверхностного горизонтального вытягивания в ходе грубой прокатки: верхняя и нижняя поверхности имеют относительно низкое сопротивление деформации из-за высокой температуры и, следовательно, относительно высокое вытягивание происходит в ходе прокатки и снижается расстояние от повернутых кромок до поверхности.

Результаты были проверены при фактическом производстве, и на рисунке 3 показана промежуточная заготовка с вогнутой боковой поверхностью, полученная после грубой прокатки при регулировании процесса нагревания.

## 2) Повышение температуры секции предварительного нагревания.

В настоящем изобретении необходимо повышать температуру секции предварительного нагревания, поскольку температура снижается в последующей секции нагревания; таким образом, чтобы поддерживать одинаковый темп производства, без увеличения времени выдержки заготовки в печи, температура нагревания в других секциях должна быть увеличена, чтобы компенсировать влияние пониженной температуры секции нагревания на поглощение теплоты плоской заготовкой.

## 3) Понижение температуры секции нагревания.

Понижение температуры секции нагревания может предотвратить перегрев кромок заготовки и избежать линейных дефектов, возникающих в

вышеописанном случае (3). Кроме того, принимая во внимание, что окислительный процесс ускоряется при высокой температуре нагрева и что составляющие компоненты оксидов также изменяются с ростом температуры, при выемке заготовки из печи может легко образовываться слоистая железная окалина, которую трудно удалить. Таким образом, понижение температуры секции нагрева также может позволить избежать дефекта отслоения на кромках, возникающего в вышеописанном случае (4).

Однако в действительности, принимая во внимание разницу времени пребывания в печи и температуру, при которой заготовку вынимают из печи, в секции нагрева не накладывают особых требований на температуру печного газа, и ее можно определить, исходя из температуры секции предварительного нагрева и подъема температуры в секции выдержки.

При условии, что способ имеет ограничения по способу нагрева секции предварительного нагрева и секции выдержки, температура секции нагрева определяется фактическим производством. Более конкретно, подъем температуры плоской заготовки в секции нагрева удовлетворяет следующей формуле (3).

Указанный подъем температуры в секции выдержки, как отмечено выше, представляет собой разность между температурой плоской заготовки, когда она полностью вынута из печи, и ее температурой в конце секции нагрева ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Указанная температура в конце секции предварительного нагрева представляет собой температуру плоской заготовки, когда она полностью вынута из секции предварительного нагрева.

Температуру печного газа в секции нагрева определяют исходя из роста температуры в секции нагрева, как рассчитано выше, в сочетании с фактическим темпом производства (скорость продвижения вперед плоской заготовки внутри печи).

## 2. Операция грубой прокатки

В настоящем изобретении различные термины, используемые при описании операции грубой прокатки, определены ниже. Боковая вытяжка представляет собой фактическую вытяжку по ширине, вызванную деформирующей силой, принимаемой заготовкой в направлении ширины.

Деформирующую силу может создавать вертикальный валок или калибровочный пресс для заготовки.

Боковая вытяжка посредством вертикальной прокатки представляет собой фактическую вытяжку заготовки под воздействием вертикального вала, т.е. вытяжку по ширине заготовки после прохождения через вертикальный валок.

Отдельная вытяжка представляет собой вытяжку по ширине заготовки после каждого прохождения через вертикальный валок.

Горизонтальная вытяжка представляет собой деформацию заготовки, вызванную давлением горизонтального вала.

Суммарный коэффициент вытяжки представляет собой отношение (%) выходной толщины заготовки в конце прокатки к ее входной толщине в начале прокатки.

Боковая вытяжка КППЗ представляет собой вытяжку по ширине плоской заготовки после вытяжки посредством КППЗ.

В настоящем изобретении для операции грубой прокатки можно использовать оборудование грубой прокатки, которое обычно используют в существующем способе изготовления горячекатаной кремнистой стали. В качестве оборудования грубой прокатки можно использовать двухвалковый прокатный стан или четырехвалковый прокатный стан.

Что касается установки различных параметров операции грубой прокатки, можно использовать параметры, обычно применяемые в настоящее время, в качестве базисных. Однако, если некоторые параметры операции грубой прокатки установлены, как описано ниже, можно дополнительно снизить частоту возникновения дефектов кромки горячекатаной кремнистой стали.

#### 1) Боковая вытяжка

В настоящем изобретении применяют от 1 до 6 проходов боковой вытяжки посредством вертикальной прокатки, причем вытяжка для каждой боковой вытяжки составляет 10-40 см; предпочтительно применяют 3 прохода боковой вытяжки посредством вертикальной прокатки, при величине отдельной вытяжки, составляющей 30 см.

#### 2) Горизонтальная вытяжка

В настоящем изобретении применяют от 3 до 8 проходов горизонтального вала для вытяжки, с суммарным коэффициентом вытяжки 70-90%.

#### 3) Вода для удаления окалины

Чтобы предотвратить чрезмерное падение температуры поверхности, количество проходов с использованием воды в зоне грубой прокатки регулируют ниже 4, от извлечения плоской заготовки из нагревательной печи до ее помещения на промежуточный роликовый конвейер.

#### 4) Продолжительность грубой прокатки

Чтобы предотвратить чрезмерное падение температуры поверхности, грубая прокатка должна протекать быстро, и период времени между моментом, когда вся заготовка только что вынута из печи, и моментом, когда завершен последний проход грубой прокатки, регулируют в пределах 360 секунд.

#### 5) Калибровочный пресс для плоской заготовки (КППЗ)

При необходимости, в операции грубой прокатки можно использовать КППЗ. Использование блока КППЗ с вогнутым контуром помогает уменьшить расстояние от дефектов до кромок; таким образом, можно снизить степень обрезки кромок в последующей операции, с увеличением выхода. Если используют КППЗ, требуется регулировать боковую вытяжку в пределах диапазона 10-180 см.

#### 3. Операция чистовой прокатки

В способе изготовления горячекатаной кремнистой стали по настоящему изобретению повышение качества кромок горячекатаной кремнистой стали не включает усовершенствование операции чистовой прокатки. Поэтому операция чистовой прокатки не ограничена особым образом, и можно использовать оборудование для чистовой прокатки, которое обычно применяют в существующем способе изготовления горячекатаной кремнистой стали, т.е., как правило, прокатный стан с 5-7 четырехвалковыми клетями.

Примеры.

Далее технологическая схема настоящего изобретения дополнительно описана в сочетании с примерами и сравнительными примерами, но настоящее изобретение не ограничено этими примерами.

Ниже описаны исходные материалы и оборудование, используемые в процессе производства.

Материалы плоских заготовок: в настоящем изобретении можно использовать заготовки из кремнистой стали с различным содержанием кремния, изготавливаемые компанией Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., или аналогичные продукты, продаваемые на рынке.

Нагревательная печь: нагревательная печь с шагающим подом, снабженная форсункой с регенерацией тепла.

Калибровочный пресс для плоской заготовки (КППЗ): калибровочный пресс с направляющей плитой с входной стороны, входным/выходным прижимным валком и нажимным валком.

Оборудование грубой прокатки: две клетки, первая из которых представляет собой двухвалковый прокатный стан без вертикального валка, тогда как вторая представляет собой четырехвалковый прокатный стан, выполненный с возможностью реверсивной прокатки и включающий вертикальный валок.

Оборудование чистовой прокатки: прокатный стан с семью четырехвалковыми клетями.

## Примеры 1-5

Заготовку «А» из кремнистой стали (с содержанием кремния 2,1 масс. %) подвергали последовательной обработке с использованием следующих операций, чтобы получить горячекатаную кремнистую сталь.

### 1) Операция нагревания

Исходя из условий нагревания, указанных в таблице 1, заготовки в примерах 1-5, соответственно, поступают в нагревательную печь, где они последовательно проходят через три секции операции нагревания (т.е. секцию предварительного нагревания, секцию нагревания и секцию выдержки) перед выемкой из печи.

Таблица 1 – Параметры обработки заготовки

			Примеры				
			1	2	3	4	5
Температура заготовки при поступлении в печь			288	268	285	272	283
Операция нагревания	Секция предварительного нагревания	Скорость повышения температуры, °С/мин	8	5	5	8	8
	Секция нагревания	Подъем температуры, °С	310	466	499	294	311
	Секция выдержки	Подъем температуры, °С	10	10	-10	30	10
	Общее время пребывания заготовки в печи, мин		221	218	215	217	218
Температура заготовки при выемке из печи, °С			1120	1120	1120	1120	1120
Операция грубой прокатки	Отдельная вытяжка, см		10	20	40	20	30
	Боковая вытяжка, количество проходов		1	3	4	6	3
	Продолжительность грубой прокатки, секунд		210	210	210	200	200
	КППЗ		-	-	-	-	Есть
Оценка	Частота возникновения дефектов кромки, %		0,5	2,2	3	1,8	2

## 2) Операция грубой прокатки

Как показано в таблице 1, устанавливают величины боковой вытяжки, горизонтальной вытяжки, количество проходов с использованием воды в зоне грубой прокатки на стадии обработки водой для удаления окалины и продолжительность грубой прокатки, и направляют плоские заготовки кремнистой стали после операции нагревания в оборудование грубой прокатки для грубой прокатки.

В примере 5 используют калибровочный пресс для плоских заготовок, который не используют в примерах 1-4.

## 3) Операция чистовой прокатки

После грубой прокатки плоские заготовки направляют в оборудование чистовой прокатки для осуществления чистовой прокатки. Должны быть установлены следующие параметры:

- скорость обработки: 9-11 м/с;
- целевая толщина: 2,0-2,6 мм.

После этого проводили сравнительную оценку частоты возникновения дефектов кромки для продуктов из различных горячекатаных кремнистых сталей.

Использовали детектор качества поверхности полосовой стали, чтобы сделать фотографии с полным охватом по всей длине верхней и нижней поверхности горячекатаной кремнистой стали. Затем визуально проверяли качество поверхности в четырех местах на верхней, нижней и обеих боковых поверхностях горячекатаной кремнистой стали, принимая расстояние 15 мм от кромок в качестве стандарта. Когда дефекты присутствовали непрерывно на протяжении 5 м или присутствовало более 10 дефектов отслоения на кромках в пределах указанного интервала, горячекатаную кремнистую сталь считали некачественной.

Примеры 6-10.

Заготовку «А» из кремнистой стали (с содержанием кремния 2,1 масс. %), которую используют в примерах 1-5, также использовали в примерах 6-10, и, за исключением того, что операцию грубой прокатки осуществляли, как указано в таблице 2, все операции, используемые для изготовления кремнистой стали, были такими же, как операции, используемые в примерах 1-5.

Для оценки частоты возникновения дефектов кромки кремнистой стали в примерах 6-10 использовали такой же метод оценки, как и в примерах 1-5.

Таблица 2 – Параметры обработки заготовки

		Примеры				
		6	7	8	9	10
Операция грубой прокатки	Отдельная вытяжка, см	0	0	50	50	50
	Боковая вытяжка, количество проходов	3	3	3	3	3
	Продолжительность грубой прокатки, секунд	200	290	200	290	200
	КППЗ	-	-	-	-	Есть
Оценка	Частота возникновения дефектов кромки, %	3,6	4,7	4,1	5	3,5

Как видно из таблицы 2, в примерах 6-10, в которых использовали операцию нагревания согласно способу по настоящему изобретению. Тогда как операцию грубой прокатки все еще осуществляли в соответствии с существующей технологией изготовления кремнистой стали. Частота возникновения дефектов кромки составляла от 3,5% до 5%, что немного выше, чем эта величина в примерах 1-5, где как операцию нагревания, так и операцию грубой прокатки осуществляли в соответствии со способом изготовления по настоящему изобретению.

#### Примеры 11-15

Заготовку «В» из кремнистой стали (с содержанием кремния 0,5 масс. %) использовали в примерах 11-15, и, за исключением того, что операцию нагревания осуществляли, как указано в таблице 3. Все операции, используемые для изготовления кремнистой стали, были такими же, как



операции, используемые в примерах 1-5, и для оценки частоты возникновения дефектов кромки кремнистой стали в примерах 11-15 использовали такой же метод оценки, как и в примерах 1-5.

Таблица 3 – Параметры обработки заготовки

			Примеры				
			11	12	13	14	15
Операция нагрева	Секция предварительного нагрева	Скорость повышения температуры, °С/мин	5	5	5	5	5
	Секция нагрева	Подъем температуры, °С	480	461	431	391	362
	Секция выдержки	Подъем температуры, °С	-10	10	40	80	100
	Общее время пребывания заготовки в печи, мин		215	216	213	211	213
Оценка	Частота возникновения дефектов кромки, %		1,8	1,1	0,5	1,2	2,2

Как видно из таблицы 3, для заготовки из кремнистой стали с содержанием кремния 0,5 масс. % операцию нагрева и операцию грубой прокатки согласно способу по настоящему изобретению также можно применять для поддержания частоты возникновения дефектов кромки на относительно низком уровне.

#### Сравнительные примеры 1-5

В сравнительных примерах 1-3 использовали заготовку «А» из кремнистой стали (с содержанием кремния 2,1 масс. %), а в сравнительных примерах 4 и 5 использовали плоскую заготовку «В» из кремнистой стали (с содержанием кремния 0,5 масс. %); в сравнительных примерах 1-5, соответственно, операцию нагрева и операцию грубой прокатки проводили на основании параметров, указанных в таблице 4, а помимо этого использовали такие же операции, как в примерах 1-5, для изготовления

кремнистой стали и применяли такой же метод оценки, как в примерах 1-5, чтобы оценить частоту возникновения дефектов кромки.

Таблица 4 – Параметры обработки заготовки

			Сравнительные примеры				
			1	2	3	4	5
Содержание кремния в заготовке, масс. %			2,1	2,1	2,1	0,5	0,5
Температура заготовки при поступлении в печь			281	277	275	270	263
Операция нагревания	Секция предварительного нагревания	Скорость повышения температуры, °С/мин	3	3	3	3	3
	Секция нагревания	Подъем температуры, °С	471	470	475	570	457
	Секция выдержки	Подъем температуры, °С	80	80	80	-20	100
	Общее время пребывания заготовки в печи, мин		191	193	188	183	181
Температура заготовки при выемке из печи, °С			1120	1120	1120	1120	1120
Операция грубой прокатки	Отдельная вытяжка, см		50	7	50	50	50
	Боковая вытяжка, количество проходов		3	3	3	3	3
	Продолжительность грубой прокатки, секунд		240	240	200	200	200
	КППЗ		-	-	-	-	Есть
Оценка	Частота возникновения дефектов кромки, %		11	8	7	8	6

Как видно из таблицы 4, частота возникновения дефектов кромки в продуктах из горячекатаной кремнистой стали, изготовленных существующими в настоящее время способами изготовления, т.е. в соответствии со сравнительными примерами 1-5, составляет, соответственно, 11%, 8%, 7%, 8% и 6%. Это гораздо выше частоты возникновения дефектов кромки в продуктах из горячекатаной кремнистой стали в примерах 1-15 по настоящему изобретению.

Как видно из приведенных выше примеров 1-15 и сравнительных примеров 1-5, при изготовлении горячекатаной кремнистой стали операция

нагревания по настоящему изобретению позволяет заметно снизить частоту возникновения дефектов кромки, а выполнение как операции нагревания, так и операции грубой прокатки в соответствии с настоящим изобретением может дополнительно снизить частоту возникновения дефектов кромки.

Таким образом, идеальным выбором является выполнение как операции нагревания, так и операции грубой прокатки в соответствии с настоящим изобретением.

Промышленная применимость. Способ изготовления по настоящему изобретению позволяет эффективно снизить частоту возникновения дефектов кромки горячекатаной кремнистой стали и получать горячекатаную кремнистую сталь с поверхностью высокого качества.

Резюмируя информацию, приведенную в данном пункте можно предположить, что данный метод, улучшающий качество прокатки, нужно адаптировать для производства длинномерных прутков. Тогда его можно будет использовать в сочетании с методом термосиловой правки, описанной в работах [22-25]. Такое сочетание позволит существенно поднять качество длинномерных прутков, а значит, повысит и качество термосиловой обработки.

## **1.2 Термическая обработка стальных деталей**

Помимо качества заготовки – прутка определяющее влияние на качество термосиловой обработки, является сама термообработка, способ и режимы ее проведения. Данное влияние подробно описано авторами О.И. Драчевым, Д.Ю. Вороновым, Д.А. Расторгуевым, в работах [1-20].

Главным выводом, данных авторов является утверждение: качество термосиловой обработки определяется уровнем и характером распределения напряжений в материале детали.

Во многом величина данных напряжений формируется термообработкой. Ниже рассмотрим перспективный метод термообработки,

который возможно применить в сочетании с термосиловой обработкой, с целью увеличения ее качества.

Такая перспективная технология термообработки изложена в патенте РФ №2606665, авторов Чертовских Е.О., Околович Г.А., Габец А.В.

Идея относится к металлургии и машиностроению и может быть использовано при термической обработке массивных стальных литых деталей, в том числе деталей железнодорожного транспорта.

Для достижения необходимых механических свойств изделий (отливок) из сталей, в том числе названных сталей, рекомендуется проведение термообработки, включающей нормализацию или нормализацию с отжигом 1 рода. ГОСТ 977-88 для стали 20ГЛ.

Для целей настоящей заявки под термином «нормализация» понимается именно нагревание изделия (отливки), а не нагревание вместе с последующим отпуском (охлаждением). Таким образом, термин «нормализация» употребляется в том же значении, что и в ГОСТ 977-88.

Общеизвестно, что закаливание (закалка) сталей с самоотпуском представляет собой технологию, когда нагретые изделия помещают в охлаждающую среду, выдерживают в ней до неполного охлаждения и извлекают из охлаждающей среды, после чего поверхностные слои изделия повторно нагреваются за счет внутренней теплоты до требуемой температуры (осуществляется самоотпуск).

Известен способ термической обработки литой стали, заключающийся в нагреве отливок на 50-70°C выше точки Ас<sub>3</sub>, выдержке при этой температуре и последующем охлаждении на воздухе (Материаловедение: учебник для ВУЗов / Б.Н. Арзамасов, В.И. Макарова и др. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003, с. 178). Недостатком данного способа термической обработки для массивных изделий является низкая скорость охлаждения, следовательно, наблюдается снижение твердости и ударной вязкости KCV-60, что приводит к преждевременным усталостным разрушениям. (патент RU 2481406).

Недостатком указанного способа является его длительность, сложность, энергозатратность, поскольку он требует как минимум три цикла термообработки (первый, промежуточный, последний): 1) нагрев стали вместе с печью и ускоренное охлаждение до 400°C; 2) ускоренный нагрев в печи и ускоренное охлаждение до 400°C; 3) ускоренный нагрев в печи и охлаждение до комнатной температуры (из формулы патента при этом неясно, является ли охлаждение в последнем цикле полностью ускоренным или делится на ускоренное до 400°C с последующим неускоренным).

Характер способа охлаждения в патенте RU 2481406 не указан. Также необходимо отметить, что предусматриваемый патентом RU 2481406 в промежуточных циклах нагрев образцов в прогретой до 930°C печи со скоростью 50-70°C/мин делает этот способ практически неприменимым для термообработки крупных литых деталей массой до 600 кг из-за невозможности быстро достигать высоких скоростей нагрева существующими технологиями. Кроме того, предложенное в патенте «ускоренное» охлаждение 0,2-0,8°C/сек практически совпадает с охлаждением деталей на спокойном воздухе.

Задачей заявляемого изобретения является разработка эффективного экономичного способа термической обработки крупных литых деталей железнодорожных вагонов.

Данная задача достигается за счет того, что использован способ термической обработки литых изделий и деталей, включающий нормализацию с нагревом при 860-940°C (полнота нагрева достигается также некоторой выдержкой) и изотермический отпуск, отличающийся тем, что сначала выполняют ускоренное охлаждение со скоростью 1-25°C/сек (от 1 до 25 градусов Цельсия в секунду) до 400-450°C в воздушном потоке, с последующим изотермическим самоотпуском (отжигом) с использованием остаточного тепла обрабатываемой детали, аккумулированного в изделии при нагреве для нормализации (и выдержке).

Желательно, чтобы самоотпуск проходил в интервале температур 550-650°С. При этом может учитываться масса детали таким образом, чтобы при изотермическом ее самоотпуске температура поверхности детали достигала не менее 550 и не более 650°С.

Оптимальным является применение указанного способа для таких изделий, как детали железнодорожных вагонов из низкоуглеродистых сталей 20ГЛ, 20Г1ФЛ.

Оптимальным также является такое применение способа, при котором нагрев (до начала выдержки) осуществляется со скоростью 5-30°С/мин.

Техническим результатом, обеспечиваемым приведенной совокупностью признаков предлагаемого способа, является повышение хладостойкости стальных изделий при низких температурах, достижение параметра их ударной вязкости KCV-60 не менее 300 кДж/м<sup>2</sup>, а также повышение основных прочностных показателей таких изделий.

Из данных следующей таблицы механических свойств литых изделий из сталей 20ГЛ, 20Г1ФЛ можно сделать вывод, что заявляемое изобретение обеспечивает достижение улучшенных прочностных показателей сталями 20ГЛ и 20Г1ФЛ в таблице 5.

Таблица 5 – Прочностные показатели стали

Категория свойств	Предел текучести, МПа	Временное сопротивление, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup>
	не менее				
Требования по ГОСТ 32400-2013	300-343	500-510	18-20	30-35	170-200
Аналог (патент №2481406)	560	720	40	70	-
Стали по настоящей заявке	350	540	30	40	300

В результате установлено увеличение скорости охлаждения образцов от 4 до 6°С/сек при выдержке в печи 30 мин и от 3,5 до 7°С/сек при выдержке в печи 60 мин при расчете скоростей охлаждения до 350°С, что наглядно поясняется таблицей 6.

Таблица 6 – Параметры образцов

№ режима	1	2	3	4	5	6	7	8
Время t, мин	60	30	60	60	30	30	30	60
Скорость охлаждения, °С/сек	6	7	3,5	7	4	4,5	5,5	3,5
Номер зерна по ГОСТ 5639	10	8	9	9	10	10	11	10
Ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup>	111	125	167	236	282	308	358	385

Снижение температуры нормализации от 960°С до 860°С, а также ускоренное охлаждение в воздушном потоке до 400-450°С ведет к измельчению зерна аустенита, равномерному перераспределению феррито-перлитных составляющих. Так как с повышением переохлаждения увеличивается число зародышей аустенитных зерен (Металлография железа, т. 2, под ред. Ф.Н. Тавадзе. - М.: Metallurgia, 1972, - с. 11).

Таким образом, технология ускоренного охлаждения до 400-450°С с обдувом нагретого образца холодным воздухом приводит к формированию нижнего бейнита.

Последующее пассивное охлаждение на воздухе обеспечивает изотермический отпуск (отжиг) в интервале температур 550-650°С за счет теплоты, аккумулированной в массивном изделии (600 кг) при нагреве для нормализации, обеспечивает дисперсное распределение феррита, перлита, нижнего бейнита, рекристаллизацию и снятие внутренних напряжений в отливке с достижением показателей высокой ударной вязкости 350-400 кДж/м<sup>2</sup> вместо 170-200 кДж/м<sup>2</sup> (Таблица 6).

Термообрабатываемые детали крупного литья массой до 600 кг имеют необходимый запас накопленной энергии, способствующей протеканию изотермического превращения при охлаждении и получению более высоких показателей ударной вязкости при отрицательных температурах (не менее 300 кДж/м<sup>2</sup>), по сравнению с нормализацией и отжигом 1-го рода (не менее 170 кДж/м<sup>2</sup>). При этом экономический эффект достигается за счет исключения дополнительного отжига 1-го рода. (Адашкин А.М. Материаловедение в машиностроении: учебник для бакалавров / А.М. Адашкин, Ю.Е. Седов, А.К. Онегина, В.Н. Климов. - М.: Издательство Юрайт, 2013. - 535 с.).

Изложенный материал поясняется рисунками, на которых показано:

- рисунок 8 - Диаграмма предлагаемого режима термообработки.
- рисунок 9 - Диаграмма изотермического распада переохлажденного аустенита стали 20Г1ФЛ.
- рисунок 10 - Кинетические кривые охлаждения стали 20Г1ФЛ до температуры 350°С.
- рисунок 11 - Гистограмма зависимости ударной вязкости от температуры нагрева, времени выдержки, скорости потока воздуха.
- рисунок 12 - Микроструктура стали 20Г1ФЛ после термообработки по предлагаемой технологии (стократное увеличение).
- рисунок 13 - Микроструктура стали 20Г1ФЛ после термообработки по предлагаемой технологии (тысячекратное увеличение).
- рисунок 14 - Диаграмма традиционного режима термообработки без ускоренного охлаждения.

На рисунке 8 приведена диаграмма предлагаемого режима термообработки. На стадии «А» происходит нагрев изделия, на стадии «Б» происходит прогрев изделия (выдержка), на стадии «В» осуществляется ускоренное охлаждение изделия на воздухе со скоростью от 1 до 25 градусов Цельсия в секунду, на стадии «Г» осуществляется изотермический самоотпуск (отжиг) с последующим полным охлаждением.



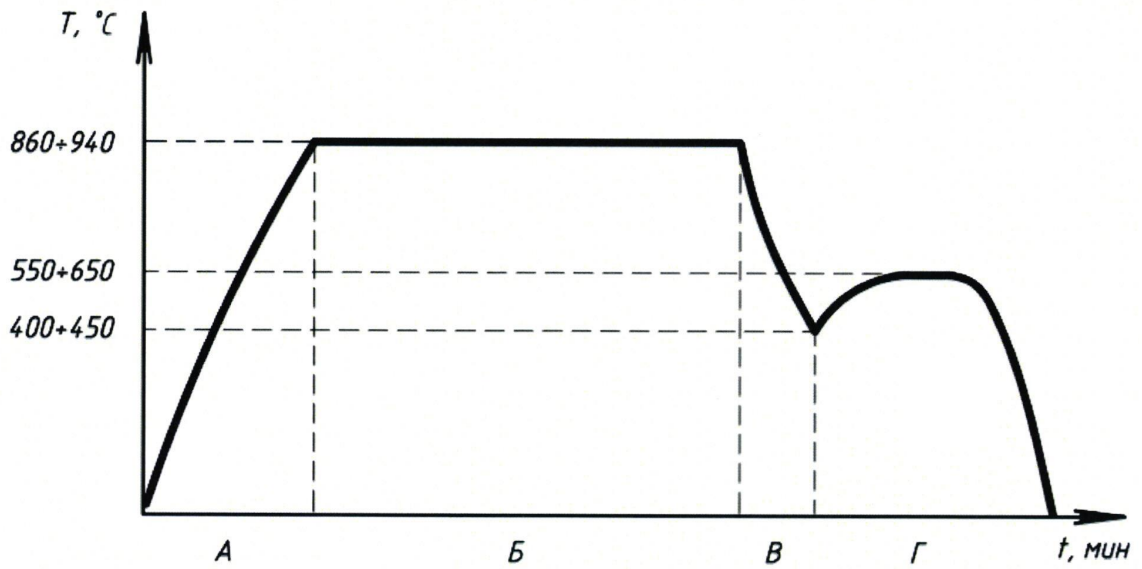


Рисунок 8 - Диаграмма предлагаемого режима термообработки

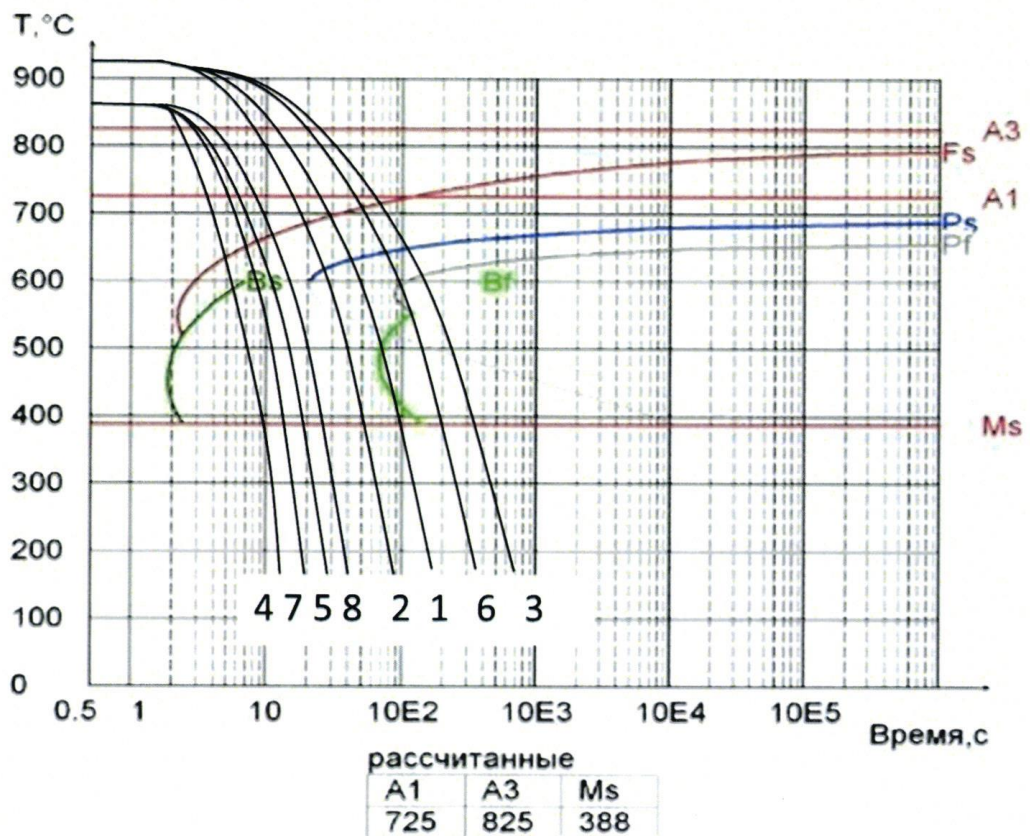


Рисунок 9 - Диаграмма изотермического распада переохлажденного аустенита

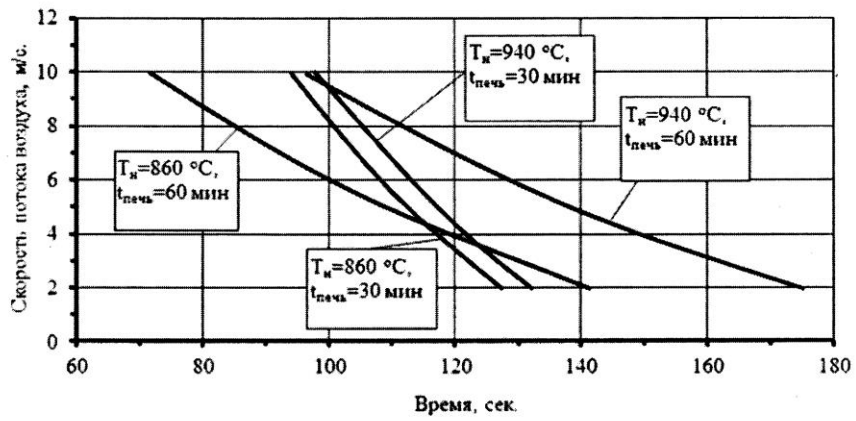


Рисунок 10 - Кинетические кривые охлаждения

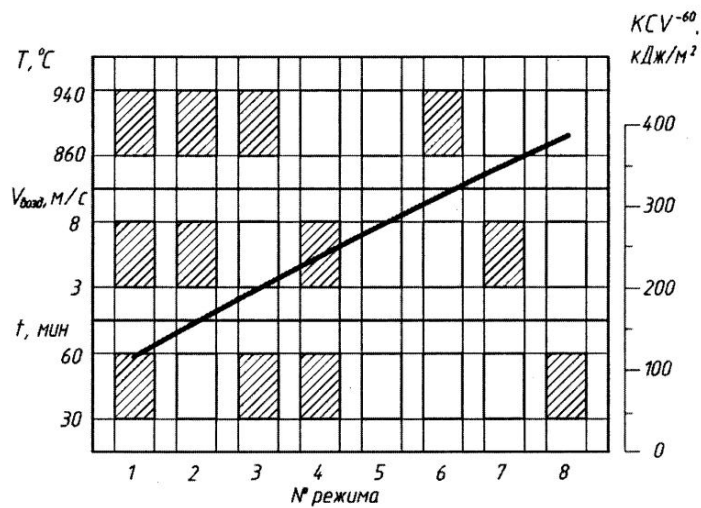


Рисунок 11 - Гистограмма зависимости ударной вязкости от температуры нагрева, времени выдержки, скорости потока воздуха

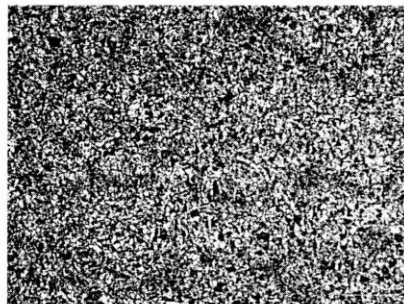


Рисунок 12 - Микроструктура стали 20Г1ФЛ после термообработки по предлагаемой технологии (стократное увеличение)

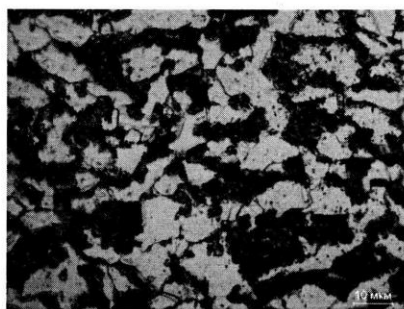


Рисунок 13 - Микроструктура стали 20Г1ФЛ после термообработки по предлагаемой технологии (тысячекратное увеличение)

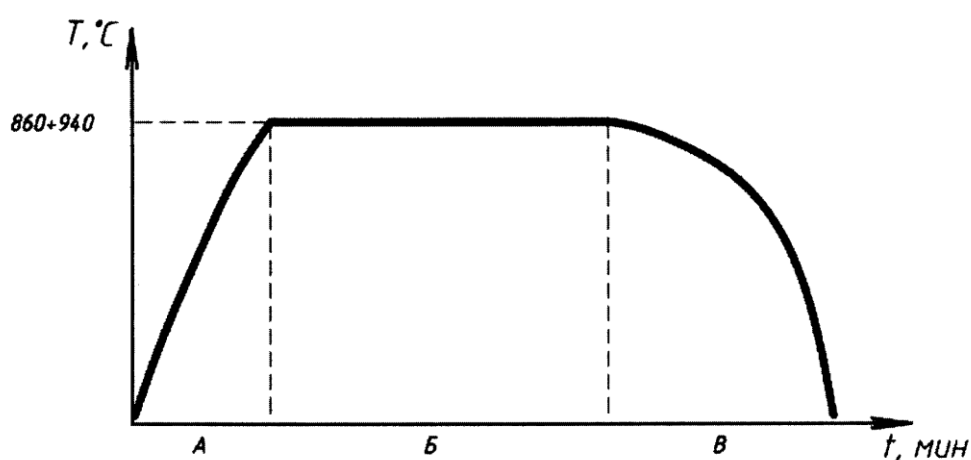


Рисунок 14 – Диаграмма традиционного режима термообработки без ускоренного охлаждения

На рисунке 14 приведена диаграмма обыкновенного режима термообработки с медленным охлаждением, в котором нет самоотпуска. На стадии «А» происходит нагрев изделия, на стадии «Б» (выдержка) добиваются равномерного полного нагрева изделия, на стадии «В» осуществляется постепенное охлаждение (отжиг первого рода), при этом стадия ускоренного охлаждения отсутствует.

Заявляемый способ прошел экспериментальную проверку при изготовлении следующих деталей: рама боковая, балка надрессорная, которые при сравнительно одинаковом весе могут загружаться в печь как поочередно, так и последовательно.

Скорость нагрева выбиралась максимальной, но так, чтобы нагрев не приводил к формированию повышенных напряжений в конструкции, вызывающих появление дефектов (трещин, коробления). Время выдержки изделий было регламентировано структурными особенностями так, чтобы длительность выдержки не приводила к формированию в структуре ячеистого перлита. Затем изделие равномерно охлаждалось со скоростью 1-25°С/сек до температуры 400-450°С с завершающим охлаждением на спокойном воздухе рисунок 8.

Анализируя представленный в данном пункте материал, позволяет сделать вывод о том, что данный метод может сочетаться с термосиловой обработкой низкоуглеродистых сталей. Теоретически это может привести к повышению качества термосилой обработки, что способствует достижению цели данной диссертации.

### **1.3 Вибрационные методы обработки**

В работах [1-20], авторами О.И. Драчевым, Д.Ю. Вороновым, Д.А. Расторгуевым, обоснована возможность применения вибрационных методов обработки в сочетании с термосиловой обработкой, с целью уменьшения уровня внутренних напряжений. Поэтому анализ перспективных методов виброобработки, отвечает цели данной магистерской диссертации.

Наиболее перспективной идеей по вибрационной обработке, которую можно применить совместно с термосиловой обработкой, является идея, изложенная в патенте РФ № 2695912, авторами Усольцевым А.М., Бокаревым С.А., Поповой Е.Г., Маликовым М.Ю.

Изобретение иллюстрируется чертежами, где на рисунке 15 представлена схема установки вибрационного устройства на ребро жесткости балки пролетного строения в месте сварного шва (1 - ребро жесткости балки, 2 - станина для крепления вибрационного устройства; 3 - вибрационное устройство; 4 - направление движения поперечных колебаний участка стенки

балки). На рисунке 16 - трехмерная конечно-элементная модель пролетного строения. На рисунке 17 - виброграмма колебаний. На рисунке 18 - фактическая 1-ая пиковая (резонансная) частота.

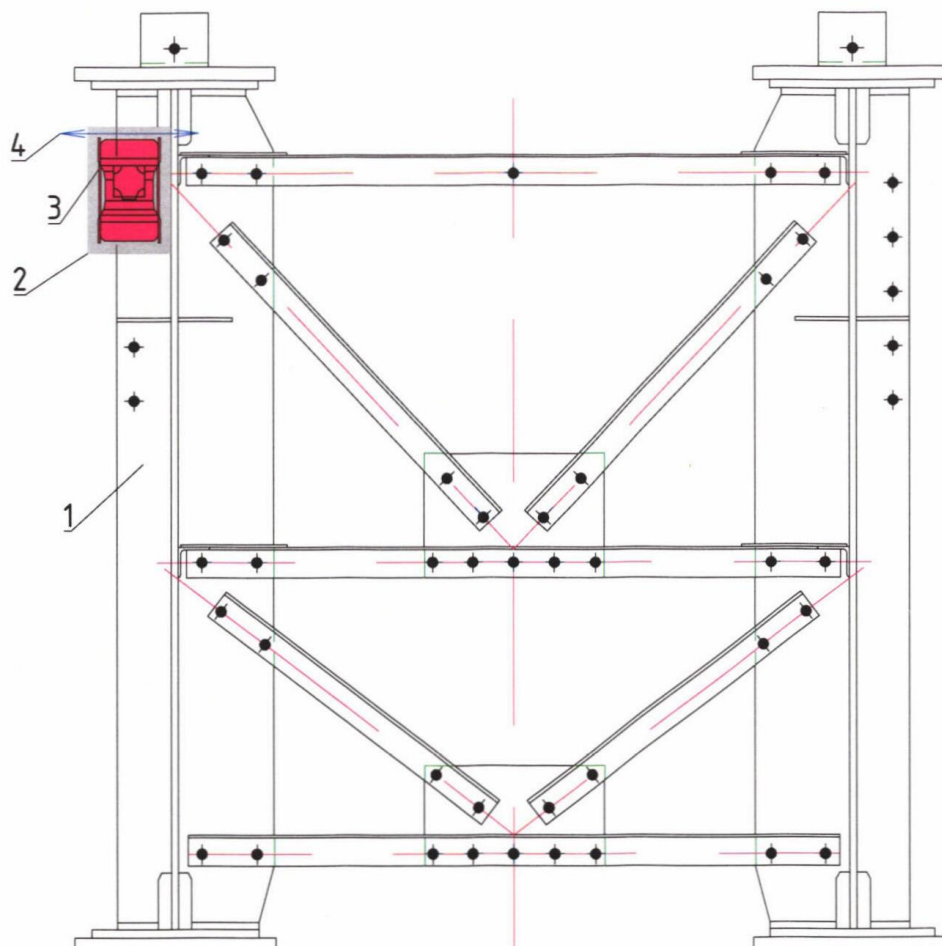


Рисунок 15 - Схема установки вибрационного устройства

Способ осуществляется следующим образом. Вибрационное устройство 3 крепится к ребру жесткости 1 таким образом, чтобы инициировались горизонтальные колебания стенки балки. Частота колебаний задается частотным преобразователем так, чтобы она совпадала с 1-ой резонансной (локальной между соседними ребрами жесткости) частотой собственных колебаний стенки балки в месте конца сварного шва.

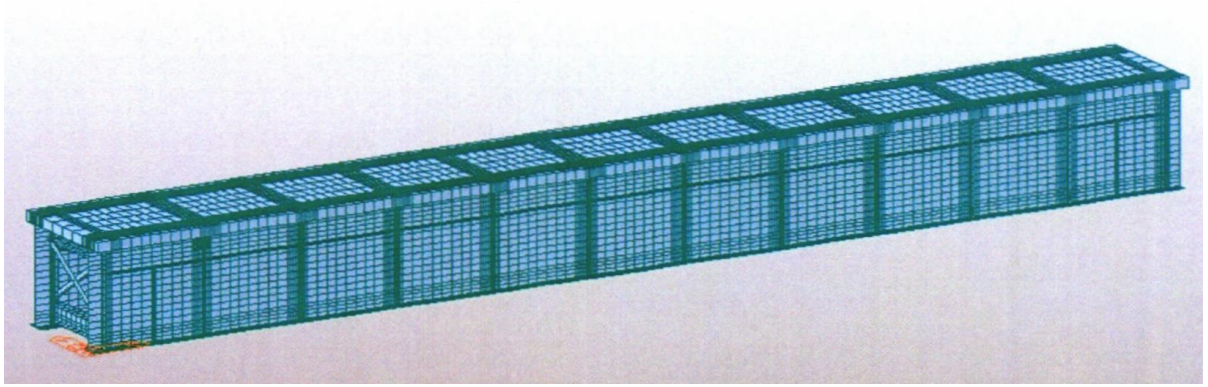


Рисунок 16 - Трехмерная конечно-элементная модель пролетного строения

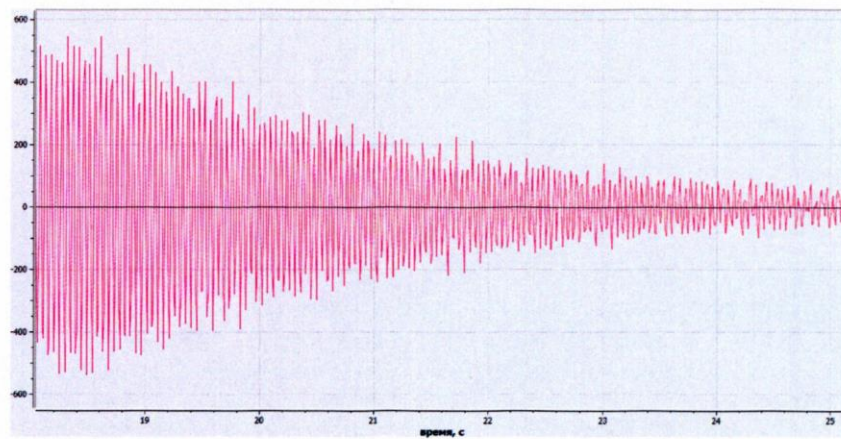


Рисунок 17 - Виброграмма колебаний

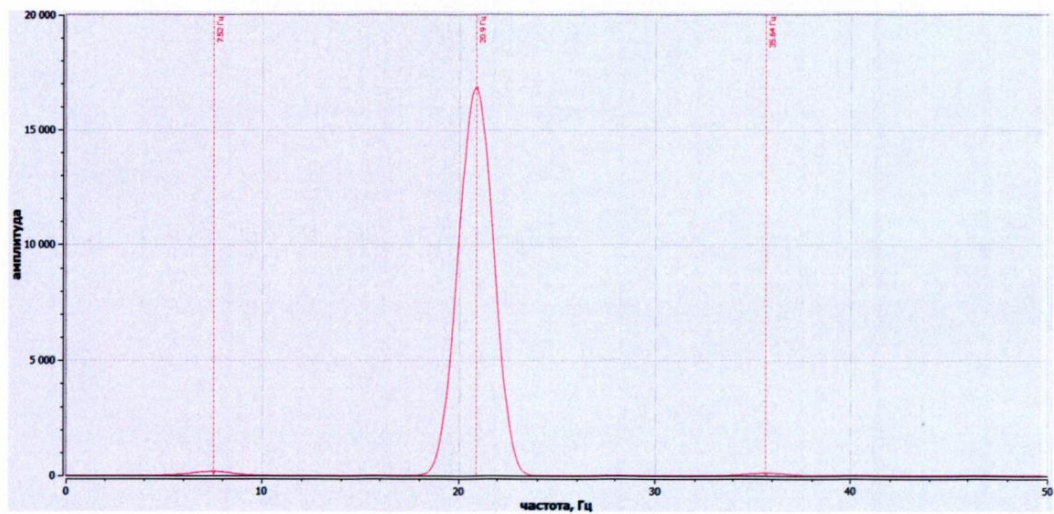


Рисунок 18 - Фактическая 1-ая пиковая (резонансная) частота

Для определения 1-ой резонансной частоты в программном комплексе создают конечно-элементную модель пролетного строения. Исходными данными являются геометрические размеры сечений и элементов пролетного строения, а также материал из которого изготовлено пролетное строение (рисунке 16). Создавая нагрузку в виде малых воздействий на элемент пролетного строения (стенка балки у верхнего или нижнего места соединения сварного шва и стенки балки) возбуждаются колебания стенки балки.

По значению максимальных амплитуд получаем первую резонансную частоту колебания стенки балки. Затем на стенку балки на конце сварного шва прикрепления ребра жесткости устанавливают виброакселерометры, и после этого методом малых воздействий (горизонтальный удар резинового молотка массой 2-3 кг) возбуждают колебания. С помощью системы для записи и обработки данных с виброакселерометров в измерительном комплексе «Тензор МС-В» (свидетельство Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии об утверждении типа средств измерения RU.C.34.007.A №32603/1) выполняют запись виброграмм колебаний (рисунке 17). Обработка результатов измерения (виброграммы) с помощью программного обеспечения комплекса «Тензор МС-В» позволяет выделить фактическую первую пиковую (резонансную) частоту (рисунке 18), на которой и производится виброобработка стенки балки в течение 10-20 минут в диапазоне плюс - минус 20% от нее технологическим комплексом НВО «Резонанс И100-17».

В заявленном изобретении (в отличие от прототипа) производится виброобработка локальной зоны, а не всей конструкции. Что способствует снижению остаточных напряжений за счет суммирования их с вибрационными, вследствие чего напряжения в металле достигают предела текучести и происходят пластические деформации материала. В результате которых происходит перераспределение напряжений в конструкции, повышается усталостная долговечность и предотвращается возникновение

усталостных трещин, в т.ч. типа Т-9 и Т-10 сварных балок пролетных строений и проезжей части мостов.

Анализируя представленный в данном пункте материал, позволяет сделать вывод о том, что данный метод может сочетаться с термосиловой обработкой. Теоретически это может привести к повышению качества термосилой обработки, что способствует достижению цели данной диссертации.



## **Выводы по главе 1**

Проведя анализ, представленной в главе 1 информации, можно сделать следующие выводы:

1. Для повышения качества изготовления маложестких валов необходимо повысить качество заготовок – прутков, качество проведения самой термообработки, а также сочетать с термосиловой обработкой другие способы снижения напряжений, например виброобработку.
2. Применение технологии повышающей качество горячекатаных прутков в сочетании с методом термосиловой правки позволит существенно повысить качество изготовления маложестких валов.
3. Контроль за параметрами термообработки в процессе термообработки маложестких валов позволит существенно повысить их качество.
4. Метод виброобработки может сочетаться с термосиловой обработкой и позволит существенно повысить качество изготовления маложестких валов.

## Глава 2. Исследование и усовершенствование процесса термосиловой обработки

### 2.1 Анализ сущности процессов, реализующих метод термосиловой обработки

Анализируя данные, приведенные в предыдущих разделах данной работы, мы сделали вывод о том, что определяющее значение для качества обработки валов малой жесткости имеет наличие и распределение внутренних напряжений. Данные напряжения формируют значительные деформирующие моменты, которые зависят от характера распределения нагрузок. Ниже на рисунке 19, показан характер распределения остаточных напряжений в объеме валов малой жесткости.

Математически данное распределение описывается формулами (4-7).

Полный момент в сечении по формуле (4) имеет вид:

$$M(z) = \sqrt{M_x^2 + M_y^2} \quad (4)$$

где  $M_x$  и  $M_y$  - деформирующие моменты, соответственно по оси «х» и «у».

Тогда, наибольшая деформация будет характеризоваться величиной стрелы прогиба, которая определяется по формуле (5):

$$y(z) = \frac{\pi R^3 (L - T) l^2}{480 E J} - \frac{\pi R^3 L l}{20 E J} z - \frac{\pi R^3}{10 l^2 E J} \left[ \frac{(L - T) \left( z - \frac{l}{2} \right)^4}{3} - \frac{L l^2 z^2}{2} \right] \quad (5)$$

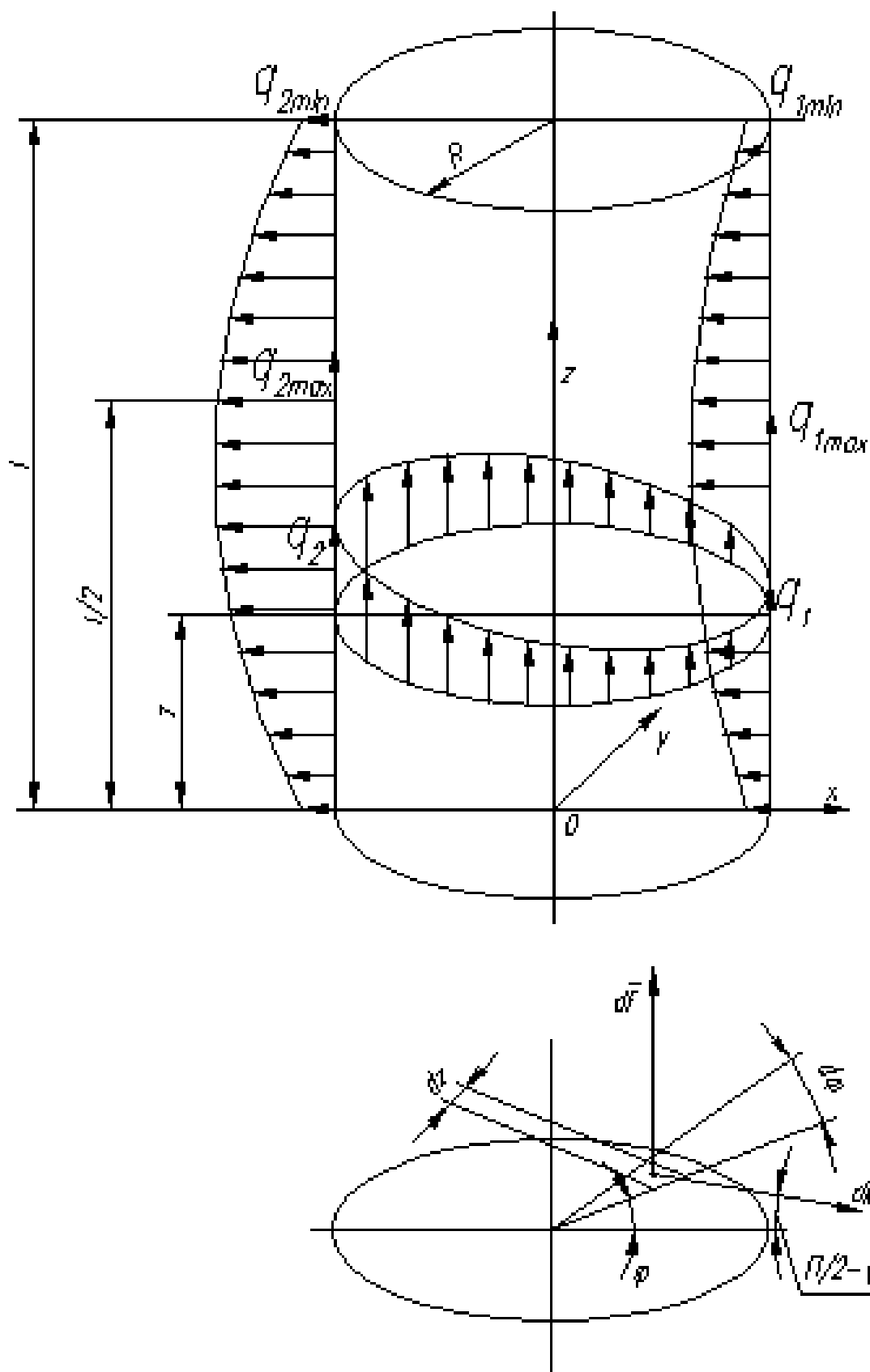


Рисунок 19 - Распределение остаточных напряжений

Максимальный прогиб вал имеет в середине, вследствие симметрии распределения  $q(z)$ , тогда по формуле (6):

$$y_{\max} = \frac{\pi R^3 l^2}{80 E J} \left( \frac{5L + T}{6} \right) \quad (6)$$

Учитывая, что  $i = \frac{q_{2\max}}{q_{1\max}}$ , а также учитывая, что  $J = \frac{\pi R^4}{4}$ , получим

итоговое соотношения для стрелы прогиба, формула (7):

$$\frac{y_{\max}}{l} = \frac{1}{10} E \cdot \left( \frac{l}{d} \right) \cdot q_{1\max} (i - 1) \quad (7)$$

Рисунок 19 и формулы (4-7), выявляют необходимость применения технологии, способной существенно снизить величину данного параметра.

Примером такой технологии служит термосиловая обработка (ТСО). Другими словами, ТСО способна устранять неравномерность распределения остаточных напряжений технологическую наследственность, полученную изделием на предшествующих ТСО операциях механической обработки.

Зависимость  $y/l$  от величины остаточных напряжений и их равномерности показаны ниже на рисунке 20. Как видно из рисунка 2, под действием осевого растягивающего усилия, существенно снижается величина  $y/l$ , а следовательно качество обработки увеличивается.

Еще большее снижение величины  $y/l$  достигается комбинированным совмещением осевого усилия и скручивающего момента. Это перспективная технология термосиловой обработки, которая более подробно будет описана ниже, в следующем пункте.

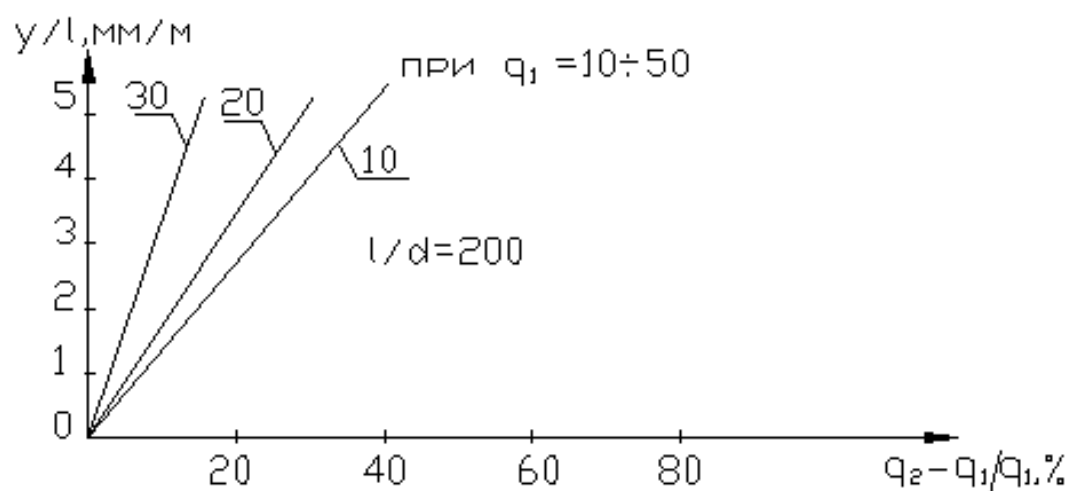
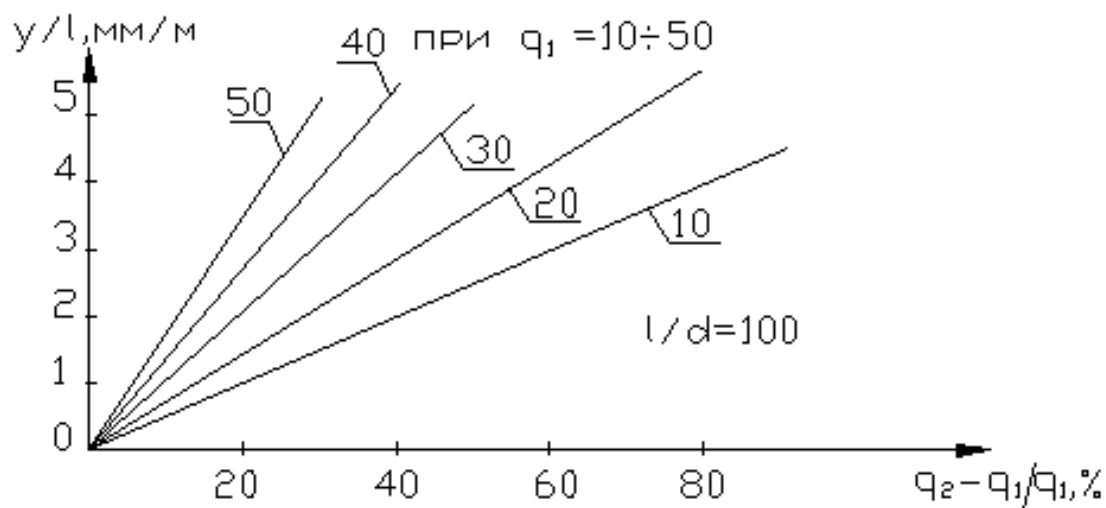
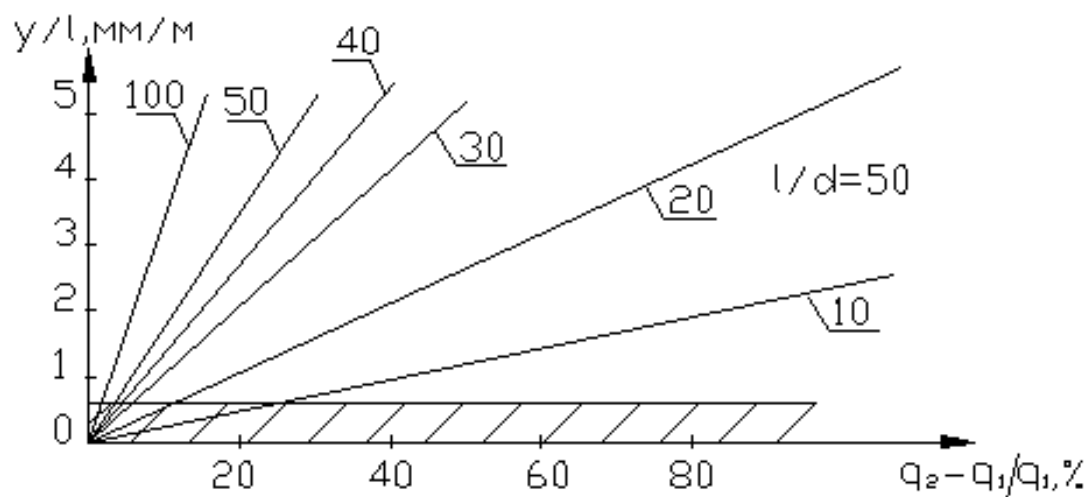


Рисунок 20 - Зависимость  $y/l$  от величины остаточных напряжений и их равномерности

## 2.2 Приблизительно-возможный вывод математической модели ТСО со скручивающим моментом

Итак, большее снижение величины  $y/l$  достигается комбинированным совмещением осевого усилия и скручивающего момента, в этом легко убедиться, если учесть деформацию кручения, тогда по формуле (8):

$$\tau = \frac{\eta}{\sigma_{общ}} = \frac{\eta}{\sqrt{\sigma_{сд1}^2 + \sigma_{сд2}^2}} \quad (8)$$

где  $\sigma_{сд1}$  – напряжение сдвига от действия осевой нагрузки;

$\sigma_{сд2}$  – напряжение сдвига от действия деформации кручения

Приблизительно-возможный вывод математической модели ТСО со скручивающим моментом поясняется рисунком 21, приведенным ниже.

Учитывая, что зависимость момента скручивания  $M_{кр}$  и угла закручивания  $\varphi$  носит линейный характер, запишем по формуле (9):

$$\tau = \frac{M_{кр}}{j_p} = \frac{\theta * G * r}{l} = G * r * \left( \frac{\theta_1}{l_1} + \frac{\theta_2}{l_2} \right) = const, \quad (9)$$

Тогда общий момент скручивания  $M_{кр}$  учитывающий моменты скручивания прикладываемые с обоих концов стержня или вала определим как показано по формуле (10):

$$\tau = \frac{M_{кр}}{j_p} = \frac{\theta * G * r}{l} = G * r * \left( \frac{\theta_1}{l_1} + \frac{\theta_2}{l_2} - \frac{\theta_3}{l_3} - \frac{\theta_4}{l_4} \right) = const, \quad (10)$$

Выстой  $T=const, E=const, M_k > M_{k0.2} P=const, G=const$

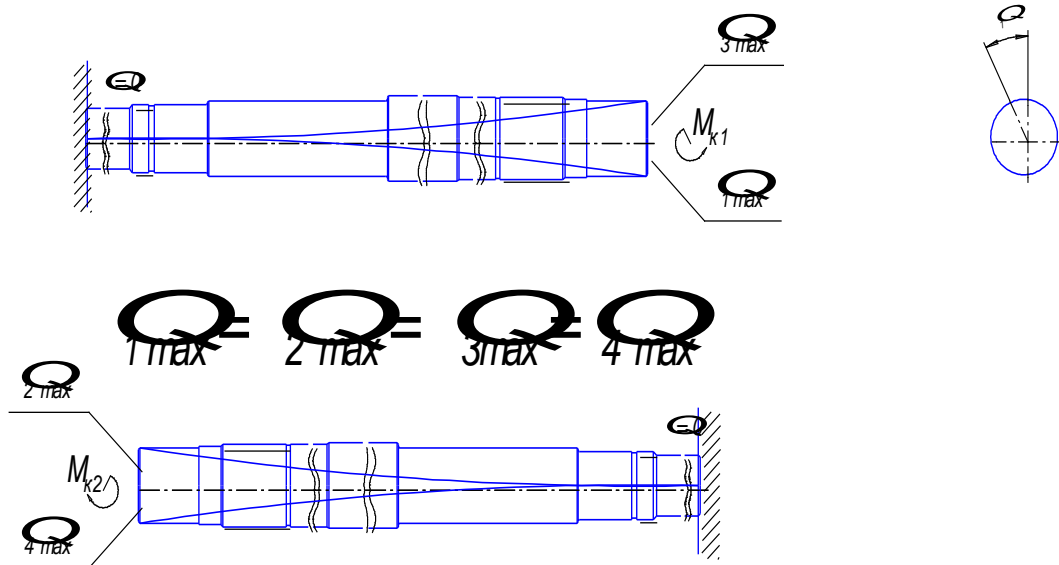


Рисунок 21 - . Приблизительно-возможный вывод математической модели ТСО со скручивающим моментом

Действительно, в этом легко убедиться, если в формуле (10) учесть деформацию кручения, тогда по формуле (11), имеем:

$$\tau = \frac{\eta}{\sigma_{общ}} = \frac{\eta}{\sqrt{\sigma_{сд1}^2 + \sigma_{сд2}^2}}, \quad (11)$$

где  $\sigma_{сд1}$  – напряжение сдвига от действия осевой нагрузки;

$\sigma_{сд2}$  – напряжение сдвига от действия деформации кручения.

Из формулы (11) видно, что  $\sigma_{общ} = \sqrt{\sigma_{сд1}^2 + \sigma_{сд2}^2} > \sigma_{сд1}$ , следовательно знаменатель формулы (11) численно больше величины сдвига от действия вдоль осевой нагрузки, в свою очередь это приводит к снижению напряжений. Данное утверждение выражается следующей зависимостью (12):

$$\int_F \tau_p p dF = M_{кр}, \quad (12)$$

где  $\tau_p$ - касательное напряжение, действующее в элементарной площадке  $dF$ , расположенной на расстоянии произвольного радиуса  $\rho$  от центра вала, и составляющее с последним угол  $\pi / 2$  рад.

Учитывая, что зависимость момента скручивания  $M_k$  и угла закручивания  $\varphi$  носит линейный характер, запишем (13):

$$\tau = \frac{M_{kp}}{j_p} = \frac{\varphi * G * r}{l} = G * r * \left( \frac{\varphi_1}{l_1} + \frac{\varphi_2}{l_2} \right) = const, \quad (13)$$

где  $G$  – модуль упругости при сдвиге, МПа;

$r$  – радиус стержня, мм;

$l_1$  и  $l_2$  – расстояние от правого и левого конца стержня соответственно

до искомого сечения, мм;

$\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – угол закручивания от действия  $M_k$  справа и слева соответственно

Данные и последующие зависимости легли в основу специального приспособления для ТСО – стапеля. Основой работы денного приспособления является больший коэффициент линейного расширения, чем у вала. Ниже на рисунке 22 показана зависимость линейного расширения стапеля и линейного расширения заготовки.



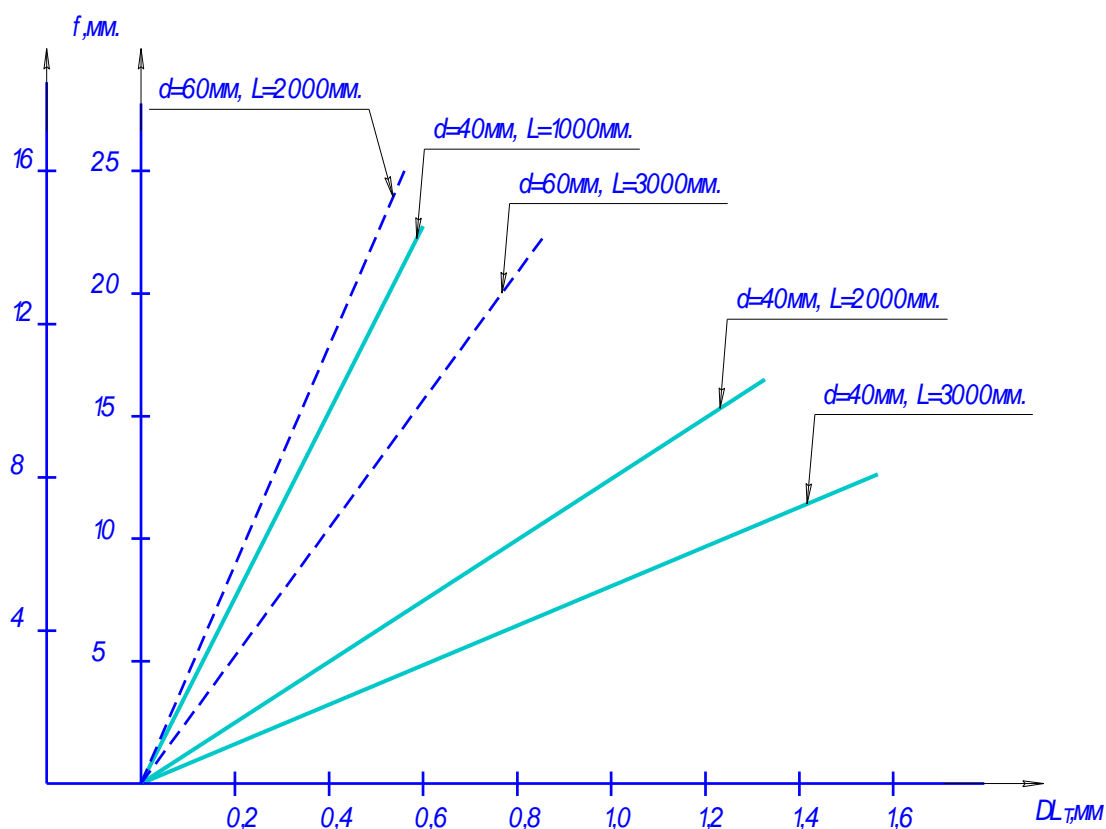


Рисунок 22 - Зависимость линейного расширения стапеля и линейного расширения заготовки

Как видно из рисунка 4 в любой момент времени расширение у стапеля выше чем у заготовки, что позволяет создать исходную осевую силу, для компенсации описанного выше механизма образования кривизны. Кривизна длинномерного вала описывается синусоидой по формуле (14):

$$y = f \cdot \sin \frac{\pi x}{L} \quad (14)$$

где  $f$  – стрела прогиба;

$L$  – длина вала.

Удлинение вала при термообработке на величину  $\Delta L_T$  существенно снижает стрелу прогиба, а при вертикальном расположении длинномерного

вала при термообработке и вовсе устраняет ее. Зависимость стрелы прогиба от удлинения длинномерного вала показана на рисунке 23.

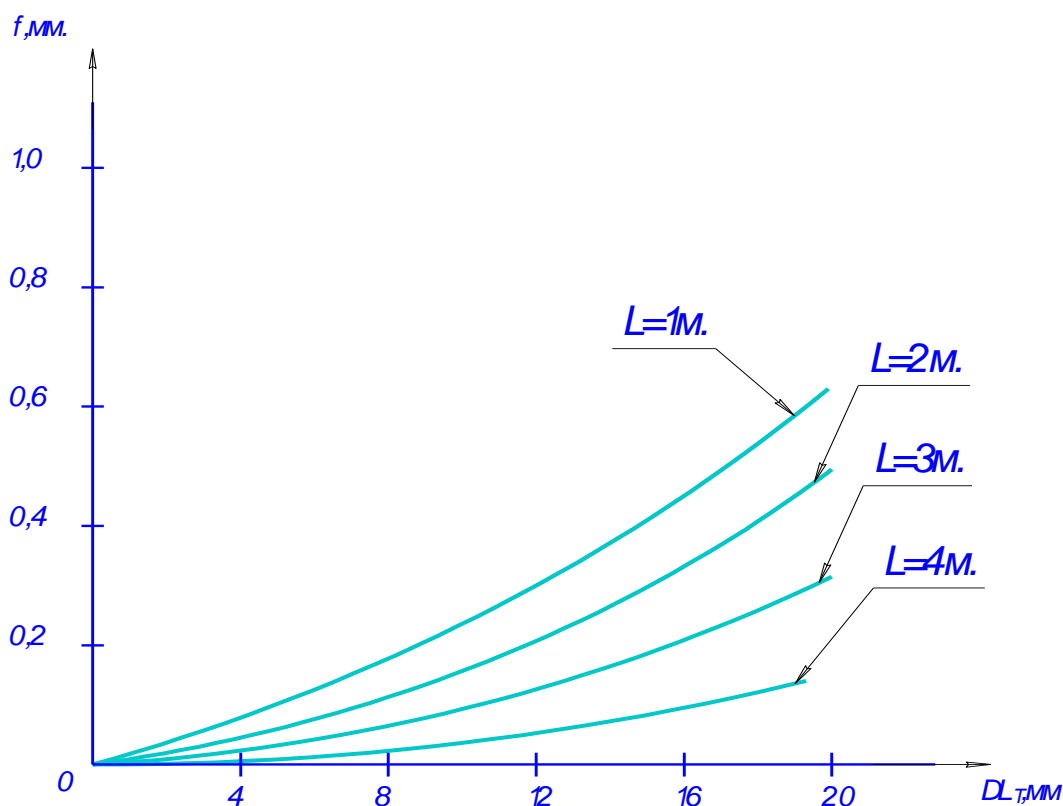


Рисунок 23 - Зависимость стрелы прогиба от удлинения

Аналитически эта зависимость описывается формулой (15):

$$\Delta L_T = \frac{\pi^2 f^2}{4L} \quad (15)$$

Необходимое осевое усилие зависит от материала детали, ее геометрических размеров и относительного удлинения.

Графически эта зависимость показана на рисунке 24, а аналитически выражается следующей формулой (16):

$$P = \frac{E \cdot F \cdot \Delta L}{L} \quad (16)$$

где  $E$  – модуль упругости материала детали;

$F$  – площадь поперечного сечения детали;

$\Delta L$  – относительное удлинение;

$L$  – длина детали.

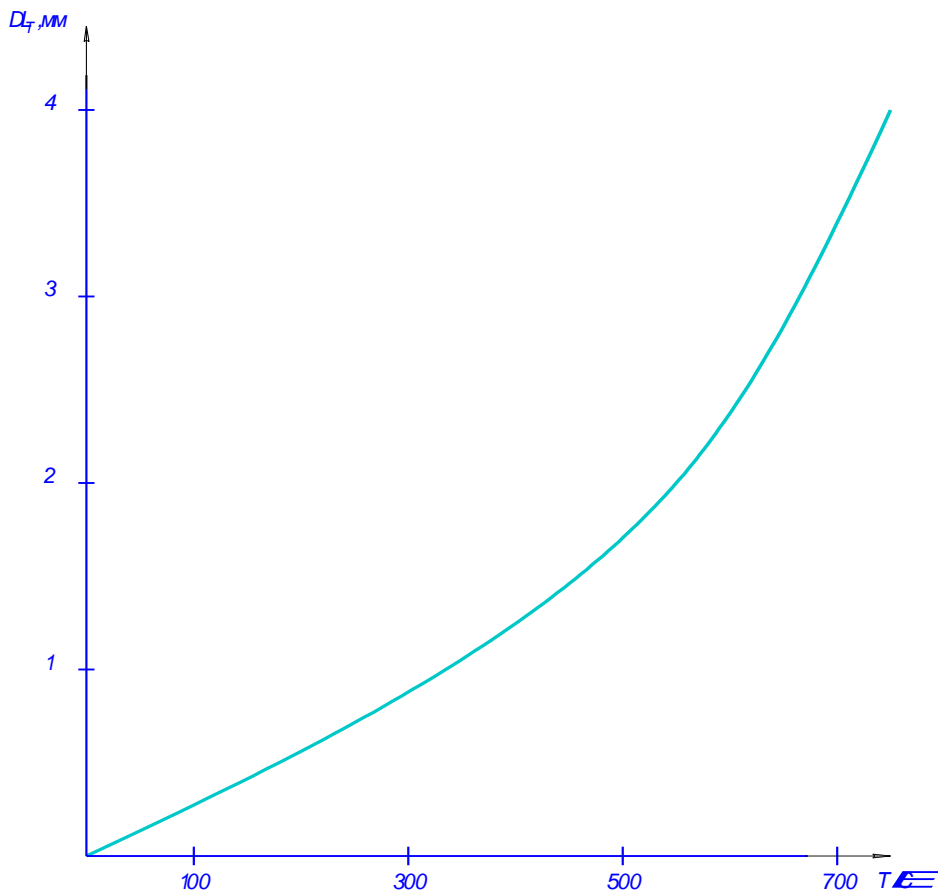


Рисунок 24 - Зависимость удлинения от температуры

Относительное удлинение зависит от температуры, эта зависимость показана на рисунке 25. Аналитически эта зависимость выражена следующей формулой (17):

$$\Delta L_{CT} = \alpha_{CT} \cdot \Delta T \cdot L_{CT} - \alpha_{oem} \cdot \Delta T \cdot L_{oem} \quad (17)$$

где  $\alpha_{CT}$  – коэффициент линейного расширения стапеля;

$\alpha_{дет}$  – коэффициент линейного расширения детали;

$\Delta T = (T - T_{нач})$  – разница между температурой обработки и начальной температурой детали;

$L_{ст}$  и  $L_{д}$  – длина стапеля и детали соответственно.

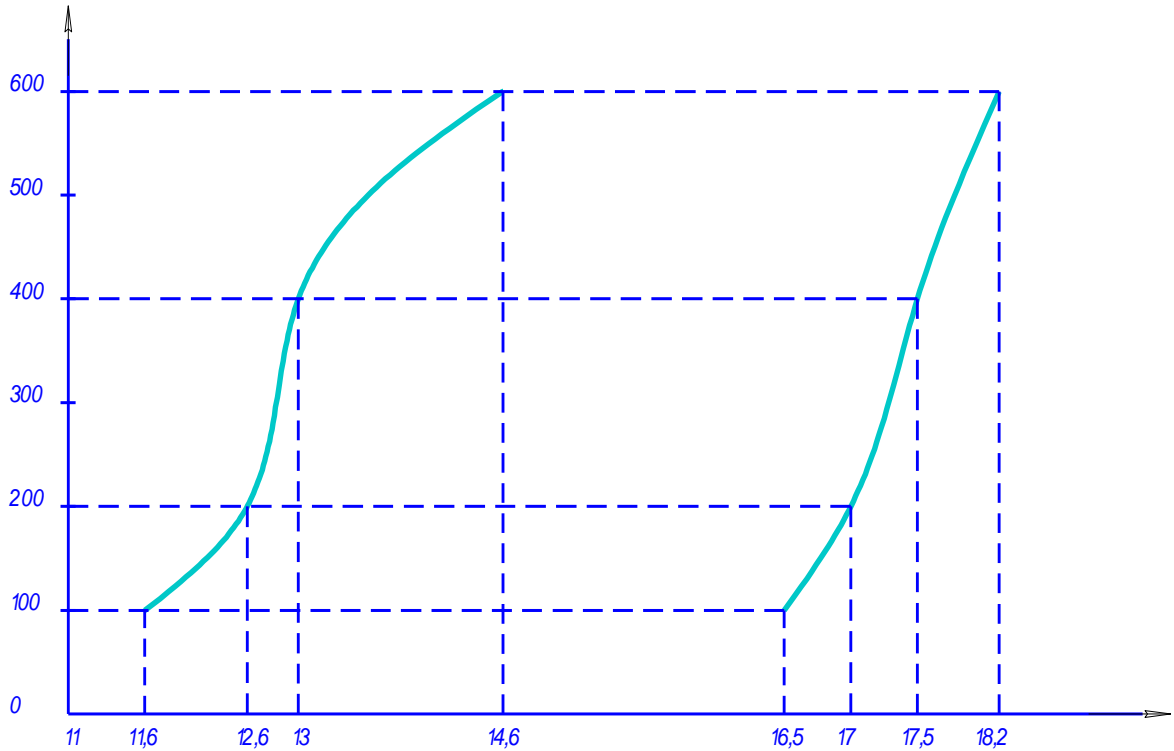


Рисунок 25 - Зависимость коэффициента линейного расширения от температуры

Если смотреть более широко, то относительное удлинение является суммой удлинений по формуле (18):

$$\Delta_{\Sigma} L = (\Delta_{г} L + \Delta_{Т} L + \Delta_{0,2} L + \Delta_{унр} L) \cdot K_1 \quad (18)$$

где  $\Delta L$  – удлинение, вызванное начальной кривизной вала;

$\Delta_{Т} L$  – удлинение, вызванное различием коэффициентов теплового расширения материалов детали и стапеля;

$\Delta_{0,2}$  – удлинение, соответствующее условному пределу пропорциональности при  $T=20^{\circ}\text{C}$ ;

$\Delta_{упр}$  – удлинение, соответствующее относительному удлинению детали 2% от L (0.02L).

Для расчета коэффициента учитывающего сжатие стапеля воспользуемся зависимостью (19), приведенной ниже:

$$K_1 = \frac{F_D + F_{стан}}{F_{стан}} \quad (19)$$

где  $K_1$  – коэффициент учитывающий сжатие стапеля (если  $F_{стан}=5F_D$ , то  $K_1=1.2$ ).

Таким образом, способ управления процессом пластической деформации маложестких деталей типа – «Вал» осуществляется следующим образом.

Заготовку 1 устанавливают в шахтную печь, предварительно закрепляя в стапель 2, концы жестко фиксируются зажимами и нагревают до температуры, обеспечивающей создание заданных физико-механических свойств заготовки (рисунки 19-25).

При термомеханической обработке вала в стапель его суммарное удлинение должно быть таким, чтобы остаточное удлинение вала относительно стапеля при  $t=20^\circ\text{C}$  составляло 2% от длины вала. Фиксацию величины температурного удлинения  $\Delta L$  вала относительно стапеля, которая позволяет достичь пластического состояния материала заготовки, и тем самым уничтожить техническую наследственность, возможно, осуществить, подобрав такие режимы охлаждения конструкции, при котором время охлаждения заготовки и время охлаждения стапеля относилась бы как показано в формуле (20).

$$\frac{\tau_{стан}}{\tau_{вала}} \approx 20 \quad (20)$$

Таким образом, за счет анализа сущностей процессов при ТСО разработана технически обоснованная технология ее проведения.

### 2.3 Технология и методика проведения испытаний ТСО

Перед началом испытаний при ТСО необходимо на заготовке-вале нарезать по длине риски через каждые 10 мм. Для этого устанавливаем заготовку на токарный станок и базируем аналогично токарной обработке. Далее алмазным резцом с подачей 10 мм/об нарезаются риски по всей длине заготовки, причем ширина риски не должна превышать 0,5 мм, а глубина риски должна находиться в пределах 0,25-0,5 мм. После этого производится измерение расстояний между соседними рисками по всей длине детали по трем линиям на поверхности детали, которые в поперечном сечении отстоят друг от друга на  $120^{\circ}$ , см рис.1, а также диаметра заготовки в интервалах между рисками и радиального биения по всей длине детали. По результатам измерений строят гистограмму и пространственную модель состояния заготовки до ТСО, а также определяют возможную величину стрелы прогиба.

Итак, на первом этапе ТСО необходимо придать заготовке требуемое значение осевого растягивающего усилия, которое зависит от материала заготовки, ее геометрических параметров и температуры при которой происходит ТСО. Аналитически усилие при ТСО определяется выражением (21):

$$P = (E \cdot F \cdot (\alpha_{тр} \cdot L_{тр} - \alpha_{в} \cdot L_{в}) \Delta T) / L = E \cdot F \cdot \Delta L / L \quad (21)$$

где  $E$  – модуль нормальной упругости материала заготовки;

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

$L_{тр}$  – длина трубы, мм;

$L_{в}$  – длина вала, мм;

$\alpha_{тр}$  - коэффициент линейного расширения трубы,  $10^{-6} \text{ 1/}^{\circ}\text{C}$ ;

$\alpha_b$  - коэффициент линейного расширения вала,  $10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ ;

$\Delta T$  – разность начальной и конечной температур ТСО,  $^\circ\text{C}$ .

Однако, значение силы  $P$  имеет следующие ограничения:

- рабочие напряжения, создаваемые силой  $P$  не должны превышать предела прочности материала заготовки при заданной температуре ТСО;

-  $\sigma_p = P / F \leq \sigma_b$  - рабочие напряжения, создаваемые силой  $P$  должны превышать предел текучести  $\sigma_T$  материала, для достижения необходимого эффекта при ТСО.

Так как, в формуле (22) величины  $E$ ,  $F$ ,  $L$ ,  $T$  являются постоянными для данной заготовки и данного вида термообработки, то регулировка осевого усилия  $P$ , для попадания рабочего усилия от действия силы  $P$  в интервал  $\sigma_T \leq \sigma_p \leq \sigma_b$ , осуществляется параметром  $\Delta L$ , путем оставления зазора между гайкой-сферой 5 и зажимной гайкой 4 (см. сборочный чертеж установки для ТСО). Величина зазора оказывает влияние на параметр  $\Delta L$ , а тот в свою очередь на величину осевого усилия  $P$ .

$$P = E \cdot F \cdot (\Delta L - s) / L = E \cdot F \cdot \Delta L_s / L \quad (22)$$

где  $s$ - величина зазора, мм;

$\Delta L_s$ - относительное удлинение с учетом зазора, мм.

После установки необходимой величины зазора, устройство для ТСО вместе с заготовкой помещается в печь, нагревается и выдерживается согласно заданным режимам термообработки. Здесь оканчивается этап силового нагружения и производится этап выстоя заготовки при заданных режимах термообработки, под действием осевого растягивающего усилия.

На этом этапе также важно проверить устойчивость стапеля к нагрузкам. Численное значение величины сжимающего усилия определяется по формуле (23):

$$P_{сж} = E \cdot F \cdot \Delta L / L = E \cdot F \cdot (\alpha_{ТР} \cdot L_{ТР} \cdot \Delta T_{ТР} - \alpha_{В} \cdot L_{В} \cdot \Delta T_{В}) / L \quad (23)$$

Критическое усилие для данного сечения труб определяется по формуле (24) Эйлера:

$$P_{кр} = \pi \cdot E \cdot L_{мин} / L = \pi^2 \times E \cdot (d_{max} - d_{мин}) / 64 L^2 \times 2 \quad (24)$$

где  $E$  - модуль нормальной упругости материала заготовки;

$L$  - длина трубы, мм;

$I_{мин}$  – минимальный радиус инерции сечения, мм<sup>4</sup>;

$d_{max}, d_{мин}$  - максимальный и минимальный диаметр трубы

соответственно, мм;

$\times 2$  – коэффициент показывающий, что в данном случае сжимающее усилие действует одновременно на две трубы.

Если  $P_{кр} > P_{сж}$ , то это означает, что трубы выдержат сжимающую нагрузку, а если  $P_{кр} < P_{сж}$ , то это означает, что трубы не выдержат сжимающую нагрузку и потеряют устойчивость, в этом случае необходимо либо пересмотреть режимы термообработки, либо увеличить зазор в соединении между гайкой-сферой и зажимной гайкой. Если ни один из вариантов не приемлем, то следует увеличить сечение труб, либо отказаться от проведения ТСО данной детали.

После окончания ТСО при закалке, не разбирая конструкции, проводят ТСО при отпуске, которая производится аналогично ТСО при закалке, причем никаких дополнительных проверочных расчетов не требуется.

После окончания ТСО и разборки конструкции производится измерение расстояний между соседними рисками по всей длине детали по трем линиям на поверхности детали, которые в поперечном сечении отстоят друг от друга на  $120^\circ$ , а также диаметра заготовки в интервалах между рисками и радиального биения по всей длине детали. По результатам



измерений строят гистограмму и пространственную модель состояния заготовки до ТСО, позволяющую судить об уровне и равномерности распределения остаточных напряжений в материале обработанной детали. Затем сравниваются результаты измерений до и после ТСО, и делаются соответствующие выводы. Измерения целесообразно проводить 3-5 раз с интервалом 12-24 часа, с целью отследить изменение формы детали с течением времени.

Заготовка для образца устанавливается на токарном станке 1М63 РМЦ-5м в самоцентрирующих роликовых люнетах, расположенных через каждые 600 мм по длине заготовки, и поводковом патроне. Первым переходом для изготовления образцов является точение канавок для измерения длин интервалов, на которые разбивается образец при точении данных канавок. Точение канавок осуществляется канавочным резцом. Глубина канавки – 2-2,5 мм, ширина канавки – 3-4 мм. Первая канавка должна быть удалена от торца образца на 250 мм, расстояние между канавками 300 мм, количество канавок – 10 шт. Вторым переходом для изготовления образцов является точение наружной поверхности заготовки, с целью уменьшения исходной кривизны на глубину 1,5 мм, кроме участков, отстоящих от торцов менее чем на 75 мм. При обработке образцов на токарном станке особое внимание следует уделять мерам предосторожности против возможного изменения свойств материала, вследствие нагрева, наклепа и деформации, возникающих в процессе механической обработки. Для минимизации возможности изменения свойств материала необходимо производить обработку образцов на так называемых щадящих режимах, т.е. режимах механической обработки, которые имеют минимальные температуру и усилия резания ( $n = 40$  об/мин).

Далее образцы отправляют на измерения, подробно об измерениях будет сказано ниже.

После проведения измерений готовые образцы подвергают ТСО, в шахтной печи, в специально созданном для этого приспособлении, после чего образцы вновь возвращаются на измерения.

Шести образцам, подвергаемым ТСО придаваем величину осевой деформации, соответствующую зоне оптимальных значений, трем величину осевого усилия менее условного предела текучести, а остальным трем величину осевого усилия более 0,85 Рв.

Продолжительность нагрева до температуры испытания и время выдержки при заданной температуре принимаем, указанную в стандартах или технических условиях на металлопродукцию. Отклонения от условленной заданной температуры испытания не должны превышать при температуре нагрева:

- до 600°С ±3°С;
- от 600 до 900°С±4°С;
- от 900 до 1200°С +6°С.

Измерение каждого из образцов производится два раза – до и после термообработки, с целью установления влияния термосиловой обработки на геометрическую точность образцов, и значения осевого усилия на геометрическую точность образцов. Оба раза измеряются следующие параметры:

- не прямолинейность оси образца;
- равномерность удлинения.

Порядок проведения измерений не прямолинейности оси образца. Образец устанавливают на поверочную плиту, которая лежит на направляющих станка, рисккой «0» вертикально вверх; индикатор часового типа, закрепленный на продольном суппорте станка, с помощью суппорта отводят на 100 мм от торца образца и выставляют на «0»; передвигая суппорт с шагом 100 мм, снимаем показания индикатора;

Порядок проведения измерений равномерности удлинения:

- образец устанавливают на поверочную плиту, которая лежит на направляющих станка, рисккой 0 вертикально вверх;

- штангенциркулем ШЦ-1 измеряют расстояние между соседними канавками;
- устанавливают заготовку риски 90 вертикально и штангенциркулем ШЦ-1 измеряют расстояние между соседними канавками и т.д;
- после того, как образец промерен полностью, снимаем его с поверочной плиты, а результаты измерений заносятся в протокол испытаний.

Образцы для проведения испытаний изготавливаются аналогично образцам для проведения испытаний, устанавливающих влияние различных видов ТСО на равномерность распределения внутренних напряжений. Требования к температуре при ТСО те же.

Количество таких прутков, необходимых для проведения испытаний – 9 шт. Прутки подбираются из одного и того же материала, из одной партии заготовок. Материал, из которого изготовлен пруток, должен иметь коэффициент линейного расширения на 30-40% меньше, чем коэффициент линейного расширения стали 12Х18Н10Т

Заготовка для образца устанавливается на токарном станке 1К62 в трехкулачковом самоцентрирующем патроне, и поджимают задним центром. Первым переходом для изготовления образцов является точение канавок для измерения длин интервалов, на которые разбивается образец при точении данных канавок. Точение канавок осуществляется канавочным резцом.

Глубина канавки – 1-1,5 мм, ширина канавки – 2 мм. Первая канавка должна быть удалена от торца образца на 100 мм, расстояние между канавками 20 мм, количество канавок – 14 шт. Вторым переходом для изготовления образцов является точение наружной поверхности заготовки, с целью уменьшения исходной кривизны на глубину 1 мм, кроме участков отстоящих от торцов менее чем не 95 мм. При обработке образцов на токарном станке особое внимание следует уделять мерам предосторожности против возможного изменения свойств материала, вследствие нагрева, наклепа и деформации, возникающих в процессе механической обработки.

Для минимизации возможности изменения свойств материала необходимо производить обработку образцов на так называемых щадящих режимах, т.е. режимах механической обработки, которые имеют минимальные температуру и усилия резания ( $n = 40$  об/мин).

Далее на образцах нарезается с обоих концов резьба М 13, длиной 95 мм.

Маркировка образцов производится с торца термостойкой краской после окончания обработки образца на токарном станке, причем маркировка содержит две цифры - арабскую и римскую. Арабская цифра означает номер образца данного типа, а римская обозначает тип образца. Существуют образцы четырех типов – I, II, III, IV.

Образцы I типа подвергаются обычной ТСО, то есть в процессе обработки на них действует только осевое усилие. Образцы II подвергаются ТСО со скручивающим моментом, то есть в процессе обработки кроме осевого усилия на этапе выстоя действует скручивающий момент. Образцы III типа подвергаются термовибрационной обработке, то есть в процессе обработки кроме осевого усилия на этапе разгрузки на деталь в продольном направлении воздействуют периодически изменяющейся нагрузкой, в виде удара по торцу образца. Образцы IV типа подвергаются такой ТСО, при которой в процессе обработки кроме осевого усилия на этапе выстоя действует скручивающий момент, а на этапе разгрузки на деталь в продольном направлении воздействуют периодически изменяющейся нагрузкой, в виде удара по торцу образца.

На не маркированном торце кернером наносятся риски через  $90^\circ$  в сечении, и маркируются соответственно 0, 90, 180, 270. При транспортировке, измерении и т.д. необходимо предохранять образцы от ударов и воздействия температуры.

Далее готовые образцы подвергают ТСО, в специально созданной для этого установке, устройство и принцип работы которой описаны в главе 3 данной работы.

Продолжительность нагрева до температуры испытания 30 мин, а время выдержки при заданной температуре (650°C) принимаем 10 мин, продолжительность остывания или разгрузки 2,5 часа. Отклонения от условленной заданной температуры испытания не должны превышать: 650°C  $\pm$ 3°C. Контроль температуры осуществляется посредством термопары и вольтметра аналогового типа.

После проведения ТСО производятся измерения образцов, измеряются следующие параметры: не прямолинейность оси образца; равномерность удлинения. Порядок проведения измерений не прямолинейности оси образца и порядок проведения измерений равномерности удлинения описаны подробно в предыдущем разделе. Однако такие методы измерений имеют значительные погрешности и не дают полного представления о характере распределения внутренних напряжений в материале образца, поэтому в данном случае будем использовать метод разрушающего контроля – электрохимическая обработка (травление). Суть метода состоит в том, что образец помещается в ванну с соляным раствором, где под действием электрического тока происходит удаление слоя материала (стравливание), величиной 0,5 мм, причем часть поверхности образца (база для будущих измерений), покрывается специальным лаком, предохраняющем от стравливания. После окончания травления образца его вынимают из соляной ванны и измеряют в специальном измерительном приспособлении, которое содержит стойку 1, с закрепленными на ней пятью кронштейнами 2 с индикаторами 3, и трехкулачкового самоцентрирующего патрона 4, жестко закрепленного в верхней части «Г» - образной стойки. Измеряемый образец устанавливают в патрон 4 и зажимают, причем продольная ось образца занимает вертикальное положение, что исключает прогиб измеряемого образца, вследствие действия силы тяжести, далее подводят кронштейны 2 с индикаторами часового типа 3 до контакта с поверхностью образца, и устанавливают на индикаторах «0». После этого оставляют в таком положении на 6 часов, снимая через каждые 2 часа показания с индикаторов.

Так как травление разрушило внутреннее равновесное состояние, то в это время будет происходить перераспределение внутренних напряжений, а, следовательно, изменится геометрическая форма образца, что и будет зафиксировано индикаторами.

После окончания измерения снимаем образец и снова помещаем в соляную ванну, где производим травление, после чего повторяем измерения, описанные выше. Повторив данный цикл измерений 7-8 раз, последовательно стравливая слой за слоем, можно определить не только величину внутренних напряжений в материале образца после ТСО того или иного вида, но и определить неравномерность распределения данных напряжений по длине и поперечному сечению образца.

Установка для ТВО с комплексными колебаниями (рисунок 26) содержит корпус 1 в виде трубы, крышки 2, установленные на наружной поверхности заготовки 3, относительно торцов корпуса 1, зафиксированные гайками 4, навинченными на резьбовую часть заготовки 3, нагревательный элемент 5 в виде спирали, установленный на наружной поверхности корпуса 1, волновод 6, жестко закрепленный с заготовкой 3, устройство возбуждения колебаний 7.

Решение в критериальной форме имеет следующий вид (25):

$$\frac{\mathcal{G}}{\mathcal{G}_0} = f(B_i; F_0; \frac{x}{X}) \quad (25)$$

где  $\frac{\mathcal{G}}{\mathcal{G}_0} = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_{2H}}$  температурный критерий ( $t_1$  — температура печи,

°С;

$t_{2H}$  — начальная температура изделия, °С;

$t_2$  — температура в данной точке изделия в рассматриваемый момент времени, °С);

$$B_i = \frac{\alpha}{\lambda} X \text{ — критерий Био;}$$

$$F_0 = \frac{a_\tau}{X^2} \text{ — критерий Фурье;}$$

$a$  — коэффициент теплопроводности изделия, м<sup>2</sup>/сек;  $\tau$  — время, сек);

$\frac{x}{X}$  — геометрический критерий, определяющий местоположение рассматриваемой точки в изделии ( $x$  — координата точки;  $X$  — характерный геометрический размер изделия, м).

Цилиндр конечных размеров как тело, образованное пересечением бесконечно длинного цилиндра и неограниченной пластины приведен на рисунке 26.

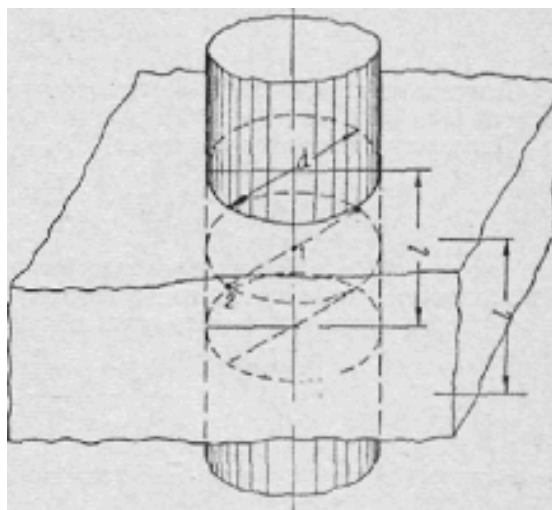


Рисунок 26 – Модель бесконечного цилиндра

В таком случае температурный критерий для центра короткого цилиндра (точка 1) равен

$$\frac{\vartheta_1}{\vartheta_0} = \left( \frac{\vartheta_{Ц}}{\vartheta_0} \right)_{ЦИЛ} \cdot \left( \frac{\vartheta_{Ц}}{\vartheta_0} \right)_{ПЛ} \quad (26)$$

Так как точка 1 лежит на оси бесконечного цилиндра и на средней плоскости неограниченной пластины. Температурный критерий для точки 2, лежащей на поверхности цилиндра в середине его длины, равен по формуле (27):

$$\frac{\vartheta_2}{\vartheta_0} = \left( \frac{\vartheta_{Ц}}{\vartheta_0} \right)_{ЦИЛ} \cdot \left( \frac{\vartheta_{Ц}}{\vartheta_0} \right)_{ПЛ} \quad (27)$$

Параллелепипед длиной  $\delta_1$  шириной  $\delta_2$  и высотой  $\delta_3$  можно рассматривать как тело, образованное пересечением трех взаимно перпендикулярных пластин бесконечной протяженности и толщиной соответственно  $\delta_1$   $\delta_2$   $\delta_3$ . Тогда температурный критерий для центра параллелепипеда равен по формуле (28):

$$\frac{\vartheta_{Ц}}{\vartheta_0} = \left( \frac{\vartheta_{Ц}}{\vartheta_0} \right)_{ПЛ1} \cdot \left( \frac{\vartheta_{Ц}}{\vartheta_0} \right)_{ПЛ2} \cdot \left( \frac{\vartheta_{Ц}}{\vartheta_0} \right)_{ПЛ2} \quad (28)$$

Для тел второго класса, тогда

$$A_2 = \frac{P}{\sqrt{4\pi F_{сеч}}} \quad (29)$$

где  $P$  – длина периметра поперечного сечения рассматриваемого изделия, м.

Критерий формы вводится в состав расчётных формул как множитель к коэффициенту теплоотдачи.



По величине относительного удлинения можно судить о потенциальной энергии деформации коробления по формуле (30):

$$I_{mco} = \frac{\Delta L^2 E}{2L^2} = \sigma, \quad (30)$$

Поэтому величину можно считать критерием точности ТСО, а влияние приведенных ниже факторов оцениваются с точки зрения влияния их на ту величину.

Приводим аналитическую зависимость влияния осевого растягивающего усилия на относительное удлинение, которое описывается следующим уравнением (31):

$$\Delta L = \frac{PL}{EF} \quad (31)$$

Запишем уравнение Фурье в несколько ином виде (32):

$$F = \frac{\tau \alpha}{F_0 \pi} \quad (32)$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения,  $m^2$ ;

$\tau$  - время охлаждения;

$\alpha$  – коэффициент теплопроводности;

$F_0$  – критерий Фурье

Известно, что  $P = \frac{EF\Delta L}{L}$ , выразив отсюда площадь, имеет вид (33):

$$F = \frac{PL}{E\Delta L} \quad (33)$$

Решения совместно (32) и (33) получаем следующие уравнения (34):

$$\frac{\tau a}{F_0 \pi} = \frac{PL}{E \Delta L} \quad (34)$$

Решая данное уравнение относительно величины  $\Delta L$  получим (35):

$$\Delta L = \frac{\pi PL F_0}{E \tau a} \quad (35)$$

Таким образом, можно утверждать, что удлинение вала есть функция его геометрических и физикомеханических параметров, а также величины внешней нагрузки.

#### **2.4 Разработка системы автоматического управления термосиловой обработки со скручивающим моментом и с комплексными колебаниями**

Задача данного раздела – разработать такую систему автоматического управления, которая бы позволяла наблюдать за процессами, происходящими с физико-механическими свойствами материала детали и управлять режимами температур и их показателями по ходу проведения термосиловой обработки.

Таким образом, основываясь на гипотезе плоских сечений при кручении круглых стержней, предусматривающей сохранение прямых радиусов сечения до и после деформации вала, легко перейти к выводу линейной зависимости касательных напряжений в сечении от радиуса.

Для доказательства сказанного рассмотрим некоторый участок вала длиной  $dz$  (рисунок 27), выделенный из скручиваемого вала. Пусть угол поворота одного из сечений  $m-m$  выделенного элемента вала будет  $\varphi$ , тогда угол поворота другого концевое сечения  $n-n$  элементарного участка  $dz$  будет  $\varphi+d\varphi$ , то есть угол закручивания участка стержня  $dz$  будет  $d\varphi$ . Следовательно, если до деформации радиус  $Oa$  сечения  $m-m$  имел угол с радиусом  $O'b$  сечения  $n-n$ , равный нулю, то есть эти радиусы находились в одной диаметральной плоскости, то после деформации кручения радиус  $O'b$  займет положение  $O'b'$ , составляющие угол  $d\varphi$  с его положением до деформации  $O'b$ , а следовательно, и с радиусом  $Oa$  сечения  $m-m$ . В то же время образующая  $ab'$  после деформации займет некоторое новое положение под углом  $\gamma$  по отношению к ее первоначальному положению  $ab$  до приложения внешнего скручивающего момента. Если наблюдать за поведением не одной из образующих, а предположим, двух –  $ab$  и  $cd$ , то очевидно наблюдаемые искажения формы рассматриваемого элементарного объема материала, являются типичными случаями деформаций, происходящие при сдвиге, то есть рассматриваемый элемент будет находится в условиях, когда по его четырем граням будут действовать касательные напряжения, имеющие направления, которые обеспечивают условия равновесия.

В силу выше сказанного выше упомянутый угол  $\gamma$  соответственно до и после деформации вала представляет собой не что иное как относительный сдвиг или угол сдвига, а частная производная  $d\varphi/dz$  представляет собой относительный угол закручивания  $\theta$ .

Рассматривая физическую сторону задачи, устанавливающую связь между напряжением и деформацией. Поскольку в случае кручения мы имеем дело с деформациями сдвига, то согласно закону Гука при сдвиге  $\tau = \gamma \times G$ .

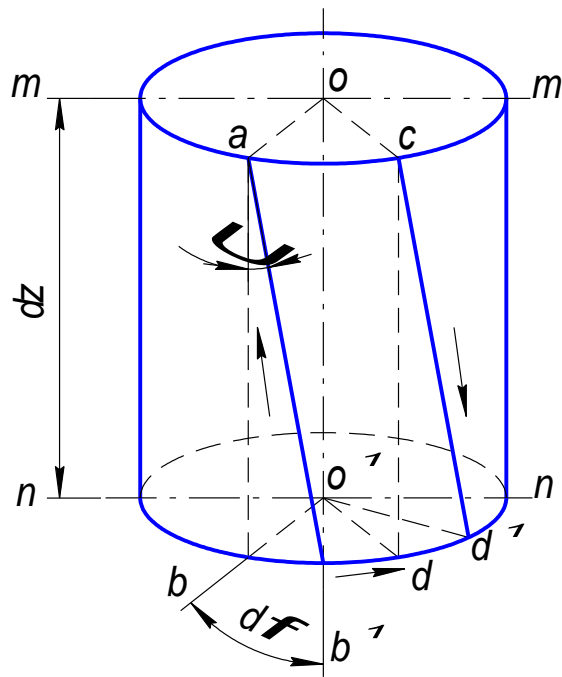


Рисунок 27 – Схема деформации

Дифференциальное уравнение звена САУ от действия касательных напряжений и угла закручивания в общем виде запишем как (36):

$$a_0\tau + a_1d\tau/dt + \dots + a_n d_n\tau/dt = b_0\theta + b_1d\theta/dt + \dots + b_n d_n\theta/dt, \quad (36)$$

где  $\theta$  – входная величина звена (в отклонениях от состояния равновесия);

$\tau$  – выходная величина звена (в отклонениях от состояния равновесия);

$a_0, a_1, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_n$  – постоянные коэффициенты, определяемые конструктивными особенностями и параметрами звена

Дифференциальное уравнение звена САУ от действия касательных напряжений и деформации полученной от скручивающего момента вала в общем виде запишем как (37):

$$a_0\tau + a_1d\tau/dt + \dots + a_nd_n\tau/dt = b_0\varepsilon + b_1d\varepsilon/dt + \dots + b_nd_n\varepsilon/dt, \quad (37)$$

где  $\tau$  – входная величина звена (в отклонениях от состояния равновесия);

$\varepsilon$  – выходная величина звена (в отклонениях от состояния равновесия);

$a_0, a_1, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_n$  – постоянные коэффициенты, определяемые конструктивными особенностями и параметрами звена.

Так как аналитическое решение дифференциальных уравнений (36) и (37) в общем случае является трудоемкой задачей, то согласно современной теории управления широко используются средства описания динамических свойств системы через преобразования Лапласа, что удобнее для практического применения. Основанием такого подхода служит то обстоятельство, что такое преобразование существенно облегчает исследование сложных систем, заменяя дифференциальные уравнения алгебраическими. В частности при решении дифференциальных уравнений систем преобразование Лапласа позволяет легко учитывать начальные условия и избежать сложных выкладок, связанных с вычислением постоянных интегрирования. Достаточно просто решаются также неоднородные уравнения, позволяющие учитывать влияние возмущений на динамику процессов.

Используя преобразование Лапласа нетрудно заметить, что формально переход от дифференциального уравнения к алгебраическому операторному уравнению при нулевых начальных условиях получают путем замены символов дифференцирования оригиналов функций  $d\tau/dt$ ,  $d\theta/dt$  или  $d\varepsilon/dt$ , соответственно символами  $p^n$ ,  $p^{n-1}$ , ...,  $p$  и функциями описывающим динамику процессов – их изображениями  $u(p)$  или  $x(p)$ .

Используя преобразование Лапласа перепишем уравнения (36 и 37) в алгебраической форме (38):

$$(a_0 + a_1p + \dots + a_np_n) y(p) = (b_0 + b_1p + \dots + b_np_n) x(p) \quad (38)$$

Определив из уравнения (38) отношение изображения выходной величины к изображению его входной получим зависимость (39):

$$y(p)/x(p) = (b_0 + b_1p + \dots + b_np_n) / (a_0 + a_1p + \dots + a_np_n) = W(p), \quad (39)$$

Отношение  $W(p)$  изображения выходной величины системы к изображению его входной величины называют передаточной функцией системы. Приведем полученную величину передаточной функции к стандартному виду учитывая постоянные времени и передаточные коэффициенты. Для элементов, описываемых уравнениями первого и второго порядка, введем классификации звеньев на основе вида и порядка оператора, тогда получим (40):

$$y(p)/x(p) = K_1 (1 + T_2p + T_m p_m) / (1 + T_1p + T_n/p_n) = W(p), \quad (40)$$

Используя преобразования, рассмотренные в формуле (40) составим уравнения элементов объекта управления для обобщенного закона Гука при сдвиге вала от действия деформации кручения и построим механическую модель «n» - ого элемента обрабатываемой детали со скручивающим моментом (рисунок 28).

Сложность описания термосиливой обработки с применением скручивающего момента, как объекта управления состоит в том, что величина деформации в продольном сечении не постоянна. Данную зависимость в первом приближении можно принять как линейную. Тогда для случая круглого консольно закрепленного вала, величина деформации в продольном сечении вала будет возрастать от нуля, вместе жесткой заделки, до максимума в месте приложения скручивающего момента на другом конце вала по линейному закону. Поэтому при проведении данного метода ТСО, с

целью недопущения возникновения неравномерного распределения уровня внутренних напряжений от действия скручивающего момента, следует принять следующую схему проведения процесса ТСО со скручивающим моментом.

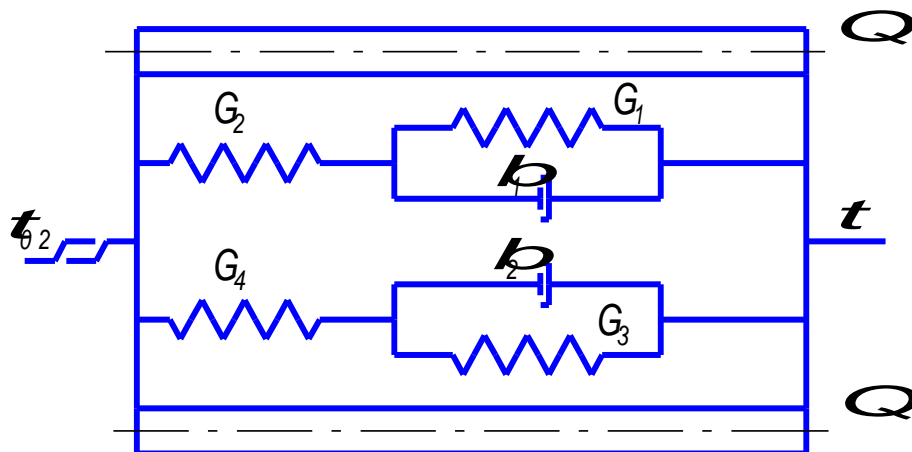


Рисунок 28 - Механическая модель объекта управления «n» - ого элемента обрабатываемой детали со скручивающим моментом

Производить скручивание вала на определенный угол  $\theta$  с одного из концов вала, затем на равный ему по величине и направлению угол с другого конца вала, а затем приложить такие же равные углы закручивания  $\theta$ , но в противоположном направлении как в первом случае скручивании вала.

Влияние температуры и скорости деформации при ТСО со скручивающим моментом имеют различия состоящие в том, что упругие характеристики  $E$ ,  $G$  не зависят от скорости, но зависят от температуры деформации; изменение температуры (особенно повышение ее) нередко вызывает наложение на чисто механические факторы физико-химических процессов, как происходящих внутри самого металла, так и обусловленных взаимодействием металла с окружающей его средой.

Тогда используя преобразования Лапласа, получим следующие передаточные функции (41) и построим преобразованную структурную

схему системы автоматического управления термосиловой обработки со скручивающим моментом (рисунок 29):

$$\begin{aligned}
 W_0(S) &= \theta_0(S)/\tau(S) = K(1+T_2S)/(1+T_1S), \\
 W_1(S) &= \theta_1(S)/\tau(S) = K(1+T_2S)/(1+T_1S), \\
 W_2(S) &= \theta_1(S)/\tau(S) = K(1+T_2S)/(1+T_1S), \\
 W_3(S) &= \theta_1(S)/\tau(S) = K(1+T_2S)/(1+T_1S), \\
 W_4(S) &= \theta_1(S)/\tau(S) = K(1+T_2S)/(1+T_1S),
 \end{aligned}
 \tag{41}$$

где  $T_1 = \beta/G_1$ ;  $T_2 = \beta/G_1 * G_2$

$\beta$  – коэффициент, учитывающий вязкость материала;

$K$  – коэффициент усиления определяемый как  $K = G_1 + G_2 / G_1 G_2$ ;

Блок управления 39 подает сигнал на выход дифференциального усилителя 33 из нижней цепи, которой усиливаясь включает в работу привод реверсивный электропривод 32 исполнительного механизма 50 – червячного редуктора. Червячный редуктор создает скручивающий момент, путем поворота нижнего конца консольного закрепления изделия вокруг своей оси на угол  $\theta$ . Измеритель величины угла поворота 34 фиксирует значение угла поворота и подает на один из входов сумматора 36. Задатчик величины угла закручивания 35 подает сигнал соответствующий оптимальному значению угла закручивания на второй вход сумматора 36. Сумматор 36 формирует сигнал рассогласования и подает его на вход дифференциального усилителя 33, который через привод 32 и исполнительный механизм 50 изменяет величину угла закручивания.

Если сигнал рассогласования равен нулю, то с сумматора подается соответствующий сигнал на вход блока управления скручивающего момента 39, который через, определенный в соответствии с режимом ТСО, промежуток времени отключает нижнюю цепь и включает верхнюю.



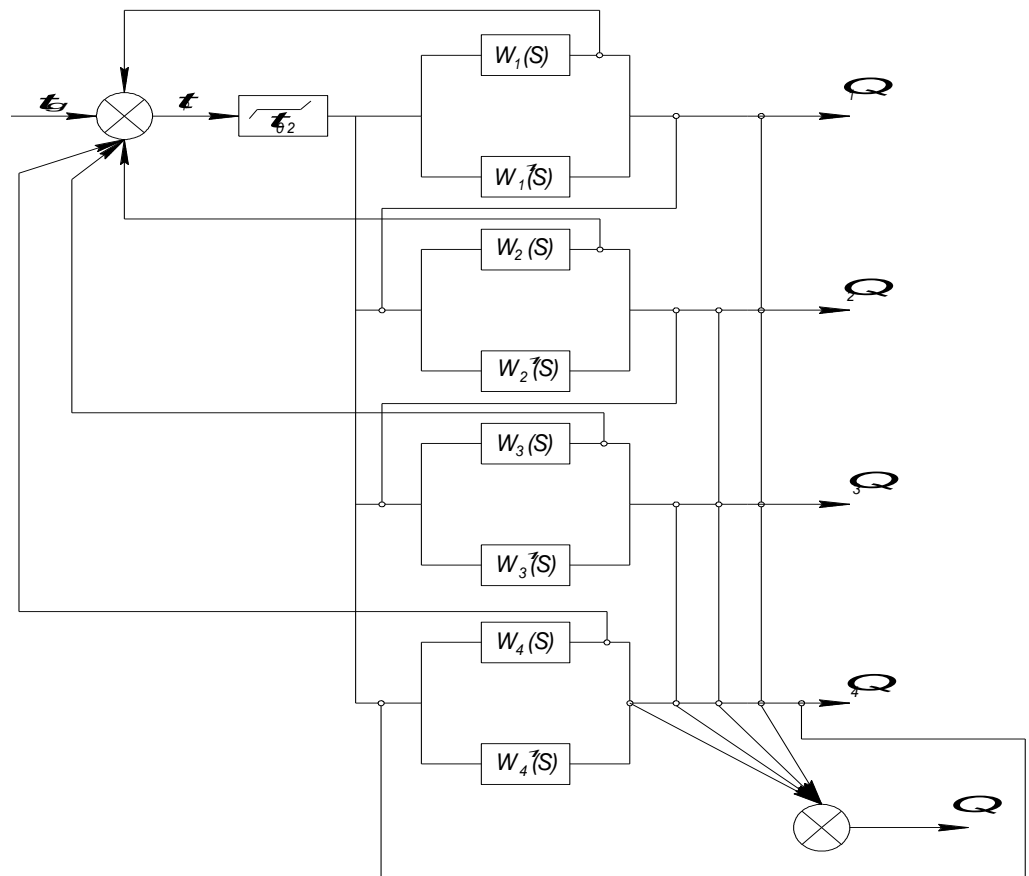


Рисунок 29 - Преобразованная структурная схема системы автоматического управления ТСО со скручивающим моментом

Верхняя цепь устроена идентично нижней и имеет тот же самый принцип работы направления скручивающего момента и величины угла закручивания создаваемые верхней цепью полностью совпадает с этими величинами, создаваемыми нижней цепью.

После проработки изделия верхней цепью, блок управления 39 отключает верхнюю цепь и снова включает нижнюю. Нижняя цепь в этом случае за счет реверсивного привода 32, создает равный по величине для первого случая скручивающий момент, но противоположный по направлению.

В принципе работы нижней цепи при этом ничего не изменяется, за исключением того, что сигнал рассогласования становится с противоположным знаком. После проработки изделия нижней цепью, блок

управления 39 отключает ее и снова включает верхнюю цепь, которая создает равный по величине, но противоположный по направлению скручивающий момент, скручивающему моменту в первом случае.

Описанные выше четыре фазы обработки составляют единый цикл обработки, который будет повторяться до тех пор пока с блока вида работ 8 не придет сигнал об отключении всей цепи, т.е. о окончании режима ТСО – выстоя.

При разработке системы автоматического управления ТСО с комплексными колебаниями воспользуемся механической моделью процесса ТСО с комплексными колебаниями. Механическая модель комплексных колебаний представляет собой одномассовую модель с двумя степенями свободы. Первая степень свободы – движения вдоль оси  $x$  – ( $\Delta x$ ) – обусловлены воздействием на деталь продольной составляющей комплексных колебаний. Вторая степень свободы – движение вокруг оси  $x$  на угол –  $\Theta$ , обусловлено воздействием на деталь крутильной составляющей комплексных колебаний. Математически данная модель описывается системой двух дифференциальных уравнений второго порядка, которые имеют следующий вид (42):

$$\begin{cases} S + \frac{\partial S}{\partial X} dx - S - pF dx \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = 0 \\ T + \frac{\partial T}{\partial X} dx - T - I_n dx \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = 0 \end{cases} \quad (42)$$

Первое уравнение описывает свободные колебания, второе крутильное. В первом уравнении величина  $u$  есть относительное перемещение по оси  $x$ :  $u = \Delta x$ .

Во втором уравнении величина  $\Theta$  угол поворота вокруг оси  $x$ . Данные величины будут иметь наибольшее значение в момент резонанса, т.е.  $u$  и  $\Delta x \rightarrow$  мах при резонансе по продольным колебаниям, а  $\Theta \rightarrow$  мах при резонансе

по крутильным колебаниям. Так как при комплексных колебаниях имеет место два резонанса, то условие резонанса напишется как:

Для продольных колебаний частота в условиях резонанса (43):

$$\omega_{\text{пр}} = i \times \pi \times \sqrt{\frac{E}{\rho}} / L, \quad (43)$$

Для крутильных колебаний частота в условиях резонанса (44):

$$\omega_{\text{кр}} = i \times \pi \times \sqrt{\frac{G}{\rho}} / L, \quad (44)$$

Термосиловую обработку с применением комплексных колебаний целесообразно проводить попеременно на резонансных режимах продольных и крутильных колебаний.

На режиме остывания при ТСО проводить уменьшение температуры под воздействием растягивающего усилия. Все это приводит к изменению частот собственных колебаний, и следовательно резонансные частоты смешиваются. Это связано со свойствами материала, при повышении температуры значение модулей упругости  $E$  и сдвига –  $G$  существенно снижаются, а так же с измерением геометрических параметров изделия, что обусловлено воздействием осевого растягивающего усилия  $L_1 = L + \Delta L$ . Величины  $\Delta L$  складывается из комплексного воздействия различных факторов, возникающих при ТСО. Ниже, в формуле (45) показана взаимосвязь данных факторов:

$$\left\{ \begin{array}{l} mx'' + \beta x' + kx = P \\ m\theta'' + \beta\theta' + k\theta = M_{кр} \\ \omega_{np} = i\pi \sqrt{\frac{E}{\rho}} / (L + \Delta L) \\ \omega_{кр} = i\pi \sqrt{\frac{G}{\rho}} / (L + \Delta L) \\ X = P \sin \omega_{np} t \\ \theta = M_{кр} \sin \omega_{кр} t \end{array} \right. , \quad (45)$$

Из выше сказанного ясно, что для управления данным процессом необходима система автоматического управления. Управляемыми параметрами служат: перемещение по оси  $x$  и угол поворота в системе координат  $x-\theta$ . В момент резонанса значения управляемых параметров будут иметь максимальные значения. Управляющими параметрами служат параметры вынужденных колебаний: амплитуды и частоты продольной и крутильной составляющих комплексных колебаний

Используя преобразования Лапласа, получим следующие передаточные функции, формула (46) и построим преобразованную структурную схему системы автоматического управления термосиловой обработки с комплексными колебаниями (рисунок 30):

$$\begin{aligned} W_1(S) &= x(S)/P(S) = K_2/(T_1^2 S^2 + T_2 S + 1), \\ W_2(S) &= \theta(S)/M_{кр}(S) = K_3/(T_3^2 S^2 + T_4 S + 1) \\ W_3(S) &= x(S)/E(S) = K_4 \\ W_4(S) &= \theta(S)/G(S) = K_5 \\ W_5(S) &= x(S)/\omega_{np}(S) = K_6 \\ W_6(S) &= \theta(S)/\omega_{кр}(S) = K_7 \end{aligned} \quad (46)$$

где  $K_1, K_2, K_3 \dots K_7$  – коэффициенты усиления

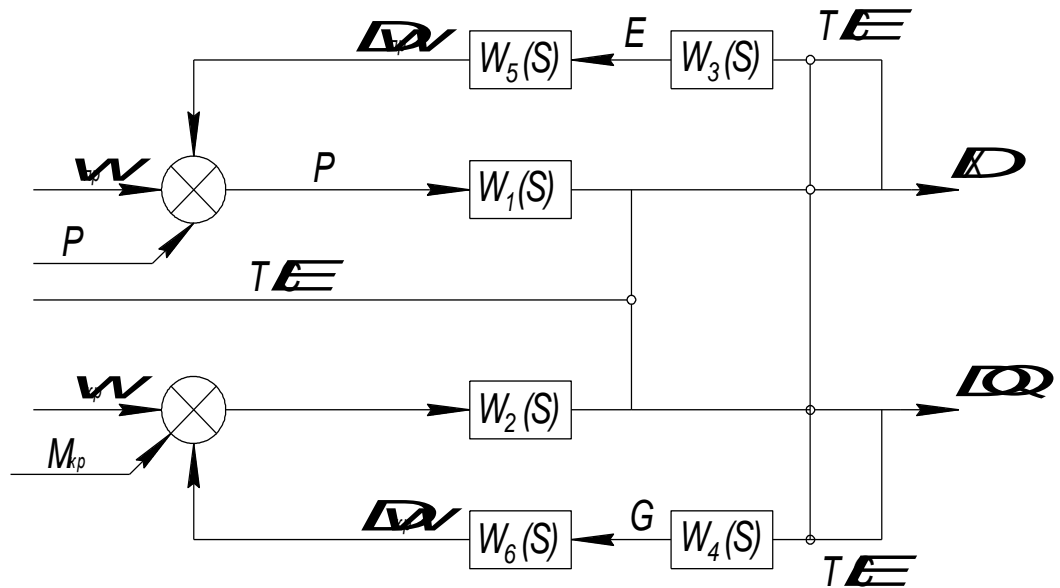


Рисунок 30 - Преобразованная структурная схема системы автоматического управления ТСО с комплексными колебаниями

Преобразованную структурную схему системы автоматического управления ТСО со скручивающим моментом (рисунок 30) после несложных преобразований и упрощений, таких как свертывание передаточных функций и отказа от нелинейного элемента, работа которого определяется самой системой автоматического управления представим в виде рисунка 31.

Из упрощенной структурной схемы представленной на (рисунке 31) выразим передаточную функцию описываемая продольные и крутильные колебания в следующем виде (47):

$$\omega_{\text{пр}}(S) = W_1(S)/(1+W_1(S)+W_3(S)*W_5(S), \tag{47}$$

$$\omega_{\text{кр}}(S) = W_2(S)/(1+W_2(S)+W_4(S)*W_6(S)$$

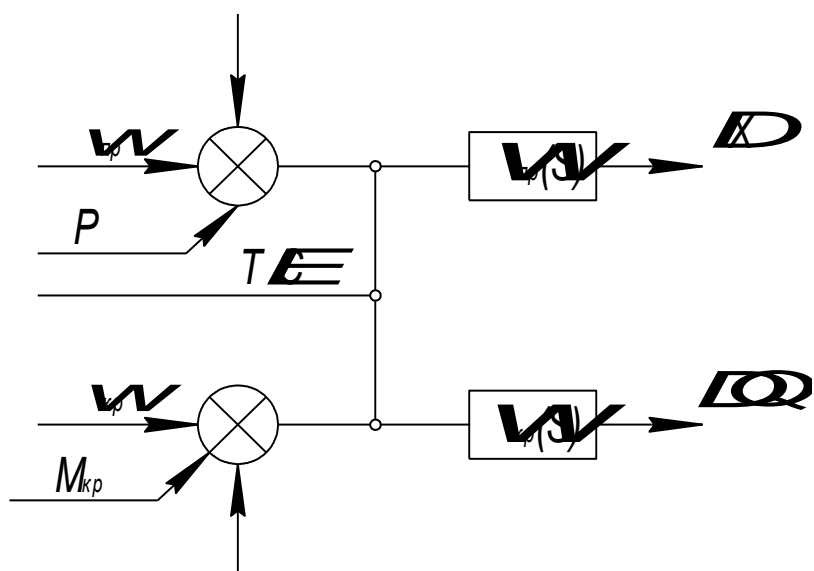


Рисунок 31 - Упрощенная преобразованная структурная схема автоматического управления ТСО с комплексными колебаниями

На режиме остывания первый нуль – орган подает сигнал на вход вида работ 8, который включает в работу цепь комплексных колебаний, путем подачи сигнала на соответствующих вход задающего генератора 41, создающего продолжение вибрации, которые проходя через исполнительный механизм – волновод 40, разделяются на продольную и крутильную составляющие и передаются изделию 3. Блок управления задающего генератора 45 попеременно переключает частоты соответствующие резонансными по продольным и крутильным колебаниям, и настраивает задающий генератору 41 на резонанс крутильных, то продольных колебаний.

Как выяснили ранее в главах 2 и 3, настоящей работы, при изменении температуры и воздействии осевого усилия, существенно изменяется частота собственных колебаний изделия, поэтому для поддержания резонансных режимов вводятся три управляющих контура.

Первый контур предназначен для настройки на резонанс при изменении температуры и включает в себя блок формирования

управляющего сигнала 42 и задатчики величины резонансных частот крутильных<sup>43</sup> и продольных 44 колебаний.

Второй контур предназначен для контроля и корректировки амплитуды угла закручивания в режиме резонанса. Сигнал о величине угла закручивания поступает на вход сумматора 48 с измерителя углов закручивания нижней цепи 34. На второй вход сумматора 48 поступает сигнал с задатчика резонансной величины закручивания 46. Если сигнал рассогласования, формируемый сумматором 48 равен нулю, то корректировка работы системы не нужна, если сигнал рассогласования не равен нулю, то блок управления задающего генератора 45 подает сигнал о величине рассогласования на вход блока формирования управляющего сигнала 42. На другой вход блока 42 подается сигнал о величине изменения средней температуры с входа усилителя постоянного тока 5. С входа блока 42 подается управляющий сигнал на вход блока задания резонансной частоты крутильных колебаний 43, который формирует сигнал о величине изменения частоты и подает на вход блока управления задающего генератора 45, который настраивает задающий генератор 41 на новую частоту.

После проработки изделия на резонансной частоте крутильных колебаний блок управления задающего генератора переключает, задающий генератор 41 на частоту соответствующую резонансу продольных колебаний. При этом второй контур отключается и в работу включается третий контур, предназначенный для контроля и корректировки амплитуды линейных перемещений.

Сигнал о величине линейного перемещения с измерителя линейных перемещений 27 поступает на вход сумматора 49. На второй вход сумматора 49 поступает сигнал с задатчика резонансной величины продольных перемещений 47. Если сигнал рассогласования, формируемый сумматором 49 равен нулю, то корректировка работы системы не требуется. Если сигнал рассогласования не равен нулю, то блок управления задающего генератора 45, на вход которого приходит данный сигнал, подает сигнал о величине

рассогласования на вход блока формирования управляющего сигнала 42. На другой вход блока 42 подается сигнал о величине изменения средней температуры с входа усилителя постоянного тока 5. С входа блока 42 подается управляющий сигнал на вход блока задания резонансной частоты продольных колебаний 44, который формирует сигнал о величине частоты и подает его на вход блока управления задающего генератора 45, который настраивает задающий генератор 41 на новое значение частоты, соответствующее резонансу продольных колебаний.

Цель комплексных колебаний отклоняется одновременно с цепью формирующей осевую пластическую деформацию.

## **2.5 О мерах безопасности при ТСО**

В современном промышленном производстве широко применяются различные методы термической обработки. Требования безопасности условий труда рабочих, работающих в цехах, занимающихся таким видом обработки, являются необходимым предметом рассмотрения инженерно-технических работников.

Целью данного дипломного проекта - является снижение, равномерное распределение внутренних напряжений внутри материала заготовки или детали, а также предотвращение появления коробления после механической обработки

В первоначальном варианте термическая операция заключалась в том, что маложесткую деталь помещали в термическую печь и проводили несколько термических обработок: закалку, 2-3 высокотемпературных отпуска и старение на воздухе. Как при нагреве, так и при охлаждении детали происходила пластическая деформация, сопровождаемая нарушением равновесия межатомных сил притяжения и отталкивания, с одной стороны, и внешних сил, с другой. При таком варианте термической обработки деформация длинномерной маложесткой детали является неизбежной.



В данном дипломном проекте организация рабочего места не изменяется, Но для проведения термической операции применяем сборно-секционный стапель с установленной в него малоожесткой заготовкой. Данное устройство содержит нагревательные элементы (тепловые трубы) и т.д. Появление пластической деформации происходит в результате разности температур нагревательных элементов и материала заготовки, поскольку температура нагревательных элементов за счет наполнителей сохраняется длительное время, а материал заготовки остывает быстрее. При изменении температур появляется осевое усилие необходимое для равномерного распределения напряжений и внутрисиловых факторов внутри материала. Таким способом или методом (искусственного) старения мы сможем избежать промежуточных термических обработок, которые требуют немалых затрат по времени, электроэнергии, сжиганию большого количества кислорода и выделению вредных газов, а после ведем обработку в термовибрационной установке.

Проводим термосиловую обработку, которая снижает уровень внутренних напряжений в материале путём создания осевой пластической деформации и деформации под действием крутящего момента.

Сборно-секционный стапель и термовибрационная установка являются технологическими звеньями в процессе производства малоожесткого вала, и требует постоянного наблюдения и управления и периодический контроль для предотвращения случайных всевозможных сбоев. Данные функции выполняет оператор.

Что же касается безопасности труда, то оба способа термической обработки представляют равнозначные характеристики, разница будет лишь в том что при применение нового приспособления усложнится загрузка заготовки в печь, что может вызвать некоторые трудности и возможность травмирования оператора. Чтобы этого избежать нужно применить специальное приспособление для автоматизации загрузки.

Вентиляцией достигается удаление нагретого воздуха из помещения или подача в него свежего воздуха. Необходимое количество воздуха может быть определено различными методами. Произведем расчет объема воздуха, удаляемого вытяжными шкафами при отсутствии тепловыделений внутри шкафа по формуле (48):

$$L_{\text{ш}}=3600 \times V_{\text{ш}} \times F_{\text{п}}, \text{м}^3/\text{ч}; \quad (48)$$

где  $L_{\text{ш}}$  – объем воздуха, удаляемого вытяжным шкафом,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;

$V_{\text{ш}}$  – скорость воздуха в открытом проеме шкафа,  $\text{м}/\text{с}$ ; принимаем из рекомендаций  $V_{\text{ш}} = 1,1 \text{ м}/\text{с}$ ;

$F_{\text{п}}$  – площадь открытого проема,  $\text{м}^2$ ; определим как:

$$F = \pi \times d^2 / 4 = 3,14 \times 0,5^2 / 4 = 0,19 \text{ м}^2$$

Произведем расчет объема воздуха удаляемого вытяжными шкафами:

$$L_{\text{ш}}=3600 \times 1,1 \times 0,19=752,4 \text{ м}^3/\text{ч},$$

Объем такого воздуха рассчитан для одного проема. Устанавливаем на термическом участке около 10 проемов. Это будет, обеспечивает необходимую вентиляцию термического участка, и будут соблюдены требования по вентиляции.

## **Выводы по главе 2**

Проведя анализ, представленной в главе 2 информации, можно сделать следующие выводы:

1. Проанализирована сущность процессов, реализующих метод термосиловой обработки, с целью совершенствования процесса термообработки маложестких валов.
2. Разработана математическая модель ТСО со скручивающим моментом, как модель автоматического управления процессом термосиловой обработки маложестких валов.
3. Разработана перспективная технология термосиловой обработки маложестких валов.
4. Разработана система автоматического управления термосиловой обработки маложестких валов со скручивающим моментом и с комплексными колебаниями.

## Заключение

Решение проблемы коробления маложестких валов можно использовать с использованием термосиловой обработки, сочетающей термообработку с осевой пластической деформацией, способную снизить общий уровень и придать осевую направленность внутренних напряжений, исключая, таким образом, коробление маложестких валов.

Проведя анализ, представленной в магистерской диссертации информации, можно утверждать, что все поставленные задачи решены:

1. Для повышения качества изготовления маложестких валов необходимо повысить качество заготовок – прутков, качество проведения самой термообработки, а также сочетать с термосиловой обработкой другие способы снижения напряжений, например виброобработку.
2. Проанализирована сущность процессов, реализующих метод термосиловой обработки, с целью совершенствования процесса термообработки маложестких валов.
3. Разработана математическая модель ТСО со скручивающим моментом, как модель автоматического управления процессом термосиловой обработки маложестких валов.
4. Разработана перспективная технология термосиловой обработки маложестких валов.
5. Разработана система автоматического управления термосиловой обработки маложестких валов со скручивающим моментом и с комплексными колебаниями.

Тогда, можно утверждать, что цель магистерской диссертации: повышение качества изготовления маложестких валов путем совершенствования процесса термосиловой обработки достигнута в полном объеме

## Список используемых источников

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

[Элек-тронный ресурс] / В.Ф. Безъязычный, М.Л. Кузменко, В.Н. Крылов, А.В. Лобанов. — Электрон. дан. — М. : Машиностроение, 2007. — 539 с.

9 Блюменштейн В.Ю. Проектирование технологической оснастки. [Электронный ресурс] / В.Ю. Блюменштейн, А.А. Клепцов. — Электрон. дан. — СПб. : Лань, 2014. — 224 с.

10 Бокштейн Б.С. Физическая химия: термодинамика и кинетика. [Электронный ресурс] / Б.С. Бокштейн, М.И. Менделев, Ю.В. Похвиснев. — Электрон. дан. — М. : МИСИС, 2012. — 258 с.

11 Базров Б.М. Основы технологии машиностроения: Учебник для вузов. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — М. : Машиностроение, 2007. — 736 с.

12 Быков В.В. Исследовательское проектирование в машиностроении. [Электронный ресурс] / В.В. Быков, В.П. Быков. — Электрон. дан. — М. : Машиностроение, 2011. — 256 с.

13 Вивденко Ю.Н. Технологические системы производства деталей наукоемкой техники: Учебное пособие для вузов. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — М. : Машиностроение, 2006. — 559 с.

14 Гарифуллин Ф.А. Материаловедение и технология конструкционных мате-риалов: учебно-методическое пособие. [Электронный ресурс] / Ф.А. Гарифуллин, Р.Ш. Аюпов, В.В. Жилияков. — Электрон. дан. — Казань : КНИТУ, 2013. — 248 с.

15 Грызунов В.И. Металлургическая теплотехника. [Электронный ресурс] / В.И. Грызунов, Н.В. Фирсова, С.Е. Крылова, Е.Ю. Приймак. — Электрон. дан. — М. : ФЛИНТА, 2014. — 108 с.

16 Гусев А.А. Проектирование технологической оснастки. [Электронный ресурс] / А.А. Гусев, И.А. Гусева. — Электрон. дан. — М. : Машиностроение, 2013. — 416 с.

17 Дуваров В.Б. Технология конструкционных материалов. [Электронный ресурс] / В.Б. Дуваров, Т.В. Хмеленко. — Электрон. дан. — Кемерово : КузГТУ имени Т.Ф. Горбачева, 2012. — 115 с.

18 Ермолаев В.А. Технологические процессы в машиностроении: конспект лекций: учебное пособие для вузов. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — М. : НИЯУ МИФИ, 2011. — 264 с.

19. Исакова, И.В. Основы инженерного творчества. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — Кемерово : КузГТУ имени Т.Ф. Горбачева, 2013. — 63 с.

20 Киселев А.П. Поверхностные явления и дисперсные системы: учебное пособие для вузов. [Электронный ресурс] / А.П. Киселев, А.А. Крашенников, А.А. Фатина. — Электрон. дан. — СПб. : БГТУ "Военмех" им. Д.Ф. Устинова, 2014. — 42 с.

21 Локощенко А.М. Ползучесть и длительная прочность металлов. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — М. : Физматлит, 2016. — 504 с.

22 Маталин А.А. Технология машиностроения. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — СПб. : Лань, 2016. — 512 с.

23 Новиков И.И. Металловедение: В 2 т-х. Т. 1. Основы металловедения; Т. 2. Термическая обработка. Сплавы. [Электронный ресурс] / И.И. Новиков, В.С. Золоторевский, В.К. Портной, Н.А. Белов. — Электрон. дан. — М. : МИ-СИС, 2014. — 1020 с.

24 Неведров А.В. Основы научных исследований и проектирования : учеб. Пособие. [Электронный ресурс] / А.В. Неведров, А.В. Папин, Е.В. Жбырь. — Электрон. дан. — Кемерово : КузГТУ имени Т.Ф. Горбачева, 2011. — 108 с.

25 Суслов А.Г. Научно-технические технологии в машиностроении. [Электронный ресурс] / А.Г. Суслов, Б.М. Базров, В.Ф. Безъязычный, Ю.С. Авраамов. — Электрон. дан. — М. : Машиностроение, 2012. — 528 с.

26 Титов А.В. Исследование физико-механических характеристик деформируемых материалов: учебное пособие для вузов. [Электронный ресурс] / А.В. Титов, Е.Ю. Ремшев, В.П. Белогур. — Электрон. дан. — СПб. : БГТУ "Воен-мех" им. Д.Ф. Устинова, 2013. — 110 с.

27 Титух И.Н. Устойчивость механических систем. Статика: учебное пособие для вузов. [Электронный ресурс] / И.Н. Титух, С.П. Яковлев. — Электрон. дан. — СПб. : БГТУ "Военмех" им. Д.Ф. Устинова, 2014. — 121 с.

28 Фещенко В.Н. Справочник конструктора. Комплект в двух томах: Книга 1. Машины и механизмы: Учебно-практическое пособие. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — Вологда : "Инфра-Инженерия", 2016. — 400 с.

29 Фещенко В.Н. Справочник конструктора. Комплект в двух томах: Книга 2. Проектирование машин и их деталей: Учебно-практическое пособие. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — Вологда : "Инфра-Инженерия", 2016. — 400 с.

30 Филонов И.П. Инновации в технологии машиностроения. / И.П. Филонов, И.Л. Баршай. — Электрон. дан. — Минск : "Высшая школа", 2009. — 110 с.

31 Чулков В.А. Методология научных исследований.— Пенза : ПензГТУ, 2014. — 200 с.

32 Guven U The fully plastic rotating disk with rigid inclusion. / U. Guven //ZAMM - Journal of applied mathematics and mechanics –2006 – vol. 77 – issue 9 –p. 714-716.

33 Jiang-jiang Zhu Thermo-elastic-plastic Stress and Strain Analysis and Life Prediction of Gas Turbine Blade / Jiang-jiang Zhu, Zi-chun Yang, // Int. Conf. on Measuring Technology and Mechatronics Automation, (ICMTMA) – 2010. – V. 3. –p. 1019-1022.

34 Nejad M.Z Exact elasto-plastic analyses of rotating disks made of functionally graded materials. / M.Z. Nejad, A. Rastgoo, A. Hadi // International Journal of Engineering Science – 2014 – Vol. 85 – p. 47-57

35 Przemieniecki J.S Theory of Matrix Structural Analysis. New York: Dover Publications, 2010. 480 p.



36 Wen Xue Qian Finite Element Analysis of a Compressor Disk / Wen Xue Qian, Li Yang Xie, Xiao Wei Yin. // J. Advanced Materials Research. – 2010. – V. 118.– p. 49-53.

37 Патент на полезную модель (Китай) ZL 200720067413.7.

38 Патент US 5572892 A.

39 YAMAGUCHI HARUO, KUSABA YOSHIAKI, YAMADA TAKEO, Techniques for the Control of Edge Crack Defects of Stainless Steel Sheets, Foreign Steel, 1996 (12): 48-52.

40 Xiong Shangwu, J.M.C. Rodrigues, P.A.F. Martins. Three-dimensional modelling of the vertical-horizontal rolling process [J], Finite Elements in Analysis and Design, 2003, 39: 1023-1037.

41 Xiong Shangwu, Liu Xianghua, Wang Guodong, et al., Three-dimensional thermo-mechanical finite element simulation of the vertical-horizontal rolling process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 11: 89-97.

42 Gao Wenfang, Yan Zhengguo, Song Ping, Rao Kewei, Chen Fangwu, Kong Yongjiang, Research on the Linear Defects along the Edges of Shadow Mask and Chassis Cold-rolled Sheets [J], Steelmaking, 2003, 19 (1).

43 Yaping (CN), GONG Yu (CN), Yezhong (CN), Hongxu (CN), патент РФ №2591788.

44 Патент РФ №2606665, авторов Чертовских Е.О., Околович Г.А., Габец А.В.

45 Патент РФ № 2695912, авторами Усольцевым А.М., Бокаревым С.А., Поповой Е.Г., Маликовым М.Ю.

46 Влияние несоосности при термосиловой обработке на коробление готовой детали. Межвузовский сборник научных трудов. Часть 2. Тольятти 2000 год. Воронов Д.Ю., Драчёв О. И., Бобровский А.В.

47 Пути снижения коробления маложестких валов, путем применения термосиловой обработки. Журнал «Машиностроитель» № 6, 2001 год Воронов Д.Ю., Драчёв О. И.

48 Динамическая модель термосиловой обработки, как объекта управления. Проблемы современного машиностроения. Сборник к 40-летию Машиностроительного факультета. Тольятти 2001 год. Воронов Д.Ю Драчёв О. И. Расторгуев Д.А.

49 Влияние осевой пластической деформации на коробление готовой детали. Проблемы современного машиностроения. Сборник к 40-летию Машиностроительного факультета Тольятти 2001 год. Воронов Д.Ю Драчёв О. И. Расторгуев Д.А.

50 Новая технология термосиловой обработки маложестких валов. Журнал «Известия» №1, стр. 32-35. Серия «Автоматизация технологических процессов в машиностроении» Волгоградского государственного технического университета. Волгоград 2004 год. Воронов Д.Ю., Драчёв О. И. Расторгуев Д.А.

51 Установка для контроля геометрии маложестких деталей. Тольяттинский государственный университет, 2006 г. Автоматизация технологических процессов и производственный контроль: Сб. докл. Международной научно-технической конференции 23-25 мая. Ч 1.- Тольятти: ТГУ, 2006г. Воронов Д.Ю., Диткин И.А., Пахоменко А.Н.

52 Лабораторные испытания по оценке влияния параметров ТСО на коробление валов. Тольяттинский государственный университет, 2006 г. Автоматизация технологических процессов и производственный контроль: Сб. докл. Международной научно-технической конференции 23-25 мая. Ч 1.- Тольятти: ТГУ, 2006г. Воронов Д.Ю., Диткин И.А., Драчев О.И., Пахоменко А.Н., Расторгуев Д.А.

53 Измерения кривизны маложестких валов в цеховых условиях. Тольяттинский государственный университет, 2006 г. Автоматизация технологических процессов и производственный контроль: Сб. докл. Международной научно-технической конференции 23-25 мая. Ч 1.- Тольятти: ТГУ, 2006г. Воронов Д.Ю., Диткин И.А., Драчев О.И., Пахоменко А.Н., Расторгуев Д.А.

54 Разработка технологического процесса обработки холодом маложестких валов». Тольяттинский государственный университет 2009 г. «Проведение научных исследований в области машиностроения». Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции с элементами научной школы для молодежи. Воронов Д.Ю., И.В. Лебедева, А.В.Мальцева, К.А. Репин.

55 Методика проведения экспериментальных исследований параметров обработки холодом на геометрическую точность маложестких валов. Тольяттинский государственный университет 2009 г. «Проведение научных исследований в области машиностроения». Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции с элементами научной школы для молодежи. Воронов Д.Ю., К.А. Репин, А.Р. Хасанов.

56 Лабораторные испытания по оценке влияния параметров ТСО на коробление маложестких валов и измерение кривизны маложестких валов в цеховых условиях. Тольяттинский государственный университет 2009 г. «Проведение научных исследований в области машиностроения». Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции с элементами научной школы для молодежи. Воронов Д.Ю., И.А. Диткин, Е.С. Диткина, Л.В. Ольховская.

57 Испытания по оценке влияния параметров термосиловой обработки на коробление валов и измерение кривизны маложестких валов в цеховых условиях. Казанская наука. №10 2010г.-Казань: Издательство Казанский Издательский Дом. Воронов Д.Ю., Логинов Н.Ю.

58 Устройство для термосиловой обработки. Патент на изобретение от 10.07.04. № 2232198. Воронов Д.Ю., Драчёв О. И. Расторгуев Д.А.

59 Способ термосиловой обработки длинномерных осесимметричных деталей и устройство для его осуществления. Патент на изобретение от 20.06.05. № 2254383. Воронов Д.Ю., Драчёв О. И. Расторгуев Д.А.

60 Устройство для термосиловой обработки осесимметричных деталей.  
Патент на изобретение от 20.09.05. № 2260628. Воронов Д.Ю., Драчёв О.  
И., Расторгуев Д.А.

61 Дидык Е.О., Воронов Д.Ю. Определение резонансных частот комплексных колебаний при термосиловой обработке. «Студенческий форум» №23(116).

## Приложение А

### Сертификаты и справки



## Продолжение Приложения А



Издательство: ООО «МЦНО»  
Адрес: 123098, г. Москва, улица Маршала Василевского, дом 5, корпус 1, к. 74,  
E-mail: [mail@nauchforum.ru](mailto:mail@nauchforum.ru), сайт: [nauchforum.ru](http://nauchforum.ru), тел. +7 (499) 490-63-66,  
ИНН 7715904374, р/с № 40702810510000021397,  
Банк: АО «Тинькофф Банк» г.Москва,  
к/с 30101810145250000974, БИК 044525974

### СПРАВКА

19.06.2020 г. № 14167

Автор(-ы) статьи: Дидык Евгений Олегович

Международный центр науки и образования сообщает, что Ваша статья «Определение резонансных частот комплексных колебаний при термосиловой обработке» принята к публикации в научном журнале «Студенческий форум» №23(116). Статья будет опубликована на сайте: <https://nauchforum.ru> 28 июня 2020 г. Рассылка журналов и оттисков планируется 17 июля 2020 г.

Генеральный директор  
Международный центр науки и образования

И.С. Степанов

