

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, специальности)

Цифровые процессы и системы автоматизированного машиностроения

(направленность (профиль) / специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему «Совершенствование технологического процесса изготовления маложестких валов»

Обучающийся

Сизых Д.Д.

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный

канд. техн. наук, Воронов Д.Ю.

Руководитель

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2024 г.

Содержание

Введение.....	3
1 Исследование методов улучшения технологического процесса.....	5
1.1 Анализ технологии механической обработки заготовки	5
1.2 Анализ метода термической обработки заготовки	14
1.3 Этапы развития методик анализа с помощью метода конечных элементов	22
2 Исследования процесса термосиловой обработки.....	28
2.1 Анализ процесса термосиловой обработки	28
2.2 Исследования напряженно-деформированного состояния процесса термосиловой обработки.....	36
3 Проведение анализа методом конечных элементов.....	41
3.1 Метод конечных элементов применительно к процессу термосиловой обработки.....	41
3.2 Методика проведения расчета в Ansys.....	49
3.3 Моделирование процесса в Ansys и результаты.....	56
Заключение.....	70
Список используемых источников.....	71
Приложение А Сертификат о публикации статьи.....	76

Введение

Термообработка является наиболее ответственной и трудоемкой операцией при изготовлении деталей такого типа. При создании гибких мало жестких валов закалка и отпуск являются двумя распространенными операциями термообработки. Благодаря созданию качественной внутренней структуры и формированию поля внутренних напряжений эти операции определяют качество изготовления гибкого вала. Термосиловая обработка — это операция, при которой термообработка сочетается с осевой пластической деформацией для создания осенаправленной структуры зерен металла.

Релаксация внутренних остаточных напряжений представляет собой целый перечень проблем при изготовлении деталей типа «Вал». Непредсказуемое коробление возникает в результате расслабления этих напряжений уже после изготовления детали. Таким образом, если мы достигаем точности во время процесса, мы можем потерять ее уже во время эксплуатации. При этом, учитывая снижение жесткости изделий и потенциальное влияние процессов релаксации напряжений на стабильность геометрической формы мало жестких валов, указанные проблемы с изготовлением мало жестких деталей увеличиваются по мере увеличения соотношения длины к диаметру.

Для решения первой 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 мало жестких валов, а для решения проблемы непредсказуемости распределения остаточных напряжений можно использовать моделирование процесса методом конечных элементов. Поэтому, тема магистерской диссертации является актуальной.

Тогда целью диссертации является совершенствование технологического процесса изготовления мало жестких валов путем улучшения термосиловой обработки.

Для достижения данной цели необходимо будет ряд следующих задач:

- изучение перспективных технологий, которые могут быть применены к термосиловой обработке для ее последующего усовершенствования, в том числе для улучшения качества заготовки для вала;

- провести анализ термосиловой обработки для того, чтобы лучше понять, как проходит процесс для последующего разработки методики проведения эксперимента;

- изучение напряженно-деформированного состояния для разработки методики проведения эксперимента, чтобы повысить эффективность не столько со стороны привнесения новых и перспективных технологий, сколько со стороны повышения эффективности уже устоявшихся технологических процессов путем сокращения сроков и затрат на освоение новой техники, уменьшение затрат, связанных с отработкой технологических процессов изготовления деталей и сборки изделий, повышение надёжности, долговечности и эксплуатационной пригодности изделий.

Научная новизна исследования заключается в том, что была разработана методика для анализа технологического процесса изготовления маложесткого вала, путем использования программного комплекса, который может одновременно учитывать термические и механические нагрузки.

Данная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка используемых источников и приложения.

Первая глава работы посвящена анализу существующих методов обработки изделий, которые потенциально могут быть применены в технологическом процессе обработки маложестких валов. Также рассмотрены методы для анализа технологического процесса.

Во второй главе показаны исследования по базовому технологическому процессу термосиловой обработки маложестких валов, результаты которых будут использоваться для проверки результатов моделирования процесса. Показаны зависимости и математическое описание технологического процесса.

Третья глава представляет методику, которая позволяет упростить и оптимизировать работу технолога, в том числе за счет автоматизации процесса. Также показано само моделирование процесса, согласно данной методике.

Заключение содержит выводы по проанализированным проблемам.

1 Исследование методов улучшения технологического процесса

При изготовлении маложестких валов важнейшей операцией, влияющей на качество маложесткого вала, является термосиловая обработка. Данная операция определяет уровень и характер распределения остаточных напряжений в материале маложесткого вала. 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 вопроса по улучшению качества заготовок для маложестких валов под термосиловую обработку, с целью его анализа на возможность применения в качестве дополнения к уже устоявшемуся базовому процессу термосиловой обработки.

1.1 Анализ технологии механической обработки заготовки

«Идея патента заключается в том, чтобы улучшить рабочие характеристики изделий, изготовленных из круглого профиля стали обычного качества, легированной стали и сплавов, а также цветных металлов. Эти изделия обычно используются в качестве исходной непрерывнолитой заготовки» [31].

«Этот метод использует чашевидные валы с эксцентриситетом относительно оси прокатки и наклоном к ней на угол раскатки, чтобы снизить обжатие заготовки. Упорядоченная осевая полосчатая макроструктура в продольном направлении круглого профиля с благоприятной ориентацией волокон для изделий, испытывающих осевые растягивающие напряжения и крутящие моменты, должна быть деформирована при винтовой прокатке с суммарным обжатием не менее 50,6% и вытяжкой не менее 4,1 за проход в валках с диаметром не менее 2,8 диаметра заготовки, установленных с

величиной эксцентриситета, эквивалентной углу подачи не менее 25° , и образующих очаг деформации с конусностью $15\pm 2^\circ$ » [31].

«Легирование металла или термическая обработка обычно используются для улучшения его эксплуатационных свойств. Ориентировочная структура винтовой прокатки увеличивает ее прочность и пластические свойства. Новое направление производства сортовых профилей с повышенными механическими и пластическими свойствами представляет собой деформационный метод создания упорядоченной структуры в товарном прокате в сочетании с действующими рабочими нагрузками в изготовленном из него изделии. После винтовой прокатки повышение служебных свойств сортового профиля сопоставимо с эффектом упрочняющего легирования или термической обработки» [3, с. 501].

«Механические свойства сортового проката определяются рядом факторов. Одним из наиболее важных из них, помимо естественных прочностных и пластических характеристик металла, является способ его изготовления. Сортовые профили обычно изготавливаются продольной прокаткой» [4, с. 244].

«В процессе винтовой прокатки металл деформируется вдоль оси заготовки, локализуясь на узком участке ее боковой поверхности. Сдвиговые макропотоки материала начинают формироваться и развиваться вдоль поперечного сечения заготовки. Это приводит к формированию спиральной структуры в поперечном сечении заготовки. Строчечная (полосчатая) волокнистая структура формируется в продольном сечении деформированной заготовки, ориентированная параллельно оси раската» [5, с. 101].

«Продольная прокатка приводит к деформации по всей ширине квадратной или прямоугольной заготовки с применением деформирующих усилий поперек ее оси. Это происходит по большей площади контактной поверхности, чем при винтовой прокатке. Макропотоки металла растут и перемещаются вдоль заготовки, хотя иногда они сдвигаются в поперечном направлении. В результате сдвиговых деформаций в продольном направлении раската формируется структура с рисунком, напоминающим шеврон. После

винтовой прокатки в поперечном направлении образуется полосчатая структура, напоминающая структуру продольного сечения заготовки» [6, с. 96].

«Способ прокатки в сочетании с созданием соответствующей структуры определяет состояние и распределение примесей и вторых фаз, влияющих на конечные свойства продукции. Эти методы прокатки вызывают анизотропию механических свойств разного типа в готовом сорте. Это связано с различиями в формировании геометрической направленности структур. В результате винтовой прокатки сорт демонстрирует анизотропию, сходную с анизотропией трансформных тел» [7, с. 255]. «Наличие вертикальных клеток или последующие кантовки раската приближают анизотропию сорта продольной прокатки к трансформному типу. Тем не менее, различия в структуре металла, образующихся при рассматриваемых методах прокатки, сохраняются, что отражается в эксплуатационных свойствах изделий этого сорта» [30]. «В этом случае винтовая прокатка значительно превосходит продольную прокатку по величине ударной вязкости и сопротивлению к разрушению. Однако различия в прочности и пластических свойствах незначительны» [8, с. 401].

«Выбор наилучшего метода прокатки позволит создать структуру профиля, соответствующую его функциональному назначению, а также обеспечить максимальное использование физико-механических свойств материала. В этом отношении использование винтовой прокатки является перспективным методом производства сортового металла, из которого будут производиться изделия, которые испытывают осевые знакопеременные нагрузки во время работы» [1, с. 56]. «К таким изделиям относятся крепежные изделия, арматура, торсионные валы и так далее. Единственный метод деформации, позволяющий контролировать формирование спиральной структуры в сортовом металле, — это винтовая прокатка. Таким образом, можно создать структуру по сечению проката, подобную естественным композитам, изменяя режим обжатия» [2, с. 117].

«Предложенный метод устраняет эти недостатки. Цель изобретения состоит в том, чтобы определить идеальные технологические параметры деформирования заготовки при винтовой прокатке, чтобы обеспечить сортовому металлу наилучшие механические свойства путем придания

готовому профилю соответствующей наследственной структуры. Технический результат изобретения заключается в выполнении задачи» [31].

«Технический результат достигается при использовании метода винтовой прокатки круглого профиля, при котором заготовку обжимают чашевидными валками с эксцентриситетом относительно оси прокатки и наклоном к ней на угол раскатки. Согласно изобретению, заготовку обжимают в валках диаметром не менее 2,8 диаметром заготовки и с эксцентриситетом, эквивалентным углу подачи не менее 25° , что приводит к образованию очага деформации с величиной эксцентриситета, эквивалентной углу подачи не менее 25° , и образующих очаг деформации с конусностью $15\pm 2^\circ$, в котором деформирующее воздействие на металл производят с суммарным обжатием не менее 50,6% и вытяжкой не менее 4,1 за проход» [35].

«Для достижения технического результата винтовую прокатку сорта следует продолжать в валках, вращающихся в сторону, в первом проходе, с суммарным обжатием не менее 15% и вытяжкой не менее 2,08 при сохранении остальных режимов деформации. Для усиления воздействия на поверхностный слой сортового металла в последующих проходах винтовую прокатку следует продолжать в валках, вращающихся в сторону, в первом проходе. Для этого используют непрерывно литейную заготовку» [9, с. 171].

«В предлагаемом способе винтовой прокатки деформация круглой заготовки производится чашевидными валками, установленными с эксцентриситетом относительно оси прокатки и с наклоном к ней на угол раскатки, обжатие заготовки осуществляется в валках с коэффициентом I (1):

$$i = \frac{D}{d} \geq 2,8, \#(1)$$

где D – максимальный диаметр валка;

d – исходный диаметр заготовки. Обжатие заготовки выполняется тремя валками переменного радиуса, размещенными вокруг оси прокатки на угол 120° друг от друга. Валки создают очаг деформации с конусностью $15\pm 2^\circ$, угол раскатки может находиться в пределах $30-60^\circ$. Прокатка заготовки

осуществляется с величиной эксцентриситета, эквивалентной углу подачи $\beta \geq 25^\circ$, при суммарном обжатии за проход $\varepsilon_{\Sigma} \geq 50,6\%$ или вытяжке $\lambda \geq 4,1$ » [31].

«Исследования показали, что при создании винтовой прокаткой ориентированной структуры в сортовом металле заявленные технологические параметры обеспечивают повышение служебных свойств круглых профилей. Результаты исследований показаны на рисунках 1-3» [31].

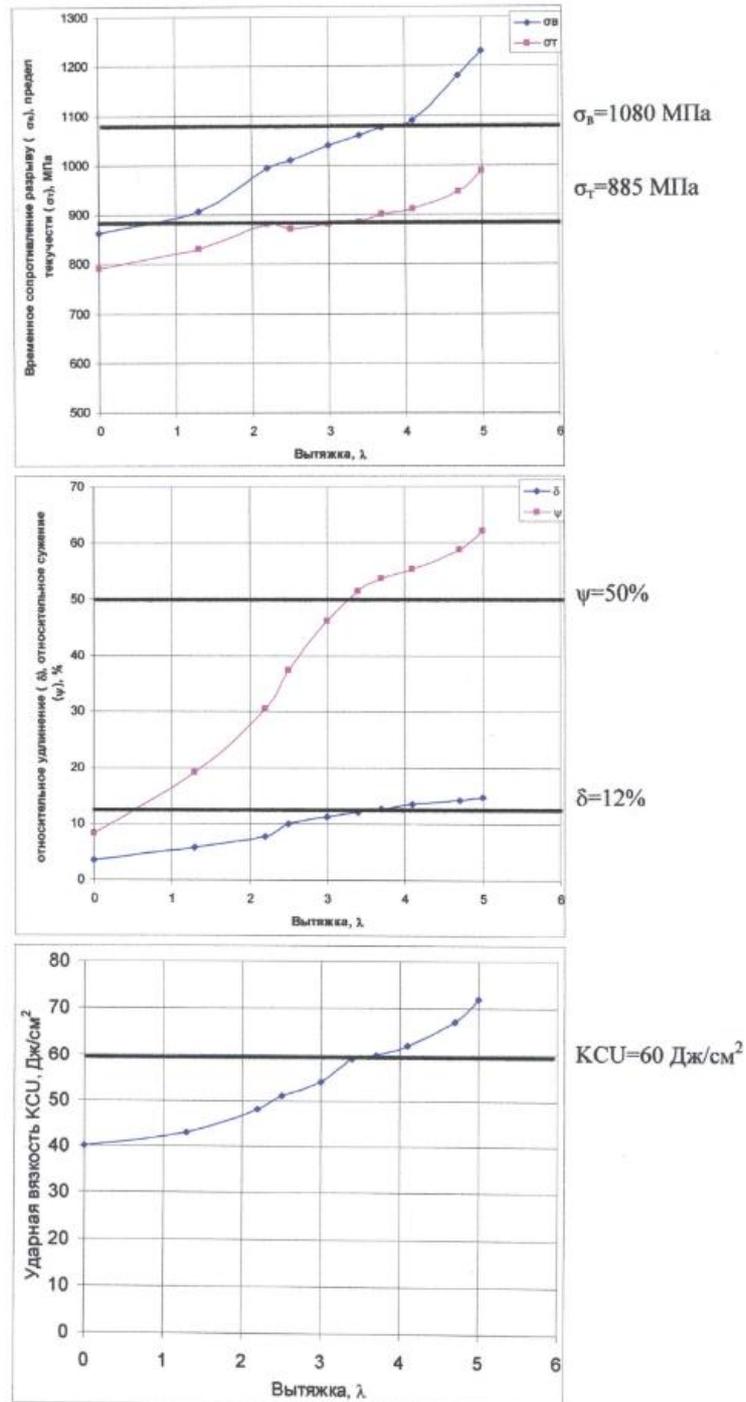


Рисунок 1. Зависимость временного сопротивления σ_B и предела текучести σ_T (а), относительного удлинения δ и относительного сужения ψ (б), ударной вязкости КСЧ (в) от величины вытяжки λ для стали ЭП678.

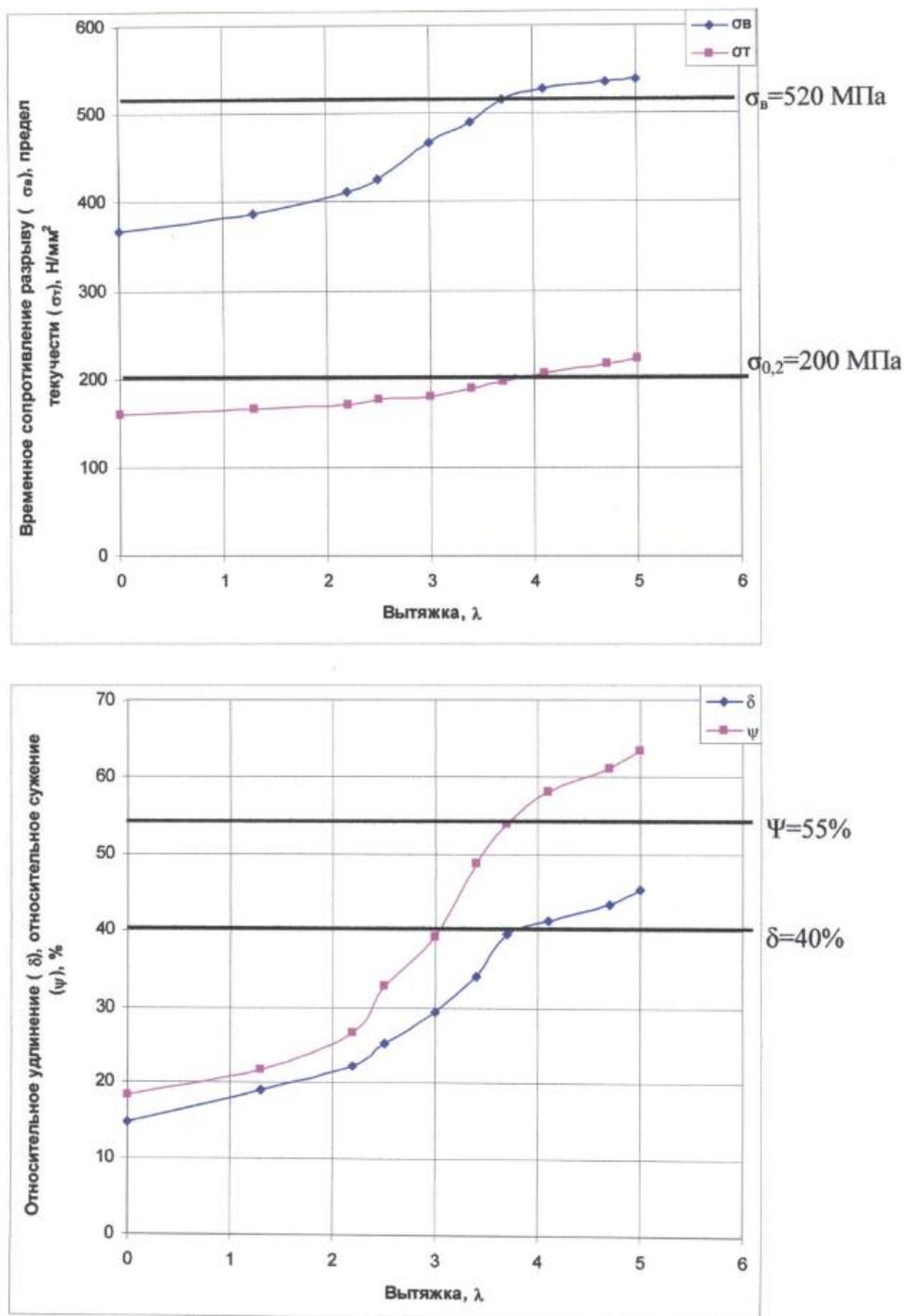


Рисунок 2. Зависимость временного сопротивления σ_B и предела текучести σ_T (а), относительного удлинения δ и относительного сужения ψ (б) от величины вытяжки λ для 12Х18Н10Т.

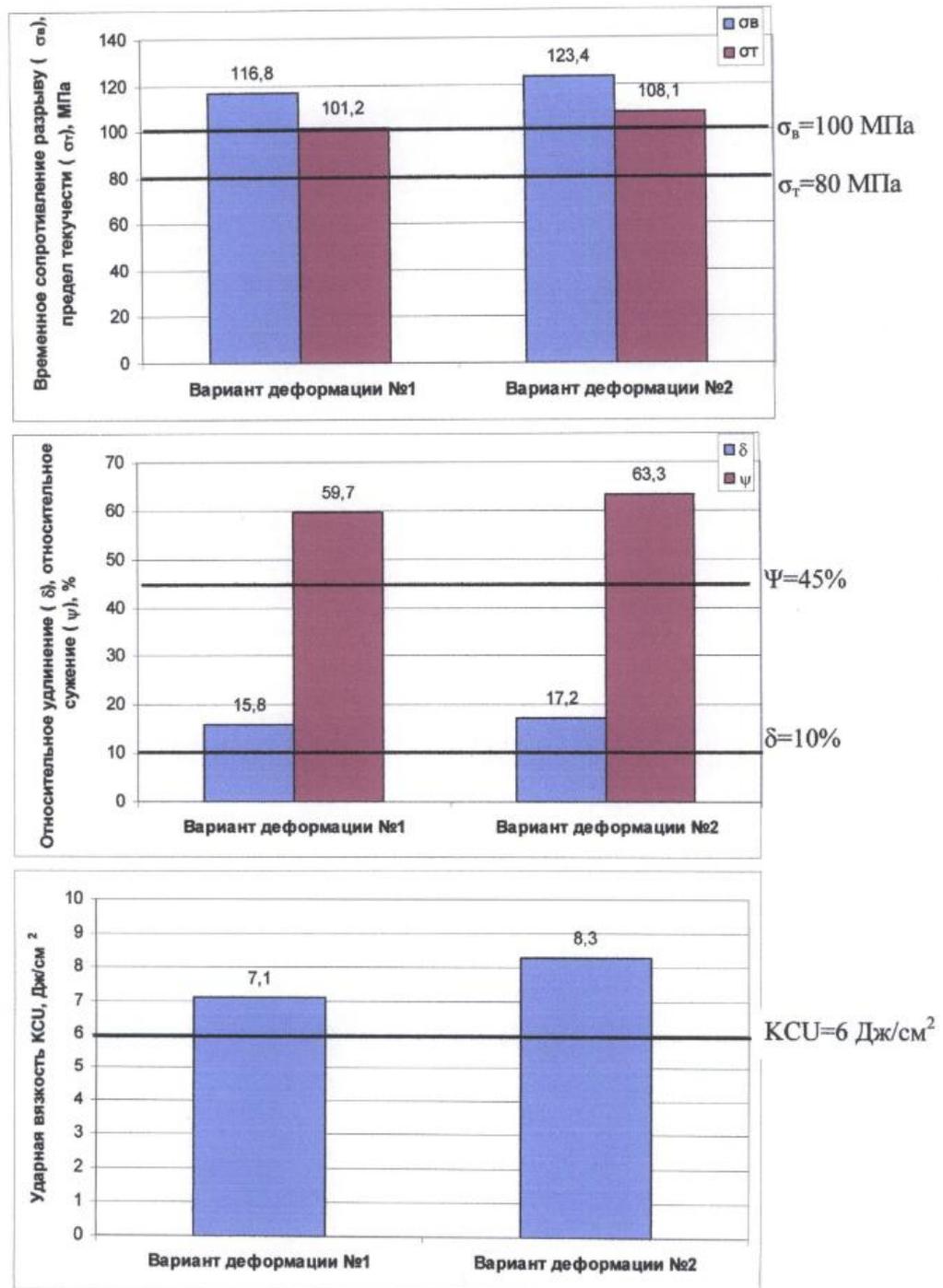


Рисунок 3. Механические характеристики круглого профиля, созданного однократной одноэтапной деформацией с суммарным обжатием $\epsilon\Sigma=66,0\%$, а также двукратной двухэтапной деформацией с суммарным обжатием $\epsilon\Sigma=51,0\%+15,0\%=66,0\%$, включают временное сопротивление σ_b и предел текучести σ_t (а); относительное удлинение δ и относительное сужение ψ (б); ударная вязкость KCU (в). Уровень свойств стали 40X по ГОСТ4543 представлен горизонтальной линией.

Примеры выполнения изобретения.

«Пример 1. Метод был повторно испытан на трехвалковом стане винтовой прокатки ВК100 с консольным креплением валков диаметром 370 мм. Было использовано сталь ЭП678 (03Х11Н10М2Т) для производства опытной партии круглых профилей диаметром 107, 82, 77, 70, 66, 63, 60, 56, 54 мм. Сначала использовали непрерывнолитую заготовку диаметром 122 мм. Прокатывание профилей проводилось при следующих условиях деформирования: температура нагрева заготовок составляла 1240 градусов Цельсия (плюс-минус двадцать градусов), эксцентриситет валков соответствовал углу подачи 25° , общее обжатие составило 12,3-55,3%, вытяжка составляла 1,3-5,0, $i=3,0$, угол раскатки 45° и конусность очага деформации $15,5$ градусов» [31].

Механические свойства катаных профилей были изучены для оценки влияния режимов деформирования на проработку металла непрерывнолитой заготовки. Рисунок 1 демонстрирует результаты исследования, демонстрирующее влияние величины вытяжки на изменения механических свойств металла профилей.

Механические свойства катаных профилей были изучены для оценки влияния режимов деформирования на проработку металла непрерывнолитой заготовки. На рисунке 2 показаны результаты исследования, демонстрирующие влияние величины вытяжки на изменения механических свойств металла профилей.

Пример 3. Заготовки из стали 40Х были прокатаны на стане ВК100 с диаметром валков 370 мм для опытных партий круглых профилей диаметром 34 мм. Круглый профиль был сделан из непрерывнолитой заготовки диаметром 100 мм. В печи заготовки нагревались при температуре 1190°C (плюс-минус 20°C), а эксцентриситет валков соответствовал углу подачи 29° , $i=4,1$. Общее обжатие было 66,0%, вытяжка была 8,65, угол раскатки 45° и конусность очага деформации $15,5^\circ$. Прокатка заготовок проводилась в двух режимах. Одна партия заготовок была прокатана за один проход на круг диаметром 34 мм с суммарным обжатием $\varepsilon\Sigma=66,0\%$. Дополнительная партия заготовок на круг 34 миллиметра была прокатана за два прохода. Поначалу заготовки были

прокатаны на круг диаметром 49 миллиметров с суммарной величиной обжатия $\epsilon_{\Sigma}=51,0\%$ и вытяжкой $\lambda=4,16$, затем раскат диаметром 49 мм был прокатан на круг диаметром 34 мм с суммарной величиной обжатия за проход $\epsilon_{\Sigma}=15,0\%$, вытяжкой $\lambda=2,08$ » [31].

«Механические свойства катаных профилей были изучены для оценки влияния режимов деформирования на проработку металла непрерывнолитой заготовки. Рисунок 3 показывает результаты исследования того, как величина суммарного обжатия при прокатке за один проход и за два прохода с разным (противоположным) направлением вращения валков влияет на изменения механических свойств металла профилей» [31].

«При выполнении формулы изобретения технический результат достигается следующим образом: в примерах 1, 2 и 3 профиль, изготовленный винтовой прокаткой при ϵ_{Σ} не менее 50,6% и с вытяжкой не менее 4,1, уже соответствует требованиям ТУ 14-1-3568-83 для проката стали ЭП678 ИД, ГОСТ5949 для проката стали 12Х18Н10Т и ГОСТ4543 для проката стали 40Х» [38]. «В примере 3 профиль, изготовленный винтовой прокат. Механические свойства сортового проката при двухпроходном прокате выше, чем при однопроходном прокате. Это важная эксплуатационная характеристика материала, ответственная за конструкционную прочность изделия. Качество макроструктуры профилей, которые были изготовлены, было удовлетворительным. Поверхность профилей не имела пленки или трещин» [10, с. 165].

«В то время как для обеспечения гарантированного уровня механических свойств металла по ГОСТ или ТУ при продольной прокатке непрерывнолитая заготовка должна быть деформирована не менее чем с 10-кратной вытяжкой. Эти же механические свойства металла при ковке и прессовании могут быть достигнуты при 6- и 8-кратной вытяжке соответственно» [11, с. 222].

1.2 Анализ метода термической обработки заготовки

Как ранее уже было сказано, на качество конечного изделия процесс получения заготовки-прутка и процесс термической обработки, способ и режимы ее проведения, влияют в равной степени.

Важно отметить то, что при термосиловой обработке главной качественной характеристикой процесса является то, насколько равномерно распределились остаточные напряжения.

Уровень и характер этих напряжений определяется во время термической обработки заготовки.

Далее рассмотрим процесс термической обработки, сочетание которого может привести к улучшению процесса термосиловой обработки.

Перспективная технология рассмотрена и описана в патенте № RU2800483C1, автором которого является Голец А.В.

Изобретение относится к области машиностроения и металлообработки, в частности к термической и химико-термической обработке, и может быть использовано при термической обработке деталей из стали. Способ термической обработки детали из стали характеризуется тем, что осуществляют ступенчатый нагрев детали в замкнутой камере нагрева вакуумной закалочной печи, при котором первоначально деталь загружают в камеру нагрева, температура в которой достигает 600°C , затем повышают температуру до 700°C и выдерживают деталь при данной температуре в течение 3-15 минут, затем повышают температуру до 800°C и выдерживают деталь при данной температуре в течение 3-15 минут, затем повышают температуру до $810-860^{\circ}\text{C}$ и выдерживают деталь в течение периода времени, равного 90-120 секунд на 1 мм сечения детали, затем осуществляют охлаждение детали в замкнутой камере охлаждения вакуумной закалочной печи с закалочным масляным баком с установленной мешалкой при температуре $30-80^{\circ}\text{C}$ в течение 5-25 минут и отпуск при температуре $150-175^{\circ}\text{C}$ в течение 2-4 часов. Предпочтительно после охлаждения детали проводят обработку холодом при температуре от -65°C до 0°C в течение 30-60 минут. Технический результат включает в себя улучшение технологичности и экологичности процесса обработки деталей из стали, а

также улучшение показателей качества материала, полученного в результате обработки.

Способ закалки сталей и сплавов переходного и мартенситного класса заключается в том, что обрабатываемое изделие после его подготовки нагревают при обычной температуре закалки для данной стали. После выдержки изделие помещают в ванну с расплавленными солями (щелочами). Перед началом мартенситного превращения обрабатываемой стали (сплава) температура расплава может колебаться от 400°С до 30-40°С. В этом расплаве предмет выдерживают до тех пор, пока он не выделит вторичные фазы, что охрупчит металл и предотвращает стабилизацию аустенита. Время выдержки для большинства сплавов составляет от трех до пяти минут. Затем предмет извлекают из расплава и оставляют охлаждаться на воздухе. Изделия из переходных сталей и сплавов охлаждаются до более низких температур, чем стандартные для данной марки стали. Авторское свидетельство № 246554, МПК C21D 6/00; C21D 1/607; C21D 1/673; C21 D 6/04; опубликовано 1969.06.20.

Недостатками этого метода закалки являются вероятность трещинообразования из-за генетических факторов и изменение химического состава поверхностного слоя стали в зависимости от среды нагрева. Это приводит к стабилизации аустенита на поверхности и значительно снижению усталостной прочности и коррозионной стойкости сталей и сплавов переходного и мартенситного классов.

Термическая обработка шаров после штамповочного или прокатного нагрева включает в себя выравнивание температуры по сечению каждого шара естественным путем на воздухе до температуры, превышающей температуру закалки, затем орошение шаров водой, чтобы подстудить их до температуры закалки. Далее шары закаливаются в воде закалочной ванны до температуры 300°С, а закалочный барабан проходит половину оборота. После закалки шары самоотпускаются. Патент РФ № 2455369, МПК C21D 9/36; опубликован 10.07.2012.

Недостатками этого метода являются неоднородность микроструктуры и твердости шаров. В результате при орошении водой при подстуживании градиент температуры по сечению шаров увеличивается. Кроме того, в

закалочной установке шары охлаждаются до температуры самоотпуска, что приводит к образованию недостаточного количества мартенсита в микроструктуре шаров и не позволяет им иметь особо высокую твердость.

Другой вариант термической обработки стальных компонентов — использование двухкамерной печи. В этом методе обрабатываемые материалы нагреваются в камере нагрева до температуры закалки, а затем охлаждаются как в масле, так и в безокислительной среде, или на воздухе в камере охлаждения печи. ОСТ 92-1311-77 Металлические и стальные детали Термическая обработка и технические требования (с Изменениями N 13, 14).

Недостатком этого метода является необходимость использования дополнительного оборудования для закалки деталей с использованием масла, а также необходимость дополнительных мер по охране и безопасности труда при работе с ним. Кроме того, это способ приводит к увеличению материальных затрат, трудозатрат и времени, а также к загрязнению окружающей среды горячим отработанным маслом, что снижает экологичность процесса.

Целью предлагаемого технического решения является разработка метода обработки деталей из стали, который обеспечивает технологичность и экологичность процесса при одновременном повышении качества материала, обрабатываемого.

Техническим результатом предлагаемого решения является улучшение технологичности и экологичности процесса обработки деталей из стали, а также улучшение показателей качества материала, полученного в процессе обработки.

В частности, повышение технологичности способа достигается за счет уменьшения времени цикла обработки в процессе производства и повышения безопасности способа при охлаждении детали с помощью масла.

В частности, способ является более экологически чистым благодаря процессу охлаждения деталей в замкнутой камере, который предотвращает загрязнение окружающей среды горячим отработанным маслом.

Улучшение показателей качества материала деталей достигается, в частности, за счет уменьшения в нем дефектных слоев, достижения оптимальных показателей прочности, твердости материала.

Заявляемый технический результат достигается тем, что способ термической обработки детали из стали характеризуется тем, что осуществляют ступенчатый нагрев детали в замкнутой камере нагрева вакуумной закалочной печи, при котором первоначально деталь загружают в камеру нагрева, температура в которой достигает 600°C , затем повышают температуру до 700°C и выдерживают деталь при данной температуре в течение 3-15 минут, затем повышают температуру до 800°C и выдерживают деталь при данной температуре в течение 3-15 минут, затем повышают температуру до $810-860^{\circ}\text{C}$ и выдерживают деталь в течение периода времени, равного 90-120 секунд на 1 мм сечения детали, затем осуществляют охлаждение детали в замкнутой камере охлаждения вакуумной закалочной печи с закалочным масляным баком с установленной мешалкой при температуре $30-80^{\circ}\text{C}$ в течение 5-25 минут и отпуск при температуре $150-175^{\circ}\text{C}$ в течение 2-4 часов. Предпочтительно после охлаждения детали проводят обработку холодом при температуре от -65°C до 0°C в течение 30-60 минут.

Термическая обработка стали включает ступенчатый нагрев детали в замкнутой вакуумной камере нагрева (лучше всего двухкамерной). Этот метод значительно сокращает время процесса и обеспечивает технологичность, так как деталь сначала грузят в камеру нагрева, где температура достигает 600°C .

Ступенчатый нагрев стали позволяет обеспечить равномерный нагрев садки в процессе обработки, что позволяет подготовить исходную микроструктуру к дальнейшим изменениям. Для этого деталь нагревают до 700°C и выдерживают при этой температуре в течение 3–15 минут, затем до 800°C и выдерживают в течение 3–15 минут. Объем обрабатываемой детали определяет точное время выдержки, но диапазон ограничен минимальным и максимальным значениями, которые могут быть использованы для внесения необходимых изменений в структуру материала, чтобы повысить показатели качества материала обрабатываемой детали.

Дополнительное повышение температуры до $810-860^{\circ}\text{C}$ и выдержка садки в течение 90–120 секунд на 1 мм сечения детали обеспечивает окончательный нагрев детали для проведения охлаждения и достижения необходимой микроструктуры и механических свойств за счет закалки, что

повышает качество материала обрабатываемой детали. Режим, работающий при температуре ниже указанного диапазона, может привести к уменьшению твердости детали, уменьшению качества материала и, следовательно, уменьшению прочности детали при работе в широком диапазоне температур. Кроме того, при температурах выше указанного диапазона наблюдается увеличение зерна аустенита, что приводит к крупноиглочатому мартенситу и увеличению количества остаточного аустенита. В результате прочность детали уменьшается, а качество материала, используемого для обработки, также ухудшается.

Нагрев детали в замкнутой камере нагрева (лучше всего двухкамерной) вакуумной печи позволяет нагревать деталь в среде, исключая окислительные процессы, что снижает вероятность появления дефектных слоев и увеличивает показатели качества материала детали. При использовании этого метода обработки глубина обезуглероженного слоя в процессе нагрева и охлаждения детали составляет 0-10 мкм, что в десять-двадцать раз меньше, чем в соляных и селитровых ваннах, а также в шахтных печах, где неизбежное окисление материала поверхности горячей детали при контакте с воздухом происходит. В результате этого метода обработки материал обрабатываемой детали является более качественным.

Кроме того, для обеспечения идентичности нагрева в замкнутой камере печи используется равномерное распределение температуры в печи с точностью $\pm 5^{\circ}\text{C}$. Это обеспечивает более равномерное нагревание обрабатываемой части и более точную реализацию заданных времен выдержки на технологических температурах (отсчет времени выдержки начинается после подхода на необходимую температуру, поскольку время подхода на необходимую температуру зависит от веса садок). Кроме того, равномерное распределение температуры в замкнутой камере вакуумной печи гарантирует, что обрабатываемая деталь нагревается равномерно, что сводит к минимуму изменения формы и размеров детали. Это увеличивает качество материала и обеспечивает технологичность предлагаемого метода.

Охлаждение детали в замкнутой камере охлаждения вакуумной закалочной печи с закалочным масляным баком с установленной мешалкой для

циркуляции масла при температуре 30-80°C в течение 5-25 минут обеспечивает равномерное охлаждение всей садки с необходимой скоростью для получения нужной микроструктуры материала, что увеличивает его показатели качества. Кроме того, охлаждение детали, согласно заявляемому способу, способствует получению необходимого объемного соотношения аустенита и мартенсита в структуре материала, и сведения к минимуму изменений геометрических параметров детали, вследствие разного удельного объема этих структур и возникновению напряжений в материале, что обеспечивает технологичность заявляемого способа, вследствие отсутствия необходимости дополнительной механической обработки детали. Охлаждение детали при температуре масла менее 30°C приводит к повышенным напряжениям в материале и изменению геометрических параметров детали за счет ее неравномерного охлаждения, что уменьшает технологичность способа вследствие необходимости дополнительной обработки детали для придания ей необходимой формы и размеров, а также уменьшает показатели качества материала. При этом охлаждение при температуре более 80°C приводит к неполному мартенситному превращению, что уменьшает твердость и повышает содержание остаточного аустенита, снижая прочность детали, тем самым уменьшая показатели качества материала обрабатываемой детали. Охлаждение в течение менее 5 минут также приводит к неполному мартенситному превращению с уменьшением показателей качества материала, а в течение более 25 минут приводит к увеличению длительности цикла охлаждения и, соответственно, всего цикла термообработки, что уменьшает технологичность способа. Осуществление охлаждения в замкнутой камере исключает загрязнение окружающей среды горячим отработанным маслом, что обеспечивает экологичность заявляемого способа, а также минимизирует его вредное воздействие на оператора, повышая безопасность и, следовательно, технологичность способа.

Отпуск при температуре 150–175 °С в течение двух–четырех часов обеспечивает переход нестабильной структуры мартенсита закалки в более стабильную структуру мартенсита отпуска. Это также стабилизирует остаточный аустенит и уменьшает внутренние напряжения в материале. Это также формирует окончательные параметры детали в соответствии с

требованиями отраслевой документации, что увеличивает качество материала обрабатываемой детали и технологичность процесса. Отпуск при температуре менее 150°C характеризуется повышенной твердостью и внутренними напряжениями материала, а также нестабильностью структурных компонентов. В результате уменьшается прочность детали и нестабильность ее размеров во время эксплуатации, что снижает качество материала. Отпуск при температуре выше 175°C снижает твердость детали, что снижает ее износостойкость и снижает показатели качества материала. Кроме того, уменьшение времени отпуска не устраняет внутренние напряжения в материале, что не позволяет получить желаемый комплекс механических свойств. В результате деталь становится менее прочной и износостойкой, а материал менее качественный. Кроме того, увеличение времени отпуска увеличивает цикл термообработки, но снижает технологичность метода.

После того, как деталь охлаждается, ее обрабатывают холодом при температуре от -65 градусов Цельсия до 0 градусов Цельсия в течение 30-60 минут для превращения остаточного аустенита в мартенсит. Это повышает показатели качества материала и стабилизирует геометрические размеры детали, что повышает технологичность предлагаемого метода.

Обработка холодом при температуре выше нуля может снизить твердость и прочность детали и снизить качество материала, поскольку происходит недостаточно полное превращение остаточного аустенита в мартенсит. Обработка холодом при температуре ниже -65°C нецелесообразна, поскольку при этой температуре завершаются мартенситные превращения. Кроме того, охлаждение в течение менее 30 минут приводит к тому, что оставшийся аустенит не превращается в мартенсит внутри детали, а только в поверхностных слоях материала. В результате деталь становится менее прочной и твердой, что также снижает общий уровень качества материала. Охлаждение холодом более 60 минут увеличивает время цикла обработки холодом и ухудшает технологичность метода. Кроме того, результаты обработки не повлияют, потому что мартенситные превращения происходят при определенной температуре за этот период времени.

Осуществление процесса термообработки в вакуумной закалочной печи и перемещение детали между камерами нагрева и охлаждения происходит автоматически и занимает короткий промежуток времени, что не позволяет произвести подстыванию детали, соответственно сохраняется ее поверхностная твердость, что увеличивает показатели качества материала, сокращается технологический цикл, исключаются трудоемкие вспомогательные операции по извлечению и перемещению детали на другое оборудование, что обеспечивает технологичность заявляемого способа, а также исключаются вредные факторы воздействия на оператора и окружающую среду, что обеспечивает экологичность и повышает безопасность процесса.

Заявляемый способ термической обработки детали из стали предпочтительно использовать для детали, изготовленной из стали ШХ15, характеризующейся составом, масс. %: углерод 0,95 - 1,05, кремний 0,17 – 0,37, марганец 0,20 – 0,40, хром 1,30 - 1,65, сера – не более 0,02, фосфор - не более 0,027, никель - не более 0,30, медь - не более 0,25, титан - не более 0,01, железо – остальное; или из стали ШХ15СГ, характеризующейся составом, масс. %: углерод 0,95- 1,05, кремний 0,40 – 0,65, марганец 0,90 – 1,20, хром 1,30 -1,65, сера - не более 0,02, фосфор - не более 0,027, никель – не более 0,30, медь - не более 0,25, титан – не более 0,01, железо – остальное. Способ может быть применен также для обработки детали, изготовленной из сталей марок, ШХ15-Ш, ШХ15-В, ШХ15-ШД, ШХ15СГ-Ш, отличающихся способом получения.

Особенно актуален заявленный способ при обработке колец и тел качения подшипников и может быть произведен, в частности, с использованием вакуумной двухкамерной закалочной термической печи СМDe9 производства Seco/Warwick или аналогичного оборудования, обеспечивающим поддержание заявляемых технологических параметров.

«Деталь подвергают ступенчатому нагреву в замкнутой камере вакуумной печи, при котором первоначально деталь загружают в камеру нагрева, температура в которой достигает 600°C, затем повышают температуру до 700°C и выдерживают деталь при данной температуре в течение 3-15 минут, затем повышают температуру до 800°C и выдерживают деталь при данной температуре в течение 3-15 минут, затем повышают температуру до 810-860°C

и выдерживают деталь в течение периода времени, равного 90-120 секунд на 1 мм сечения детали, затем осуществляют охлаждение детали в закалочном масляном баке с установленной мешалкой для циркуляции масла с температурой 30-80°C в течение 5-25 минут и отпуск при температуре 150-175°C в течение 2-4 часов» [32].

Результаты эксперимента, проведенного на базе ООО «ВЗСП», были подтверждены положительными результатами лабораторий. Они подтвердили, что соответствие требованиям нормативно-технической документации, стандартам металлографического контроля и контролю твердости деталей во время обработки.

Обработка колец и тел качения подшипников из этих марок сталей позволяет достичь технологических свойств по микроструктуре и твердости, соответствующих требованиям отраслевых нормативных документов. Соблюдение требований внутриотраслевой документации, регулирующей качество термической обработки, гарантирует сокращение обезуглероженного слоя до 20 раз по сравнению с классической технологией при обработке деталей из указанных марок сталей.

Представленный пример реализации метода не исчерпывает возможные варианты реализации и не ограничивает каким-либо образом объем предлагаемого технического решения. В рамках заявленной формы возможны дополнительные способы выполнения и применения.

Анализируя вышеописанный патент, можно сделать вывод, что у данного метода есть перспектива сочетания с термосиловой обработкой низкоуглеродистых легированных стальных изделий. Данная идея может привести к повышению качества термосиловой обработки, что сходится с целью магистерской диссертации.

1.3 Этапы развития методик анализа с помощью метода конечных элементов

«Долгое время предпринимались попытки решить проблемы механической резки с помощью метода конечных элементов. Модель О. С.

Зенкевича была одним из первых подходов к разработке конечно-элементной модели производства стружки. Его модель была основана на методе нагружения металлической заготовки инструментом, который воздействовал на стружку, уже созданную в модели и показанную на рисунке 4. Этот метод был сильно идеализирован, поскольку реальный процесс образования стружки связан со значительными перемещениями, и была решена упрощенная упругопластическая задача о поведении тела определенной формы при заданных постоянных перемещениях одной из его поверхностей» [36].

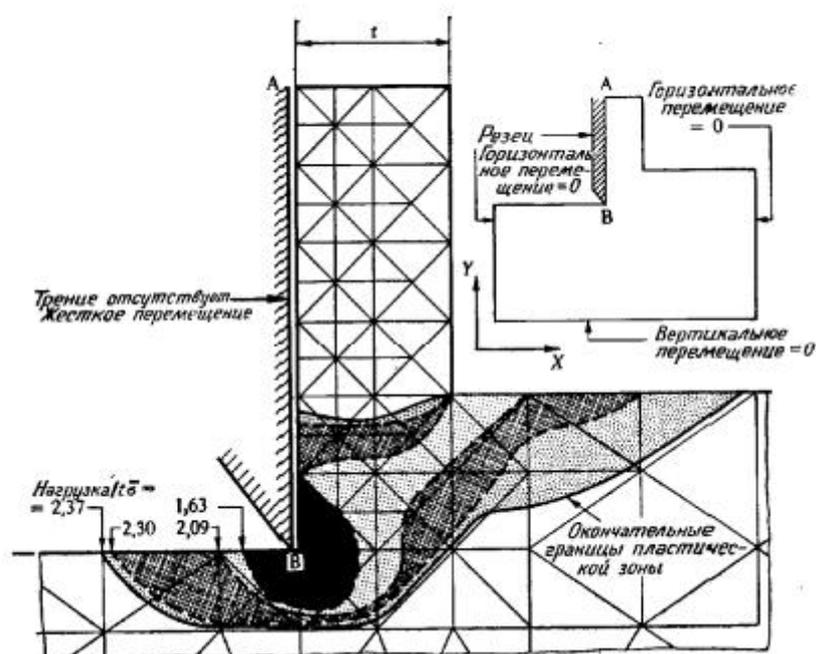


Рисунок 4. Приближенное описание процесса обработки металла путем задания эквивалентных перемещений в месте среза по Зенкевичу

«Очевидно, что при определенных движениях нагрузка увеличивается до определенных постоянных значений из-за идеальной пластичности материала. В данном случае возникает критическое состояние, соответствующее отделению стружки. В рассматриваемом примере полезен только последний этап. Когда инструмент подвергается воздействию стружки, пластические течения вдоль основной плоскости сдвига могут быть определены при небольших деформациях благодаря упругопластическому анализу» [46].

«Эта работа представляет в первую очередь исторический интерес и имеет множество ограничений. Наиболее существенным недостатком является то, что форма стружки predetermined, в то время как целью моделирования и анализа процесса образования стружки часто является прогнозирование формы стружки. К другим недостаткам относится отсутствие учета трения между инструментом и стружкой, скорости деформации, тепловых потоков, напряжений в материале и т.д» [23].

«Ученые Т. Сиракаши и Э. Усуи сняли некоторые ограничения первого метода в 1976 году. В своих работах они разработали итерационный метод изменения формы этой стружки до тех пор, пока не произойдет пластическое течение в соответствии с заданной формой, сохраняя при этом преимущества расчетов до тех пор, пока инструмент воздействует на предварительно отформованную стружку» [37].

«На начальной итерации инструмент продвигается к стружке, оказывает на нее давление и заставляет ее узлы двигаться с заданной скоростью. В данном случае для анализа упругопластических свойств применяется метод Лагранжа. Поле узловых скоростей используется для вычисления скоростей деформации элементов сетки в направлении пластического течения, как только расчеты показывают, что пластическая деформация завершена. Путем интегрирования скорости деформации в направлении поперечной линии через соответствующие промежутки времени рассчитываются деформации. Учитывая температурные свойства материала, расчет температуры основан на действии сил трения и внутренней работы. Инструмент и стружка разгружаются, и цикл воздействия инструмента на стружку повторяется. Напряжения текучести изменяются в соответствии с определенными значениями деформации, скорости деформирования и температуры. Этот процесс повторяется до тех пор, пока не будут достигнуты требуемые значения скорости деформации и температуры раствора» [39].

«На следующем шаге линии течения, которые были заданы изначально, изменяются с использованием поля деформации, чтобы приблизить их к прогнозируемому значению деформации. Пока заявленное и расчетное поля деформации не совпадут, весь цикл повторяется несколько раз. Кроме того, до

определенного момента форма начальной трещины не влияет на форму скола. Исследование подтвердило применимость алгоритмов, а также достаточную близость результатов расчетов и экспериментов» [13].

«Преимущество метода МИК заключалось в том, что он хорошо согласовался с экспериментом. Впоследствии этот метод был применен для исследования механической обработки низколегированных сталей, действия смазочных материалов и возникновения наростов» [24].

С ростом вычислительной мощности компьютеров в середине 1980-х годов впервые был проведен динамический анализ процесса образования стружки, начиная с момента контакта режущих поверхностей инструмента с обрабатываемой деталью и заканчивая отделением стружки, в полном соответствии с реальными условиями.

По этим причинам был использован модифицированный метод Лагранжа для упругопластического анализа. Этот метод разрушает связи между элементами сетки, чтобы выполнить отделение стружки под действием режущего клина. Возможными условиями, при которых это происходит, являются получение максимальной энергии, возникновение экстремальных деформаций или максимальное смещение узловых точек. Преимущество этого метода заключается в моделировании процесса резания различных материалов при одновременном моделировании формы стружки.

«Методы исследования нестационарных процессов, таких как периодическое создание чипов или кратковременные переходные процессы, начали появляться в 90-х годах прошлого века. Область деформации, окружающая режущую кромку инструмента, теперь впервые может быть точно изучена благодаря внедрению адаптивного сетчатого механизма и трехмерному анализу» [14, с. 701].

«Подходы к решению задач жесткой пластики были разработаны одновременно с разработкой решений упругопластических задач для нестационарных процессов в трех измерениях. Программное обеспечение с адаптируемой сеткой было разработано для моделирования как жестких, так и упругопластических материалов, которые использовались для имитации процесса производства стружки. По сравнению с другими методами, при

которых сетка не фиксировалась в пространстве или на обрабатываемой детали, метод адаптивной сетки продемонстрировал более высокую эффективность. Однако основой всех созданных вычислительных методов оставался МИК» [15, с. 202].

Система ANSYS, представляющая собой универсальное программное обеспечение для расчета методом конечных элементов, используется для анализа в нескольких областях техники, включая теплофизику, динамику жидкостей и газов, электромагнитное поле и прочность. Это позволяет использовать одну и ту же модель для решения аналогичных задач, таких как определение прочности при термической нагрузке, и разрабатывать инструменты для описания реакции системы на различные физические воздействия. При условии использования соответствующих моделей и методов расчета ANSYS является первым универсальным комплексом для определения прочности МКЭ, сертифицированным в соответствии со стандартами ISO 9000, 9001, гарантирующим правильность и надежность расчетов.

Компьютерная модель или CAD-модель конструкции, изделия или одного из его компонентов может быть создана с помощью программы ANSYS. Также могут быть применены действующие силы или другие расчетные нагрузки, а также могут быть исследованы реакции системы различной физической природы, такие как распределение напряжения и температуры и электромагнитные поля. Оптимизируя проектные разработки на ранних этапах, программа снижает стоимость изделий. Все это способствует сокращению продолжительности цикла разработки, который включает в себя создание опытных образцов, их тестирование, а затем изготовление новых образцов. Это также устраняет необходимость в дорогостоящем процессе доработки продукта. С помощью ANSYS можно найти файлы потенциальных проектов или выбрать оптимальное решение до начала производства.

В ANSYS могут быть учтены многочисленные конструктивные нелинейности. Задача о контакте поверхностей может быть проанализирована, и допускаются большие (конечные) углы деформации и поворота. Также возможно параметрическое моделирование и адаптивная перестройка сетки в процессе решения.

«По информации выше можно сделать вывод, что для моделирования сложного процесса термосиловой обработки логично использовать программный комплекс ANSYS, так как он, несмотря на то что не может передать структурные изменения в стали, может показать необходимый результат по напряжением и деформациям, в чем и является суть метода конечных элементов» [16, с. 501].

Исходя из всего вышесказанного, можно прийти к выводу, что метод конечных элементов можно использовать также и для процесса термосиловой обработки, чтобы в конечном итоге получить модель и методику, которые можно использовать для повышения эффективности технологического процесса.

Проведя анализ информации, изложенной в 1-й главе, можно сделать следующие выводы:

- перед термосиловой обработкой, для повышения качества изготавливаемых маложестких валов, необходимо проводить другие операции, как например способ винтовой прокатки, для повышения механических свойств круглых профилей;

- использование перспективной технологии термической обработки, которая позволит в сочетании с методом термосиловой обработки позволит улучшить конечный результат всего технологического процесса;

- для усовершенствования процесса термосиловой обработки можно разработать методику и формирования остаточных напряжений с использованием метода конечных элементов, который обладает всеми возможностями и достижениями на современном этапе развития. Метод конечных элементов позволит усовершенствовать технологический процесс не столько со стороны привнесения новых и перспективных технологий, сколько со стороны повышения эффективности уже устоявшихся технологических процессов путем сокращения сроков и затрат на освоение новой техники, уменьшение затрат, связанных с отработкой технологических процессов изготовления деталей и сборки изделий, повышение надёжности, долговечности и эксплуатационной пригодности изделий.

2. Исследования процесса термосиловой обработки

2.1 Анализ процесса термосиловой обработки

Длинномерные валы малой жесткости изготавливаются из материала, состоящего из прутков, которые имеют значительную кривизну. В аэрокосмической промышленности, точной механике, автомобилестроении и в качестве специального инструмента они широко используются. Валы этого типа имеют неправильную форму и демонстрируют малую жесткость в определенных направлениях и поперечных сечениях.

«Опыт производства таких элементов как в промышленных условиях, так и в коротких сериях показывает, что методы, обычно используемые при обработке жестких деталей, неэффективны при производстве деталей с малой жесткостью» [17, с. 243]. «Они увеличивают количество времени, необходимого для механической обработки, но не обеспечивают требуемого качества готовых изделий. Валы с низкой жесткостью становятся все более распространенными в различных станках и механизмах, особенно в прецизионных установках» [18, с. 95]. Увеличение объема производства этих деталей можно объяснить постоянными улучшениями в методах расчета прочности, оптимизацией формы и конструкции валов и сокращением количества сырья, необходимого для их изготовления.

При изготовлении этих деталей существуют значительные проблемы из-за различий в конструктивных параметрах длиномерных валов малой жесткости. «Эти проблемы связаны с низкой устойчивостью к вибрациям, большими упругими и пластическими деформациями, возникающими на всех этапах их механической обработки, сборки и эксплуатации. Кроме того, механическая обработка является сложной и трудноуправляемой из-за значительного влияния технологической наследственности на эксплуатационную надежность, коробления полуфабрикатов, вызванного неравномерным остаточным напряжением, возникающим на всех этапах механической обработки, и низкой термической стабильности деталей» [19, с. 402].

В результате этих факторов производство длинных валов низкой жесткости становится менее эффективным. Это может привести к дефектам формы, размеров и свойств поверхности изделий, снижению производительности и КПД механической обработки, недостаточному использованию потенциала точности станка и снижению срока службы оснастки. В конечном счете, все это приводит к тому, что изготавливаемые валы являются более низкого качества. В любой технологической системе самым слабым элементом является обработанная деталь. На каждом этапе технологического процесса заготовка имеет дефекты формы и размеров из-за значительной упругой и пластической деформации.

«Исследования методов повышения эффективности и качества готовых изделий, изготовленных традиционным способом, а также результаты исследований по их промышленному применению показывают, что процессы механической обработки могут быть ускорены за счет: выбора технологических параметров и режимов обработки, позволяющих получить требуемую точность валов; создание сплавов с высокой размерной стабильностью, которые имеют относительно низкие и стабильные коэффициенты теплового расширения и высокий модуль упругости; а также использование соответствующих операций стабилизирующей обработки» [20].

Поскольку изменения формы и размеров обрабатываемой детали изменяют входные параметры, а прецизионные станки становятся менее надежными, при обработке валов малой жесткости требуются сложные технологические операции стабилизации. Недостатком, который влияет на процесс обработки, является коробление, или искривление оси обрабатываемой детали. «Следовательно, для повышения точности и стабильности геометрической формы заготовки вала необходимо создать подходящий метод, который сочетает процессы правки и термообработки» [21].

Изменение размеров материала в процессе обработки или хранения может быть вызвано сложными механическими состояниями материала в процессе термообработки в сочетании с различными фазовыми состояниями, через которые он проходит. После термообработки также может произойти свободное деформирование, обычно в определенном направлении (например,

изгиб или растяжение), до того, как фазовые переходы и неупругие деформации произойдут.

Чтобы избежать деформации малоэластичных валов при термообработке под нагрузкой, необходимо создать соответствующие условия для пластической деформации или фазового превращения. Например, сталь теряет свою прочность на растяжение и подвергается незначительной деформации при мартенситном превращении. При температуре закалки поле остаточных напряжений снижается до нуля и становится равномерным по сечению заготовки, а слой, упрочненный холодной обработкой, исчезает. Когда материал охлаждается со снятой нагрузкой, не выполняется условие соответствия пластически-упругих деформаций, поэтому поддерживать такое состояние материала при охлаждении до температуры окружающей среды технологически сложно. В этом случае требуется оценка технологических особенностей процесса подготовки заготовки к термообработке. После правки и механической обработки заготовки геометрические характеристики должны оставаться в рамках полуфинишных допусков.

Неточная обработка приводит к неравномерным деформациям в сечении и по длине заготовки. Особенно это касается эксцентриситета заготовки, который представляет собой разницу между теоретической и реальной осями процесса. Изгибающий момент создается при нагрузке, когда поперечное сечение неравномерно.

В результате неравномерного распределения напряжений по диаметру изогнутых сегментов заготовки на деталь действует внутренний момент, который необходимо уравновесить внешним изгибающим моментом. Этот момент возникает, когда центр тяжести поперечного сечения сегмента вала смещается относительно линии, вдоль которой действует растягивающая сила. В этом случае изгибающий момент, создаваемый внешними силами, равен (2):

$$M = F_{oc} - y_e, \#(2)$$

где F_{oc} – осевая сила

y_e - абсолютное значение "части" конечной кривизны, которая может быть представлена известными величинами (3):

$$y_e = \frac{J \cdot E_y}{r_k \cdot S \cdot \sigma}, \#(3)$$

«где J – момент инерции.

y_e – это только та "часть" конечной кривизны, которая остается после правки. Основная "часть" конечной кривизны формируется в результате релаксации остаточных напряжений и неупругих эффектов после снятия внешней растягивающей нагрузки. Ранее изогнутые участки вала частично восстанавливают свою кривизну, так как снятие растягивающих усилий сопровождается снятием изгибающего момента возникающие под действием этих сил» [22].

Согласно исследованиям осевой деформации вала, конечная кривизна вала зависит от начальной кривизны заготовки, физико-механических свойств материала заготовки и технологии изготовления. Таким образом, технологические процессы обработки валов малой жесткости можно проектировать различными способами, учитывая характеристики исходного материала.

Метод, сочетающий правку и термообработку, позволяет повысить точность и стабильность геометрической формы деталей. По сути, метод заключается в приложении осевой деформации (напряжения) к валу во время нагрева (при температуре закалки) и выравнивании заготовки относительно приспособления на этапе охлаждения, при этом вал остывает в несколько раз быстрее, чем приспособление. На рисунках 5 и 6 показаны приспособление для закрепления 1 и заготовка 2, а также их характеристики нагрева и охлаждения.

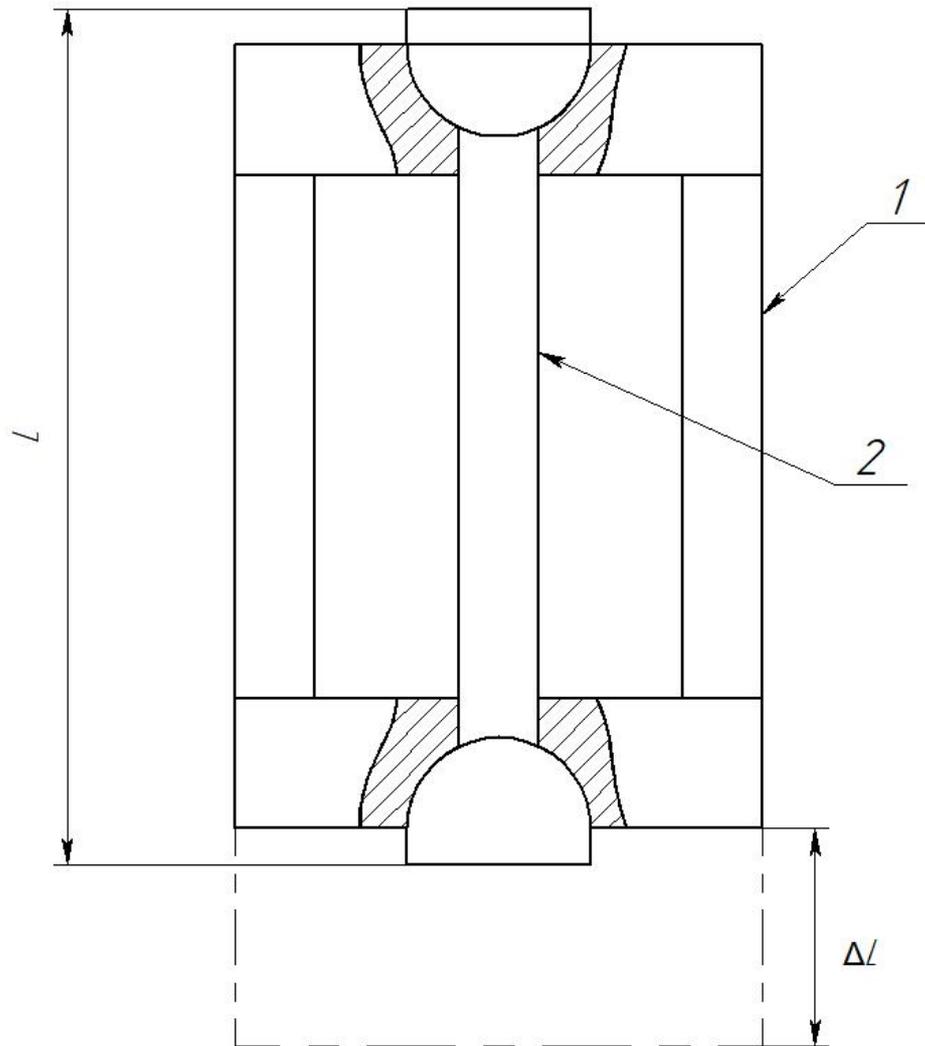


Рисунок 5. Схематическое изображение установки для процесса термосиловой обработки.

При теоретических расчетах предполагалось, что синусоиды описывают кривизну оси заготовки (4):

$$y = \frac{\alpha \cdot \sin \pi \cdot x}{L}, \#(4)$$

Изменение длины полуфабриката определяется следующим уравнением (5):

$$\Delta L = \frac{\pi^2 \cdot y_a^2}{4L}, \#(5)$$

где α – начальный прогиб.

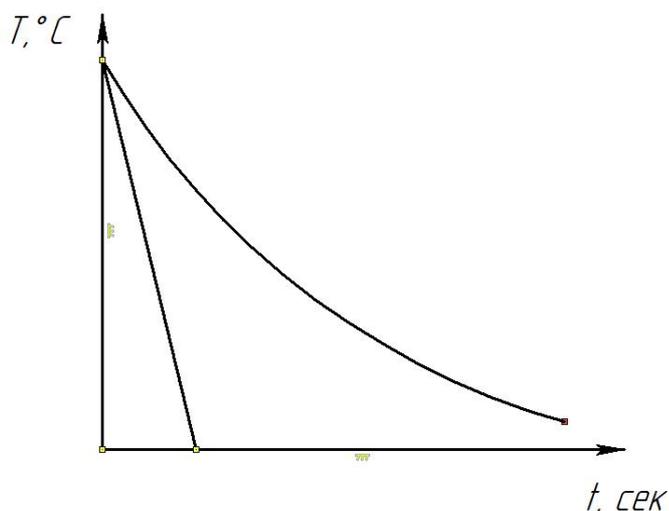


Рисунок 6. Отношение между температурой охлаждения заготовки и стапеля.

В описанном методе, вал деформируется при нагреве с заданной скоростью, определенной для используемой технологии термообработки. Приспособление удлиняется в большей степени, чем заготовка, пропорционально разнице в их коэффициентах линейного расширения, и охлаждается в 1,5-3 раза медленнее, чем вал. Это позволяет стабилизировать осевую нагрузку в начале охлаждения и постепенно снимать нагрузку. При расчете типичных процессов необходимо решить проблему нестационарной теплопроводности, т.е. для определения зависимости между изменением температуры и количеством тепла, передаваемого во времени в любой точке тела. Дифференциальное уравнение теплопроводности для твердых тел имеет следующий вид (6):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \#(6)$$

Чтобы решить уравнение (6), следующие граничные условия должны быть определены:

- начальное распределение температуры в материале
- воздействие внешней среды на поверхность тела, которое может быть определено путем
 - измерения температуры поверхности
 - измерение количества тепла, проходящего через поверхность
 - измерение температуры окружающей среды и расчет коэффициента теплопередачи γ .

Решением уравнения (6) является функция, которая должна удовлетворять всем граничным условиям. Исходя из второй теоремы подобия, искомая функция, имеющая вид безразмерной температуры в различных точках тела, может быть представлена в виде (7):

$$\frac{Q}{Q_0} = f\left(B_i; F_0; \frac{x}{X}\right), \#(7)$$

где $\frac{Q}{Q_0} = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_{2H}}$ – 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);

$B_i = \frac{a}{\lambda} X$ – критерий Био;

$F_0 = \frac{a t}{X^2}$ – критерий Фурье;

a – коэффициент теплопроводности, м²/сек;

t – время, сек

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

Вал можно представить в виде бесконечно длинного цилиндра радиусом R , и в этом случае дифференциальное уравнение теплопроводности имеет вид (8):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 Q}{\partial t^2} + \frac{\partial Q}{t \partial t} \right), \#(8)$$

Если коэффициенты теплового расширения заготовки и крепежного элемента одинаковы, то осевая деформация может быть получена (в соответствии с расчетами) как разница между длинами конструкции и заготовки или путем соответствующего выбора скорости их охлаждения.

Тогда осевое напряжение определяется следующей формулой (9):

$$\sigma_r = \alpha_T \cdot \Delta T \cdot E \cdot \frac{S_{заг}}{S_{ст}}, \#(9)$$

где T – разница в температурах между заготовкой и стапелем,

α_t – разница в коэффициентах линейного расширения.

На первом этапе охлаждения вала, закрепленного на станке, когда разница температур между ними наибольшая, величина малых предельных деформаций заготовки равна сумме (10) упругих деформаций ε_y , пластических деформаций $\varepsilon_{пл}$ и температурных деформаций ε_t : (11)

$$\varepsilon_{\Sigma} = \varepsilon_y + \varepsilon_{пл} + \varepsilon_t, \#(10)$$

$$\varepsilon_T = \int_{T_0}^{T_1} \alpha_T(T) dT, \#(11)$$

В предлагаемой технологии термообработки, которая предполагает применение осевой деформации, устраняются напряжения, оставшиеся от предыдущих операций, независимо от свойств используемого материала. Однако охлаждение растянутого стержня, закрепленного в приспособлении, приводит к возникновению новых растягивающих напряжений, которые равномерно распределяются по поперечному сечению заготовки. Уровень предельных напряжений определяется по формуле (12):

$$\sigma = E(\varepsilon_y + \varepsilon_{пл} + \varepsilon_t), \#(12)$$

Во время охлаждения внешняя часть заготовки охлаждается быстрее, чем внутренняя, что означает, что напряжения в поверхностных слоях будут противоположного знака по сравнению с напряжениями внутри заготовки. После полного остывания заготовки знаки напряжений меняются на противоположные. Основное преимущество предлагаемой технологии заключается в том, что напряжения на внешней стороне заготовки одинаковы по знаку, что предотвращает деформацию заготовки. Дальнейшая механическая обработка при равномерном удалении металла относительно оси вала не приводит к деформации.

2.2 Исследования напряженно-деформированного состояния вала после термосиловой обработки

Ранее были приведены теоретические зависимости термосиловой обработки. Теперь для дальнейшего составления более правильного алгоритма моделирования процесса термосиловой обработки, который будет описан в следующей главе, необходимо привести исследования напряженно-деформированного состояния вала после перераспределения остаточных напряжений. В одном из таких исследований [34], авторами которых являются О.И. Драчев, Д.Ю. Воронов, Д.А. Расторгуев, приведены три системы, в которых вал в процессе обработки, описан как реологическая модель.

Механическая модель n -го элемента заготовки, показанная на рисунке 7, получается с использованием реологических звеньев. Особенностью модели является использование пластического элемента для описания перехода от упругой области диаграммы «напряжение — относительное перемещение» к пластической деформации. Температурные модели для двух зон нагружения включают температуру на вход, а температурные напряжения или просто удлинения на выход.

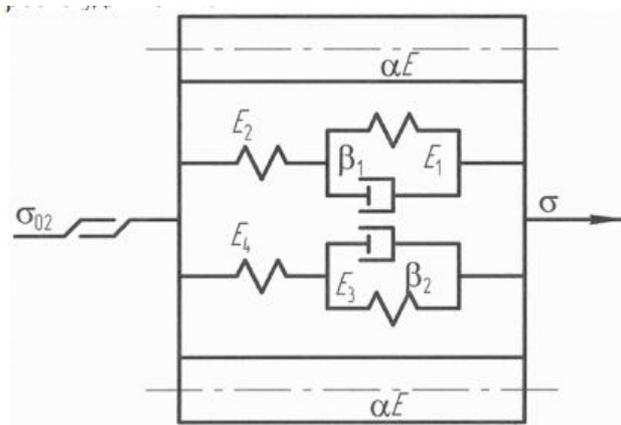


Рисунок 7. Механическая модель n – го элемента обрабатываемой детали.

В первой системе модель описана, как передаточная функция, с помощью теории автоматического управления в виде следующей системы (13):

$$W_1(S) = \frac{\varepsilon(S)}{\sigma(S)} = \frac{k_1(1 + T_2S)}{1 + T_1(S)} ; W_2(S) = \frac{\varepsilon_1^T(S)}{T(S)} = k_2; \#(13)$$

$$W_3(S) = \frac{\sigma_1^T(S)}{T(S)} = E\alpha = k_3; W_4(S) = \frac{\varepsilon_2(S^I)}{\varepsilon_{1\Sigma}(S)} = \mu = k_4$$

$$W_5(S) = \frac{\sigma_1^I(S)}{\varepsilon_2(S)} = \frac{E}{u}$$

«где $T_1 = \beta/E_2$, $T_2 = \beta/E_1E_2$ – постоянные времени, первый коэффициент последствия, с;

k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 – коэффициенты усиления;

μ - коэффициент Пуассона.

Входом модели является осевое напряжение и температура, а выходами продольная и поперечная деформация ε_1 и ε_2 » [36].

Результат аналитического исследования представлен на рисунке 8.

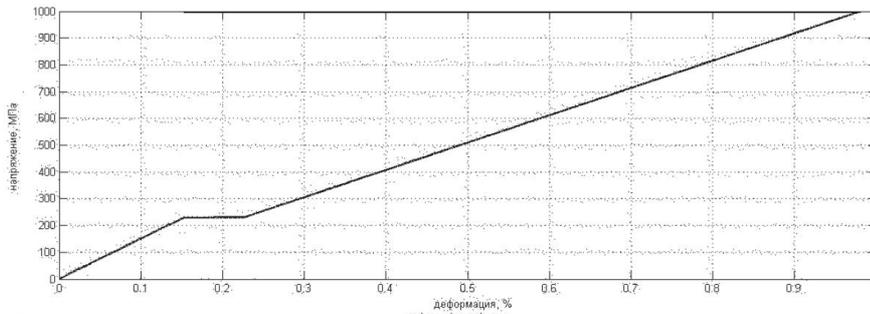


Рисунок 8. Результат моделирования объекта управления с помощью теории автоматического управления.

Вторая система (14), результат которой представлен на рисунке 9, используется при деформировании металлов с небольшими скоростями нагружения напряжения мало зависят от скорости деформации:

$$\sigma(t) = 2 \cdot A \cdot \left[\varepsilon(t) - \int_0^{\infty} \varepsilon_{\tau} f(\tau) d\tau \right], \#(14)$$

$$\varepsilon_{\tau} = 0, \sqrt{2(\varepsilon - \varepsilon_{\tau}) \cdot (\varepsilon - \varepsilon_{\tau})} < \tau$$

$$\varepsilon_{\tau} \neq 0, \frac{\tau}{V_{\tau}} \varepsilon_{\tau} = \varepsilon - \varepsilon_{\tau}$$

«где A – модуль упругости, Мпа;

$\varepsilon(t)$, ε_{τ} , ε_{τ} – относительная деформация, относительная пластическая деформация и ее скорость, c^{-1}

V_{τ} – интенсивность скоростей пластической деформации, c^{-1} ;

τ – безразмерный предел текучести;

$f(\tau)$ – плотность вероятностного распределения безразмерных пределов текучести, которая определяется из опытов на растяжение» [32].

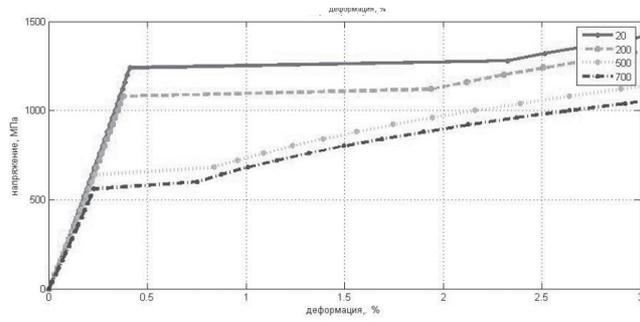


Рисунок 9. Результаты моделирования по системе (14) при температурах 20, 300, 500, 700 °С

Следующей моделью, результат которой показан на рисунке 10, для описания процесса служит модель Прандтля с упрочнением, чтобы учесть деформационное упрочнение металлов при пластическом деформировании и её реологическое уравнение имеет вид (15):

$$\sigma(t) = 2 \cdot E \cdot \left[\varepsilon(t) - \int_0^\infty \varepsilon_\tau(\tau) d\tau \right], \quad (15)$$

$$\varepsilon_\tau = 0, \quad \sqrt{2(\varepsilon - (1 + q)\varepsilon_\tau) \cdot (\varepsilon - (1 + q)\varepsilon_\tau)} < \tau$$

$$\varepsilon_\tau \neq 0, \quad \frac{\tau}{V_\tau} \varepsilon_\tau + (1 + q)\varepsilon_\tau = \varepsilon - \varepsilon_\tau$$

где $q = D/E$ – коэффициент упрочнения.

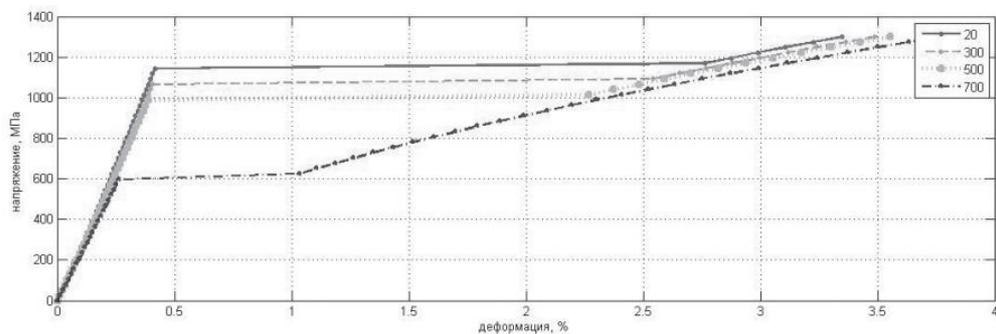


Рисунок 10. Результаты моделирования по системе (15) при температурах 20, 300, 500, 700 °С

У каждой из этих систем есть общие участки:

- участки, при которых напряжение возрастает во время нагрузки вала;
- участки, при которых напряжение выравниваются и медленно увеличивается во время разгрузки вала.

Исходя из всей описанной информации можно сделать следующие выводы:

- приведен анализ термосиловой обработки, который показывает сущность процессов, происходящих в ней, необходимый для;
- также приведены результаты моделирования валов, которые в будущем будут использоваться как показатели для дальнейшего моделирования и анализа процесса термосиловой обработки в программном комплексе Ansys, а также разработки методики;
- термосиловая обработка, исходя из исследований, доказала свою эффективность в перераспределении остаточных напряжений и деформаций.

3. Проведение анализа методом конечных элементов

3.1 Метод конечных элементов применительно к процессу термосиловой обработки

«Метод конечных элементов (МКЭ) используется для решения дифференциальных уравнений с частными производными и интегральных уравнений в технике и прикладной физике. В первых публикациях решались проблемы распространения тепла с помощью метода конечных элементов. Впоследствии метод конечных элементов был значительно расширен для задач механики и гидравлики. Он широко используется для решения задач гидродинамики, электродинамики, теплообмена и механики деформируемого твёрдого тела. Совершенствование вычислительной техники позволило ускорить выполнение многих сложных численных расчётов, что привело к этому прогрессу» [12].

«Основная идея метода конечных элементов заключается в том, что любую непрерывную величину, такую как температура, сила, перемещение или напряжение, можно смоделировать с помощью дискретной модели, которая основана на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей» [29].

«В основе метода конечных элементов лежит представление континуального твердого тела с бесконечным числом степеней свободы в виде ряда конечных элементов, соединенных между собой в узловых точках. Данное представление показано на рисунке 11» [33].

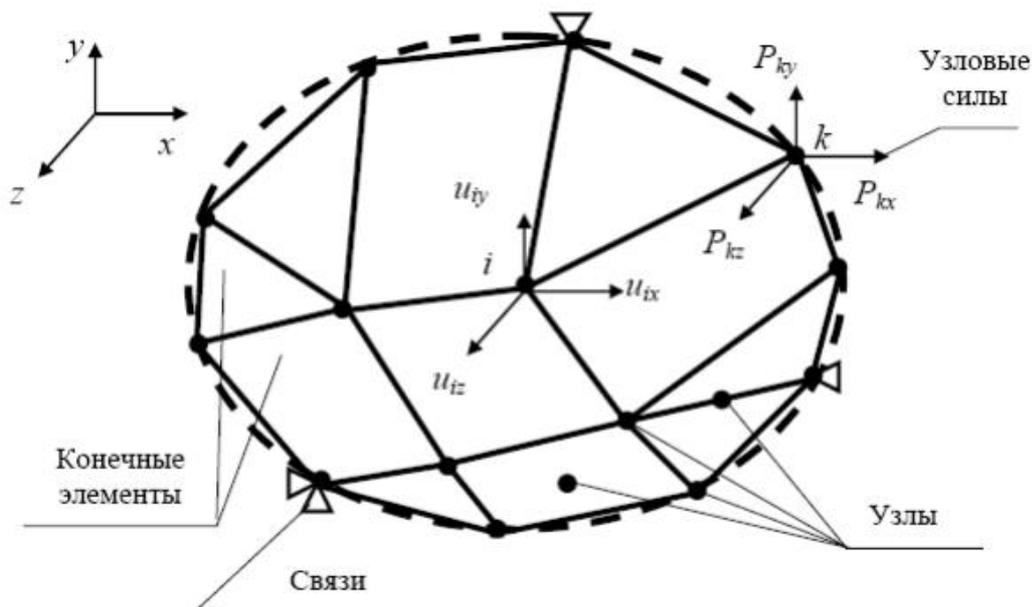


Рисунок 11. Разбиение твердого тела на конечные элементы

«В методе конечных элементов различают линейные и нелинейные модели. Причём линейность и нелинейность могут относиться как к геометрии модели, так и к материалу, из которого она сделана. Если модель подвергается незначительным деформациям в результате нагрузок, она считается линейной, если связь между деформациями и напряжениями линейна и соответствует закону Гука. Большие деформации напряжения, характерные для процесса термосиловой обработки, сопровождаются более сложными законами взаимосвязи деформаций, которые отражены в формуле (16):

$$\{u\} = [F]\{a\}, \#(16)$$

где $\{u\}$ – вектор узловых перемещений;

$[F]$ – координатная матрица;

$\{a\}$ – вектор неизвестных коэффициентов» [36].

«В дальнейшем все соотношения метода конечных элементов выражаются через узловые перемещения (17), которые и являются неизвестными:

$$\{u\} = [N]\{u_i\}, \#(17)$$

где $\{u_i\}$ – вектор узловых перемещений;

$[N]$ – матрица функций формы» [13].

«Деформации внутри конечного элемента определяются соотношениями Коши (18):

$$\begin{aligned}\{\varepsilon\} &= [A]\{u\} = [B]\{u_i\}, \#(18) \\ [B] &= [A][N]\end{aligned}$$

где $[A]$ – матрица операций дифференцирования.

Напряжения связаны с деформациями закона Гука (19):

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} = [D][B]\{u_i\}, \#(19)$$

где $[D]$ – матрица упругости, определяемая свойствами материала.

Для узлов сетки конечных элементов вводят вектор узловых сил $\{P_i\}$ и вектор узловых перемещений $\{u_i\}$ (20):

$$\{p_i\} = \begin{Bmatrix} p_{xi} \\ p_{yi} \\ p_{zi} \end{Bmatrix}, \{u_i\} = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{Bmatrix}. \#(20)$$

При разработке методов теории упругости, более эффективным оказывается переход от дифференциальной к вариационной постановке решения задач» [39]. «В частности, согласно принципу Лагранжа, можно записать условие минимума полной потенциальной энергии тела в вариационной пост (21):

$$\delta \mathcal{E}(u) = 0, \#(21)$$

где $\mathcal{E} = W - A$ – полная потенциальная энергия, равная разности потенциальной энергии деформации и работы внешних сил соответственно.

Тогда, на возможных перемещениях получается следующее выражение (22) и (23):

$$\delta W = \iiint_V \{\delta \varepsilon\}^T \{\sigma\} dV = \iiint_V \{\delta u_i\}^T [B]^T [D][B] \{u_i\} dV, \#(22)$$

$$\delta A = \iint_F \{\delta u_i\}^T \{p_i\}, \#(23)$$

После подстановки (22), (23) в (21) получается основная формула метода конечных элементов (24):

$$[K]\{u_i\} = \{p_i\}, \#(24)$$

$$[K] = \iiint_V [B]^T [D][B] dV$$

где $[K]$ – матрица жесткости элемента» [23].

«Глобальная матрица жесткости совокупности конечных элементов, объединенных сеткой, получается методом непосредственного сложения соответствующих жесткостей отдельных элементов в узлах, где они соединяются между собой.

В результате полученная система линейных уравнений состоит из $M = N \times n$ линейных алгебраических уравнений, где N - число узлов в сетке конечных элементов; n - число степеней свободы одного узла.

Решением такой системы уравнений является вектор узловых перемещений» [23].

«Рассмотрим основные физические зависимости, применяемые для моделирования поведения материалов с нелинейными свойствами в процессе конечно-элементного анализа и деформаций. Наибольший интерес представляют соотношения, которые могут быть использованы для лучшего понимания процесса термосиловой обработки и последующего моделирования этого процесса» [25].

«Так, для большинства металлов и сплавов, суммарную деформацию объекта при механическом и температурном воздействии на него можно представить следующей формулой (25):

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon^y\} + \{\varepsilon^m\} + \{\varepsilon^{пл}\}, \#(25)$$

где $\{\varepsilon\}$ – вектор суммарной деформации;

$\{\varepsilon^y\}$ – вектор упругой деформации;

$\{\varepsilon^m\}$ – вектор температурной деформации;

$\{\varepsilon^{пл}\}$ – вектор пластической деформации.

Для определения остаточных деформаций получим (26):

$$\{\varepsilon^{ост}\} = \{\varepsilon\} - \{\varepsilon^y\}, \#(26)$$

где $\{\varepsilon^{ост}\}$ – вектор остаточных деформаций» [23].

«Таким образом, для расчёта (27) остаточных деформаций необходимо знать величину пластических и температурных деформаций:

$$\{\varepsilon^{ост}\} = \{\varepsilon^m\} - \{\varepsilon^{пл}\}, \#(27)$$

Деформации и напряжения связаны следующей зависимостью (28):

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon^H\}, \#(28)$$

где $\{\sigma\} = [\sigma_x \sigma_y \sigma_z \sigma_{xy} \sigma_{yz} \sigma_{xz}]$ – компоненты тензора напряжений;

$\{D\}$ - матрица упругости;

$\{\varepsilon^H\}$ - вектор деформаций, которые вызывают возникновение напряжений.

При линейной зависимости напряжений от деформации (на упругом участке) вектор деформации $\{\varepsilon^H\}$ соответствует вектору $\{\varepsilon^y\}$ (29):

$$\{\varepsilon^H\} = \{\varepsilon^y\} = \{\varepsilon\} - \{\varepsilon^m\} - \{\varepsilon^{pl}\}, \#(29)$$

Вектор полной (суммарной) деформации $\{\varepsilon\}$ можно представить следующим образом (30):

$$\{\varepsilon\} = [\varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_z \varepsilon_{xy} \varepsilon_{xz} \varepsilon_{yz}]^T, \#(30)$$

где $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yz}, \varepsilon_{xz}$ – деформации в направлении соответствующих осей координат» [26, с. 211].

«Вектор температурной деформации $\{\varepsilon^m\}$ записывают следующим образом (31):

$$\{\varepsilon^m\} = \Delta T [\alpha_x \alpha_y \alpha_z 0 0 0]^T, \#(31)$$

где $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ – коэффициенты температурного расширения материала в направлении соответствующих осей координат (вектор $\{\alpha\}$);

ΔT – определяется как разница температур в интересующей точке T и температуры T_0 , при которой деформации отсутствуют, т. е. $\Delta T = T - T_0$.

Для коэффициентов α , зависящих от температуры, действует следующее соотношение (32):

$$\alpha(T) = \alpha_0(T) + \frac{T_p - T_0}{T - T_p} (\alpha_0(T) - \alpha_0(T_p)), \#(32)$$

где T_p – температура, для которой заданы начальные значения физико-механических свойств материала» [45].

«Для пластичных материалов дополнительно должен быть указан закон изменения пластичности, в виде описания кривой упрочнения $\sigma = f(\{\varepsilon\})$, и предел текучести материала σ_m . В момент, когда $\sigma = \sigma_m$ начинаются пластические деформации» [40].

«Вектор пластической деформации $\{\varepsilon^{пл}\}$ записывают следующим образом (32):

$$\{\varepsilon^{пл}\} = f(\{\sigma\}), \#(32)$$

Например, для стали кривую упрочнения можно записать так (33):

$$\{\varepsilon^{пл}\} = 0,002 \left(\frac{\{\sigma\}}{\{\sigma_m\}} \right)^n, \#(33)$$

где n – показатель, определяемый из условия, что кривая проходит через точку, соответствующую пределу текучести материала σ_e » [27].

«Таким образом, учитывая уравнения (25) и (28), получаем (34):

$$\{\varepsilon^{ост}\} = \Delta T \{\alpha\} + f(\{\sigma\}), \#(34)$$

для остаточных напряжений получается (35):

$$\{\sigma^{ост}\} = \{\sigma\} - [D] \{\varepsilon^y\}, \#(35)$$

для упругих деформаций получается (36):

$$\{\varepsilon^{ост}\} = \{\sigma\} [D]^{-1}, \#(36)$$

Полученные соотношения можно раскрыть и представить в развёрнутом виде, через компоненты векторов. Обычно для напряжений и деформаций принято следующее правило знаков: величины, относящиеся к растяжению, являются положительными, к сжатию – отрицательными. Компоненты сдвига считаются положительными, если их направления совпадают с направлениями

соответствующих координатных осей. Деформации сдвига представляют собой инженерные деформации, а не компоненты тензора» [41].

«Если переписать равенство (36) в развёрнутом виде, то получим шесть уравнений, представленных далее (37) – (42):

$$\varepsilon_x = \alpha_x \Delta T + \frac{\sigma_x}{E_x} - \frac{\nu_{xy} \sigma_y}{E_x} - \frac{\nu_{xz} \sigma_z}{E_x}, \#(37)$$

$$\varepsilon_y = \alpha_y \Delta T - \frac{\nu_{xy} \sigma_x}{E_x} + \frac{\sigma_y}{E_y} - \frac{\nu_{yz} \sigma_z}{E_y}, \#(38)$$

$$\varepsilon_z = \alpha_z \Delta T - \frac{\nu_{xz} \sigma_x}{E_x} + \frac{\nu_{yz} \sigma_y}{E_y} - \frac{\sigma_z}{E_z}, \#(39)$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{G_{xy}}, \#(40)$$

$$\varepsilon_{yz} = \frac{\sigma_{yz}}{G_{yz}}, \#(41)$$

$$\varepsilon_{xz} = \frac{\sigma_{xz}}{G_{xz}}, \#(42)$$

где ε_x – деформация в направлении оси X,

ε_{xy} – деформация сдвига в плоскости XY,

σ_x – напряжения в направлении оси X,

σ_{xy} – напряжения сдвига в плоскости XY» [28].

«Подобные развёрнутые уравнения можно получить и для напряжений (43) - (48):

$$\sigma_x = \frac{E_x}{h} \left(1 - \nu_{yz}^2 \frac{E_z}{E_y} \right) (\varepsilon_x - \alpha_x \Delta T) + \frac{E_y}{h} \left(\nu_{xy} + \nu_{xz} \nu_{yz} \frac{E_z}{E_y} \right) (\varepsilon_y - \alpha_y \Delta T) + + \frac{E_z}{h} (\nu_{xz} + \nu_{yz} \nu_{xy}) (\varepsilon_z - \alpha_z \Delta T), \quad (43)$$

$$\sigma_y = \frac{E_y}{h} \left(\nu_{xy} + \nu_{xz} \nu_{yz} \frac{E_z}{E_y} \right) (\varepsilon_x - \alpha_x \Delta T) + \frac{E_y}{h} \left(1 - \nu_{yz}^2 \frac{E_z}{E_y} \right) (\varepsilon_y - \alpha_y \Delta T) + + \frac{E_z}{h} (\nu_{xz} + \nu_{yz} \nu_{xy}) (\varepsilon_z - \alpha_z \Delta T), \quad (44)$$

$$\sigma_y = \frac{E_y}{h} \left(\nu_{xy} + \nu_{xz} \nu_{yz} \frac{E_z}{E_y} \right) (\varepsilon_x - \alpha_x \Delta T) + \frac{E_y}{h} \left(1 - \nu_{yz}^2 \frac{E_z}{E_y} \right) (\varepsilon_y - \alpha_y \Delta T) + + \frac{E_z}{h} (\nu_{xz} + \nu_{yz} \nu_{xy}) (\varepsilon_z - \alpha_z \Delta T), \quad (45)$$

$$\sigma_{xy} = G_{xy}\varepsilon_{xy}, \#(46)$$

$$\sigma_{yz} = G_{yz}\varepsilon_{yz}, \#(47)$$

$$\sigma_{xz} = G_{xz}\varepsilon_{xz}, \#(48)$$

Если модули сдвига G_{xy} , G_{yz} , G_{xz} не задаются при вводе, то их значения вычисляются следующим образом (49):

$$G_{xy} = G_{yz} = G_{xz} = \frac{E_x}{2(1 + \nu_{xy})}, \#(49)$$

Аналогичным образом получают уравнения для определения остаточных напряжений, пластических, температурных и остаточных деформаций» [42]. «Представленные соотношения реализованы в расчётных алгоритмах большинства программ конечно-элементного анализа, например в ANSYS, в виде математического описания элементов сетки. Таким образом, используя метод конечных элементов можно достаточно точно смоделировать различные явления и процессы, руководствуясь соотношениями теории упругости и пластичности, реализованными в математическом аппарате программ конечно-элементного анализ. Причём задача расчётчика заключается в подготовке расчётных моделей и правильном выборе нужного типа элемента, поддерживающих соответствующие физические соотношения и модели материалов. Все математические преобразования и решение уравнений производится автоматически» [44].

3.2 Методика проведения расчета в Ansys

На основе метода конечных элементов создана методика для реализации расчета процесса остаточных напряжений и деформаций во время термосиловой обработки. Она включает в себя внешний модуль программы, который позволяет интегрировать системы CAD-CAE (Catia-ANSYS), которое

упрощает использование метода конечных элементов и обеспечивает удобство для технолога, автоматизируя этот процесс.

Для проведения эксперимента, как уже оговаривалось ранее, будем использовать программный комплекс Ansys. Для начала необходимо получить валы различных параметров для того, чтобы зависимость от этих самых параметров была более явной. Также этих параметров будет зависеть нагрузка, которая будет приложена к валам. Для этого построим электронные модели валов со следующими характеристиками с помощью CAD-системы(Catia), интерфейс которой приведен на рисунке 12:

- 2 вала с соответствующей длиной 500 мм. и 700 мм, с диаметром 20 мм;
- материалы 12X18Н10Т и сталь 40Х
- также вал создан со значительной кривизной, чтобы можно было примерное воссоздать состояние заготовки до термосиловой обработки.

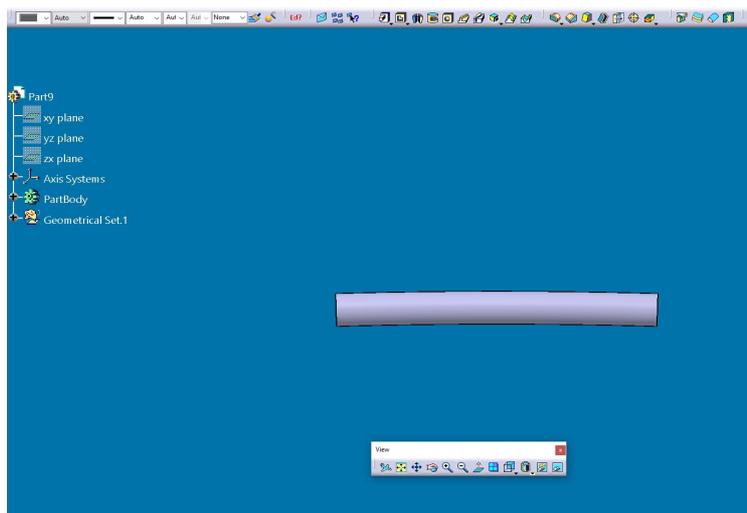


Рисунок 12. Интерфейс CAD-комплекса Catia V5

В стационарном тепловом анализе не существует значимого временного масштаба для решения проблемы. В другой формулировке фраза о внутренней энергии опущена. В Ansys можно указать приращение времени и период времени, но они не соотносятся с реальным временем. Масштаб применяемых граничных условий и потоков изменяется только линейно в зависимости от периода времени.

Время и шаг являются важными параметрами в термическом анализе переходных процессов, который больше похож на явную процедуру структурного анализа, в отличие от стационарного термического анализа. Термический анализ переходных процессов требует разбивки исследования на небольшие этапы, чтобы точно зафиксировать поведение, зависящее от времени. Поскольку переходное решение в конечном счете сводится к стационарному, практически любой анализ, который может быть выполнен как стационарный, также может быть выполнен как анализ переходных процессов. Однако это крайне неэффективно, поэтому обычно предпочтительнее, если проблему можно решить просто с помощью стационарного термического анализа.

Далее для проведения анализа используется Transient Structural для того, чтобы можно было задавать нагрузку для каждого этапа. Стационарный анализ не будет использоваться, потому что статический стационарный анализ измеряет смещения, напряжения, деформации и давления, которые нагрузки, вызывающие минимальное демпфирование и инерцию, создают в конструкциях или их компонентах и чаще всего используются в условиях статической нагрузки, которые остаются постоянными с точки зрения времени и местоположения.

Transient Structural, в свою очередь, проводится для того, чтобы выяснить, как конструкция будет вести себя в динамике при воздействии любой общей нагрузки, зависящей от времени. Его можно использовать для расчета перемещений, деформаций, напряжений и сил, которые изменяются со временем в конструкции, когда она реагирует на любые переходные нагрузки. Эффекты инерции или демпфирования считаются значительными из-за времени загрузки.

Для проведения эксперимента с достаточно сложным сдвоенным процессом, который протекает в две фазы(нагрузка и разгрузка), в котором нас интересует то, как протекают процессы и остаточные напряжения и деформации при меняющейся нагрузке и температуре, то соответственно надо использовать анализ Transient, так как он, как уже раньше говорилось, позволяет разбивать процесс на шаги, задавать время и отслеживать то, как

идет процесс в разное время. Также для одновременного термического и осевого нагружения можно воспользоваться двумя способами:

- методом сдвоенного анализа;
- экспорт данных с помощью тензоров напряжений.

У каждого из этих методов есть свои преимущества и недостатки. Для первого режима плюсом является то, что он параметрически связан и позволяет быстро менять параметры процесса и геометрии, но есть шанс того, что при разных режимах нагружения могут возникнуть разные ошибки. При втором режиме можно использовать разные режимы нагружения с противоположными знаками, использовать полученный результат как геометрию для последующего анализа, но этот метод требует большего времени для настройки и переноса тензоров напряжений. В качестве основного варианта возьмем метод сдвоенного анализа, так как при втором варианте непонятно как будут вести себя данные при экспортировании – сможет ли их прочитать программный комплекс или нет. В работе будут использоваться оба метода, для того чтобы можно было перенести результаты анализа первой фазы нагрузки во вторую фазу разгрузки. На рисунке 13 показано дерево проекта для данного вид обработки.

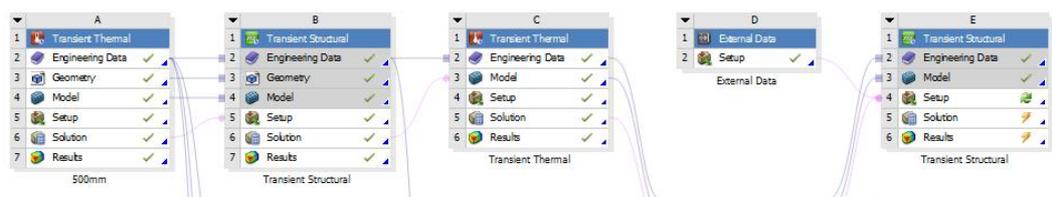


Рисунок 13. Дерево для проекта

Сперва необходимо построить сетку конечных элементов, при этом надо помнить, что точность расчетов будет зависеть от выбора размера сетки, типа конечного элемента. «ANSYS предлагает два основных метода: построение упорядоченной сетки и построение произвольной сетки. Практика расчётов с использованием метода конечных элементов [47] и [48] показывает, что упорядоченная сетка предпочтительнее, причем прямоугольная сетка более

выгодна, чем сетка с треугольными элементами. Там, где ожидается большой градиент деформации или напряжений (например, из-за концентраторов, трещин или разрывов связей элементов), требуется мелкая сетка. В областях, не представляющих особого интереса для расчёта, а также в областях с мало изменяющимися относительными деформациями или напряжениями, может быть использована крупная сетка. С точки зрения физики процесса тип элемента должен соответствовать решаемой задаче, а также иметь соответствующее математическое описание и степень свободы. Таким образом, необходимо использовать несколько элементов и моделей, ориентированных на свою задачу, чтобы выполнить конечно-элементный анализ процесса термосиловой обработки» [43].

При использовании программного обеспечения для анализа конечных элементов ANSYS для трехмерного моделирования процесса термосиловой обработки вала, важно, чтобы различные материалы были правильно присвоены соответствующим свойствам материала, а правильная передача свойств материала влияет на точность результатов моделирования. Для эксперимента для вала будут использоваться 2 материала: 12X18H10T и сталь 40X. Химический и механические свойства данных материалов приведены в таблицах 1-4.

Таблица 1. Химический состав Сталь 40X

Наименование	Массовая доля
C	0,42-0,5%
Si	0,17-0,37%
Mn	до 0,25%
Ni	до 0,04%
S	до 0,25%
Cr	до 0,25%
Cu	до 0,25%
As	до 0,08%
Fe	97%
P	до 0,035%

Таблица 2. Химический состав стали 12X18H10T

Наименование	Массовая доля
C	до 0,12%
Si	до 0,8%

Продолжение таблицы 2.

Наименование	Массовая доля
Mn	до 2%
Ni	9-11%
S	до 0,02%
Cr	17-19%
Cu	до 0,3%
Ti	0,4-1%
Fe	до 67%
P	до 0,035%

Таблица 3. Механические свойства стали 40X

Модуль упругости E, ГПа	Коэффициент Пуассона	Предел текучести, МПа	Плотность, кг/м ³
1,98	0,3	275	7820

Таблица 4. Механические свойства стали 12X18H10T

Модуль упругости E, ГПа	Коэффициент Пуассона	Предел текучести, Мпа	Плотность, кг/м ³
2,14	0,3	245	7920

Также при настройке материалов учитывался параметр коэффициент линейного расширения, так как без него не получится провести правильный анализ. Также нужно учитывать меняющийся с температурой модуль упругости и другие

характеристики и вязкоупругость, чтобы в конце процесса можно было увидеть релаксацию изделия. На рисунках 14-17 продемонстрированы данные по материалам.

Properties of Outline Row 3: st40x				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
3	Density	7820	kg m ⁻³	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
5	Coefficient of Thermal Expansion	Tabular		
6	Scale	1		
7	Offset	0	C ⁻¹	
8	Zero-Thermal-Strain Reference Temperature	22	C	
9	Isotropic Elasticity	Tabular		
10	Derive from	Young's Modulus and Poisso...		
11	Young's Modulus: Scale	1		
12	Young's Modulus: Offset	0	Pa	
13	Poisson's Ratio: Scale	1		
14	Poisson's Ratio: Offset	0		
15	Bulk Modulus: Scale	1		
16	Bulk Modulus: Offset	0	Pa	
17	Shear Modulus: Scale	1		
18	Shear Modulus: Offset	0	Pa	
19	Tensile Yield Strength	275	MPa	
20	Compressive Yield Strength	275	MPa	

Рисунок 14. Настройка материала Стали 40X в Ansys

Table of Properties Row 5: Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
	A	B
1	Temperature (C)	Coefficient of Thermal Expansion (C ⁻¹)
2	100	1,19E-05
3	200	1,25E-05
4	300	1,32E-05
5	400	1,38E-05
6	500	1,41E-05
7	600	1,44E-05
8	700	1,46E-05
*		

Рисунок 15. Настройка коэффициента линейного расширения для Стали 40X.

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	7920	kg m^-3		
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
4	Coefficient of Thermal Expansion	Tabular			
5	Scale	1			
6	Offset	0	C^-1		
7	Zero-Thermal-Strain Reference Temperature	22	C		
8	Isotropic Elasticity	Tabular			
9	Derive from	Young's Modulus and Poisso...			
10	Young's Modulus: Scale	1			
11	Young's Modulus: Offset	0	Pa		
12	Poisson's Ratio: Scale	1			
13	Poisson's Ratio: Offset	0			
14	Bulk Modulus: Scale	1			
15	Bulk Modulus: Offset	0	Pa		
16	Shear Modulus: Scale	1			
17	Shear Modulus: Offset	0	Pa		
18	Alternating Stress Mean Stress	Tabular			
22	Strain-Life Parameters				
30	Tensile Yield Strength	240	MPa		

Рисунок 16. Настройка материала 12X18H10T в Ansys

Table of Properties Row 4: Coefficient of Thermal Expansion

	A	B
1	Temperature (C)	Coefficient of Thermal Expansion (C^-1)
2	100	1,65E-05
3	200	1,7E-05
4	300	1,72E-05
5	400	1,75E-05
6	500	1,79E-05
7	600	1,82E-05
8	700	1,89E-05
*		

Рисунок 17. Настройка коэффициента линейного расширения для 12X18H10T

Также учитывается предел прочности, как фактор после который целесообразность дальнейшего расчета, и теплопроводность материала, чтобы в напряжениях и деформациях также учитывалось распространение тепла.

Также необходимо использовать модуль External Data, чтобы внести с помощью него вносить информацию о напряженно-деформированном состоянии.

Данные, которые были приведены выше, позволят провести анализ с учетом тепловых деформаций и напряжений при последующем нагружении. Похожий анализ, с учетом всех характеристик, был проведен в статье «Использование метода конечных элементов для моделирования процесса

термосиловой обработки». Сертификат, подтверждающий публикацию, представлен на рисунке А.1, Приложение А.

3.3 Моделирование процесса в Ansys и результаты

Суть термосиловой обработки заключается в том, что за счет осевой нагрузки и последующей разгрузки при повышенных температурах, выравниваются деформации и напряжения. Следовательно, основным параметром термосиловой обработки является осевая нагрузка, которая происходит за счет удлинения стапеля, которая находится по формуле (50):

$$F = \frac{E \cdot S \cdot (\alpha_{тр} \cdot L_{тр} - \alpha_{в} \cdot L_{в}) \Delta T}{L}, \#(50)$$

где E – модуль нормальной упругости, Па;

S – площадь поперечного сечения, м²;

$L_{тр}$ – длина трубы, мм;

$L_{в}$ – длина вала, мм;

$\alpha_{тр}$ – коэффициент линейного расширения трубы, 10⁻⁶ 1/°С;

$\alpha_{в}$ – коэффициент линейного расширения вала, 10⁻⁶ 1/°С;

ΔT – разница между конечной и начальной температурой ТСО, °С.

Но у этой силы P есть два ограничения:

– напряжения, создаваемые осевой нагрузкой, должны превышать предел текучести при заданной температуре, чтобы был положительный эффект от обработки;

- также напряжения, создаваемые силой P , не должны превышать предел прочности.

Для данного вида обработки, чтобы достичь эффективности также необходимо регулировать температуру обработки. Чтобы воспроизвести данный процесс, необходимо аналогичным способом приложить силу по направлению оси вала в ту сторону, чтобы он подвергся растяжению. Это

делается для того, чтобы воссоздать процесс того, как вал растягивается за счет теплового расширения ступелей.

Первая фаза нагружения вала, в которой будет показан нагрев вала и осевое растяжение вдоль оси вала, будет происходить в десять шагов. Данная схема приложения силы показана на рисунке 18.

Вторая фаза разгрузки вала, в которой будет происходить охлаждение вала и также осевое растяжение, только в обратном направлении в отличии. Также в Ansys необходимо будет добавить ещё две точки фиксации, которые необходимы для симулирования зажатия его в ступеле. Для второго этапа, в отличии от первого, необходимо использовать не лицевые поверхности для задания места приложения силы, а вершины конечных элементов сетки, чтобы при деформации учитывались только незакрепленные места на поверхности вала. Данная схема показана на рисунке 19.

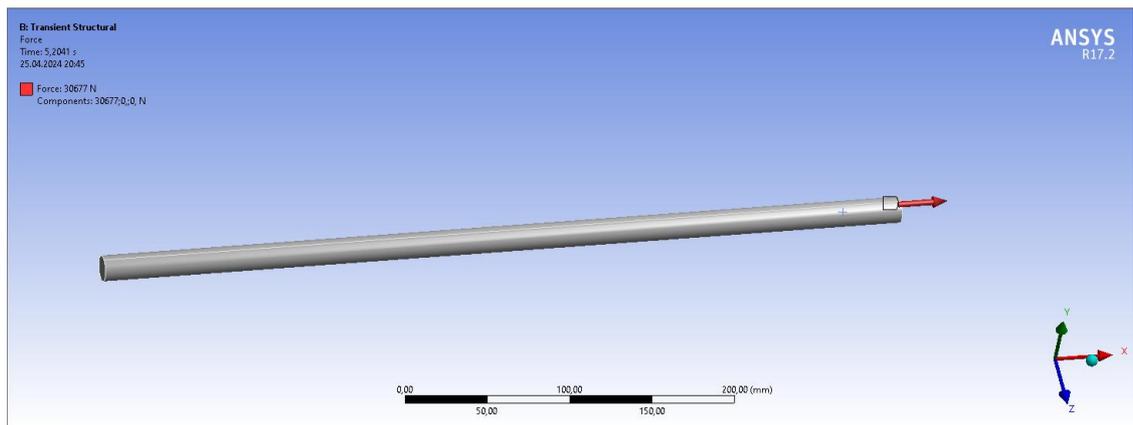


Рисунок 18. Схема нагружения вала на первой фазе термосиловой обработки

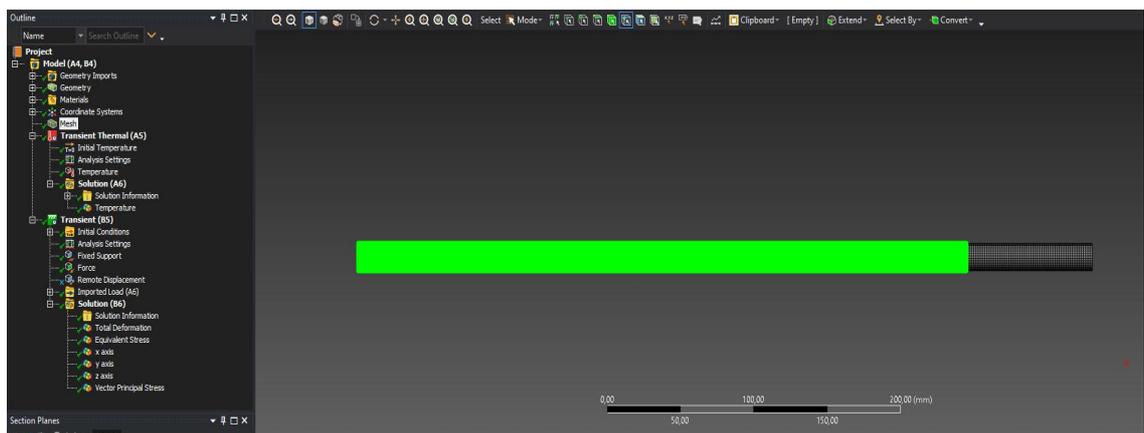


Рисунок 19. Схема нагружения на второй фазе термосиловой обработки

Также будет учтено напряженно-деформированное состояние вала первой фазы с помощью экспорта данных в виде тензоров напряжений, как показано на рисунке 20. На рисунке 21 показан результат импортирования напряжений. Далее можно будет увидеть, что он с небольшой погрешностью сочетается с результатами, когда температура достигает 300 °С. Соответственно это состояние можно использовать для моделирования второго этапа термосиловой обработки – разгрузки.

Node Number	SX (MPa)	SY (MPa)	SZ (MPa)	SXY (MPa)	SYZ (MPa)	SXZ (MPa)
1	138,04	-12,524	-11,57	31,668	-8,8383	29,965
2	97,271	-28,015	-28,142	-10,755	-0,68178	-11,172
3	107,38	-24,982	-22,861	-23,296	-2,1073	-14,197
4	94,139	-29,525	-29,318	-7,1585	-0,11626	-2,2888
5	94,51	-29,406	-29,118	8,752	-0,19027	3,4482
6	98,533	-26,657	-28,568	-1,8973	0,15807	17,93
7	94,475	-29,183	-29,336	5,5102	0,1827	-7,4307
8	102,2	-27,304	-24,855	-21,445	-0,9351	-7,202
9	99,505	-28,243	-26,196	-19,143	0,18611	1,7047
10	110,42	-20,66	-24,976	-11,705	2,1054	28,153
11	106,73	-21,911	-26,676	-1,4438	0,18676	27,544
12	106,18	-23,653	-25,401	-15,194	2,0795	22,437
13	108,21	-21,345	-25,794	6,7388	1,1086	-27,605
14	110,36	-24,712	-20,966	-27,494	2,4563	13,583
15	109,21	-26,045	-20,562	-29,465	0,63634	3,259
16	111,48	-25,375	-19,441	-30,712	-1,2178	-6,0747
17	114,95	-23,618	-18,351	-30,787	-2,8713	-13,426
18	118,42	-21,42	-17,863	-29,774	-4,1757	-19,515
19	113,98	-21,266	-21,356	-23,123	-3,5998	-23,277
20	107,32	-22,353	-25,739	11,618	-1,9855	25,901
21	117,29	-16,399	-23,782	-9,8574	-2,371	-33,671
22	104,48	-23,572	-26,737	-8,3126	-1,2314	-23,825
23	111,11	-19,346	-25,634	-2,0526	-0,41613	-31,019
24	101,26	-26,927	-25,993	17,978	1,3079	-12,562
25	104,95	-23,973	-25,787	13,608	1,6961	-21,316
--	---	---	---	---	---	---

Рисунок 20. Пример экспортируемого файла с тензорами напряжений с составляющими по осям X, Y, Z.

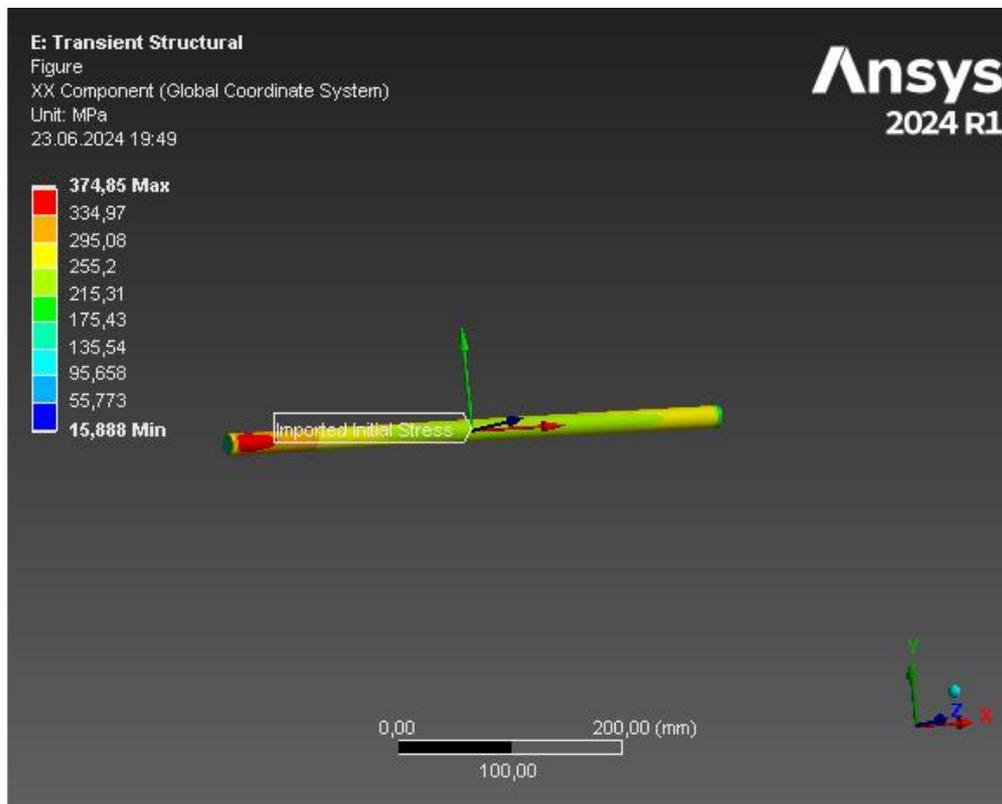


Рисунок 21. Результат импортирования напряжений после процесса нагрузки вала

Другим граничным условием является закрепление заготовки. В первой фазе процесса термосилового обработки закрепление заготовки происходит зажимами. В Ansys данное закрепление будет реализовано за счет наложения Fixed Support именно на торец вала заделки, чтобы не происходило ошибок при расчете. Данная схема показана на рисунке 22. Во второй фазе процесса необходимо закрепление с двух торцов вала, чтобы зафиксировать состояние вала, когда в нём возникают сжимающие усилия, которые возникли из-за охлаждения вала. Схема закрепления на второй фазе термосилового обработки показана на рисунке 23.

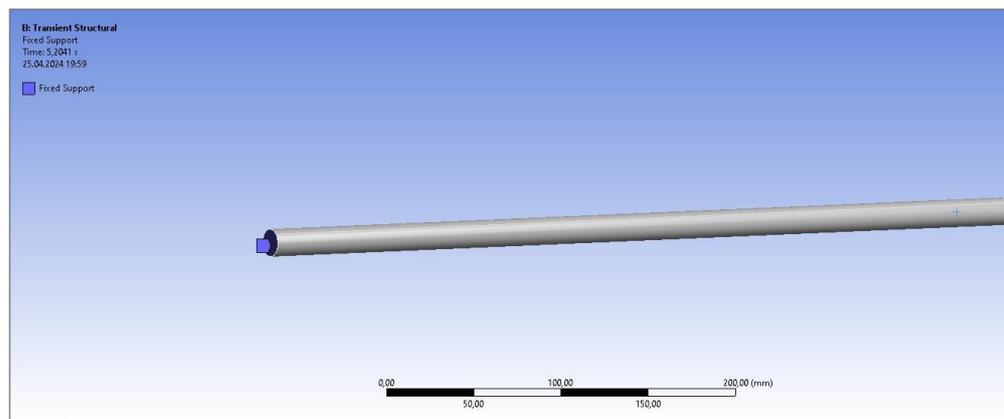


Рисунок 22. Схема закрепления вала на первой фазе термосиловой обработки

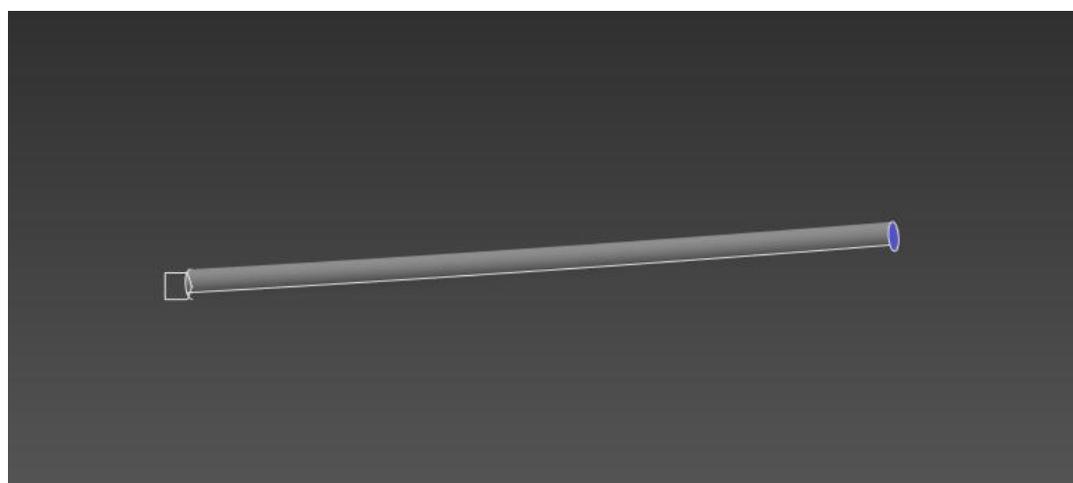


Рисунок 23. Схема закрепления вала на второй фазе термосиловой обработки

Также важным параметром для Transient анализа является шаг. Он нужен для того, чтобы для на каждом этапе протекающего процесса можно было показать остаточные напряжения и деформации. Для этого на каждом шаге необходимо задать температуру и усилие, но мы зададим на первом, пятом и последнем шагу, благодаря чему данные значения равномерно аппроксимируются на каждом шаге. Данные для шагов термосиловой обработки показаны на рисунках 24 и 25. Также в конце процесса будет выделено пару шагов для релаксации напряжений.

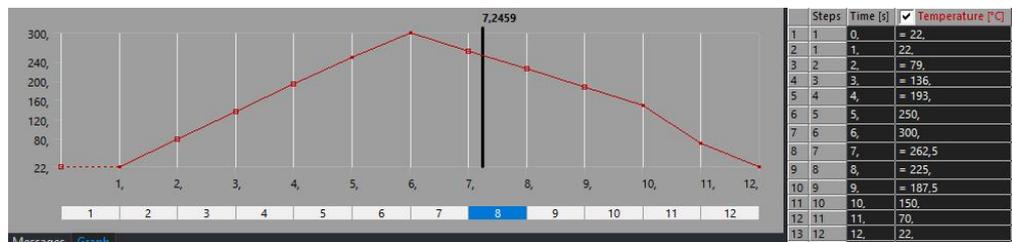


Рисунок 24. Температуры на каждом шаге термосиловой обработки

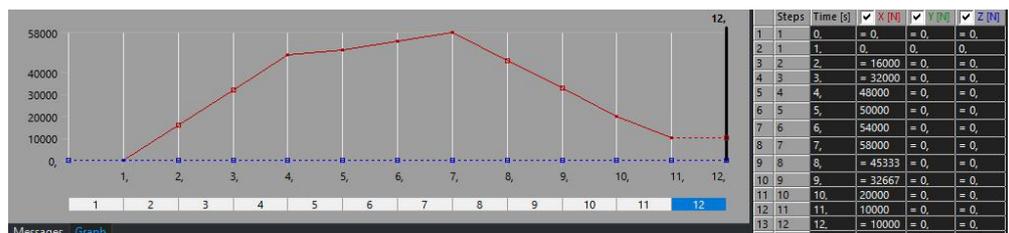


Рисунок 25. Нагрузки на каждом шаге термосиловой обработки

Как говорилось выше, необходимо также построить конечно-элементную сетку. Для сетки будем использовать конечный элемент в виде гексаэдров из-за того, что при анализе методом конечных элементов шестигранные элементы обычно считаются более точными, чем тетраэдрические, по ряду причин. На самом деле, одной из основных причин является то, что формы этих двух типов элементов отличаются друг от друга. Поскольку у шестигранных элементов больше ребер и узлов, чем у других типов элементов, они лучше отображают градиенты и сложные формы внутри элемента. В результате поведение исследуемого материала отображается более точно. Шестигранные компоненты также могут более точно описывать сложные деформации благодаря большему порядку интерполяции. С другой стороны, у тетраэдрических элементов меньше ребер и узлов, что может ограничить их способность точно отображать уклоны и сложные деформации. Хотя на практике, если анализировать модели сложной формы, то различие между ними может и не быть.

Размер конечного элемента будет составлять 1,5 мм. элемента для того, чтобы результат был максимально точным, но при это можно было эффективно использовать ресурсы компьютера, на котором производится анализ. Визуально

анализируя сетку, можно прийти к выводу, что в ней нет проблемных мест. Сетка и её настройки соответственно показаны на рисунках 26 и 27.

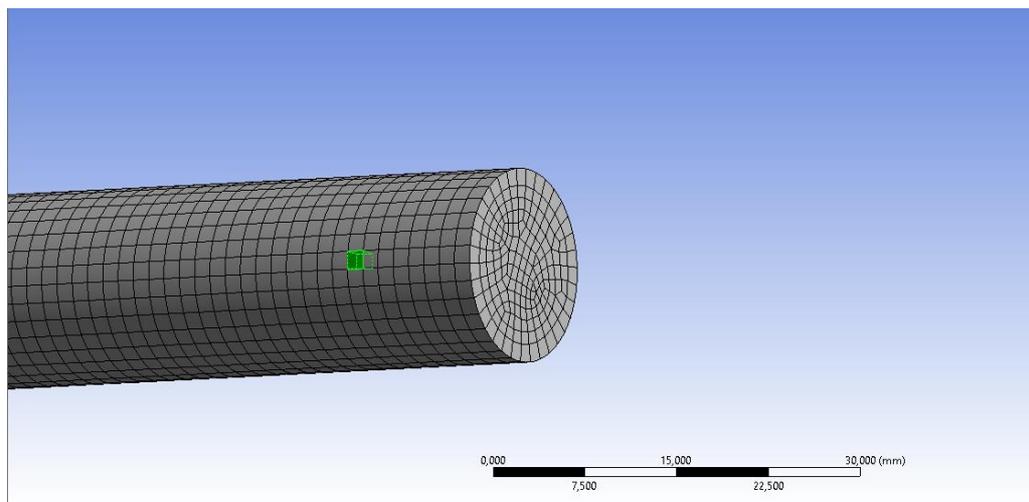


Рисунок 26. Сетка конечных элементов, состоящая из гексаэдров

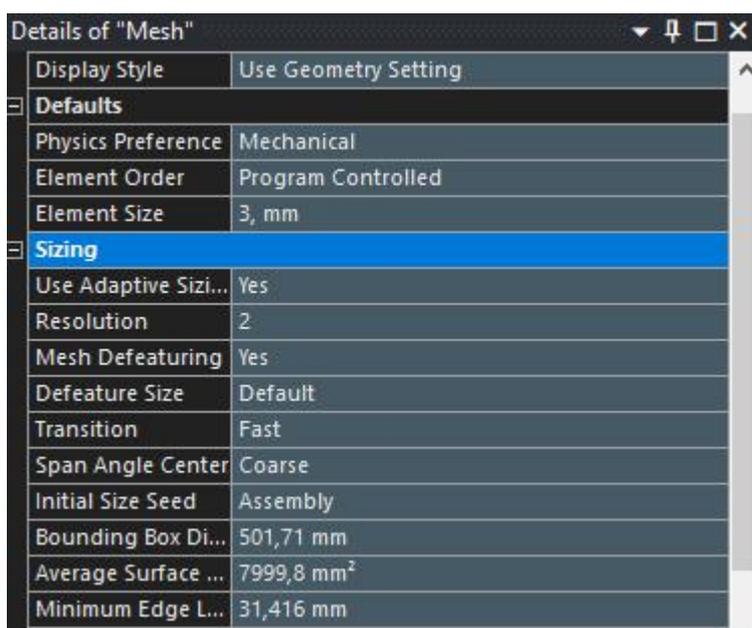


Рисунок 27. Настройка сетки конечных элементов

После проведения анализа, распределения по напряжением для нагрузки и разгрузки вала показаны на рисунках 28, 29. На рисунках 30 - 36. Показаны результаты некоторых шагов для вала 500 мм. и температурой обработки 300 °С, так как некоторые шаги являются симметричными и не могут быть другими из-

за невозможности программного пакета отображать структурные изменения материала. Также на рисунках 37 - 40 будут показаны диаграммы зависимости напряжения от деформации для разных материалов.

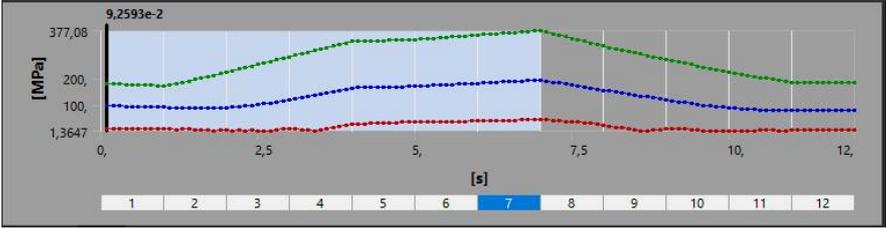


Рисунок 28. Напряжение на фазе нагрузки вала (1-7 шаги)

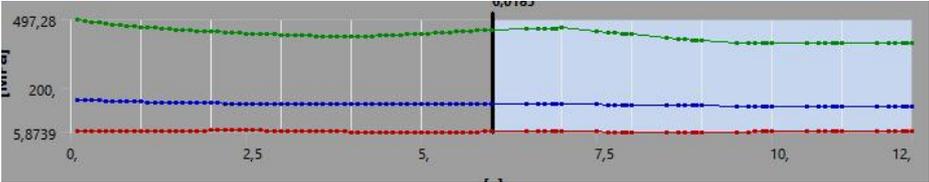


Рисунок 29. Напряжение на фазе разгрузки вала (6-12 шаги)

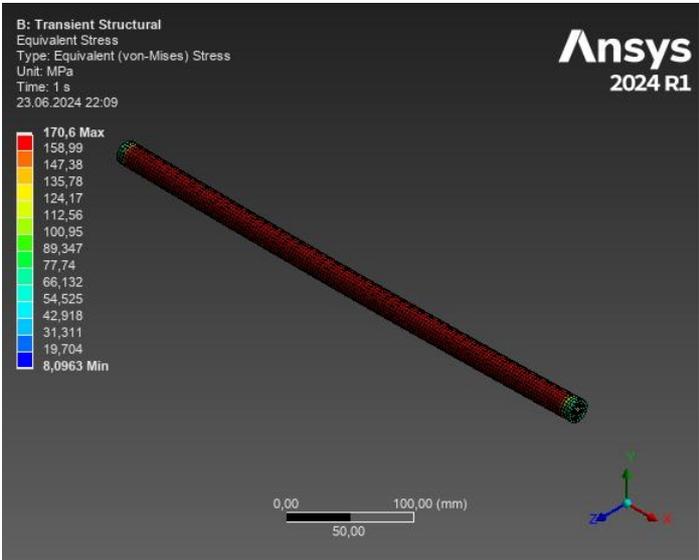


Рисунок 30. Напряжение на первом шаге процесса в фазе нагрузки вала

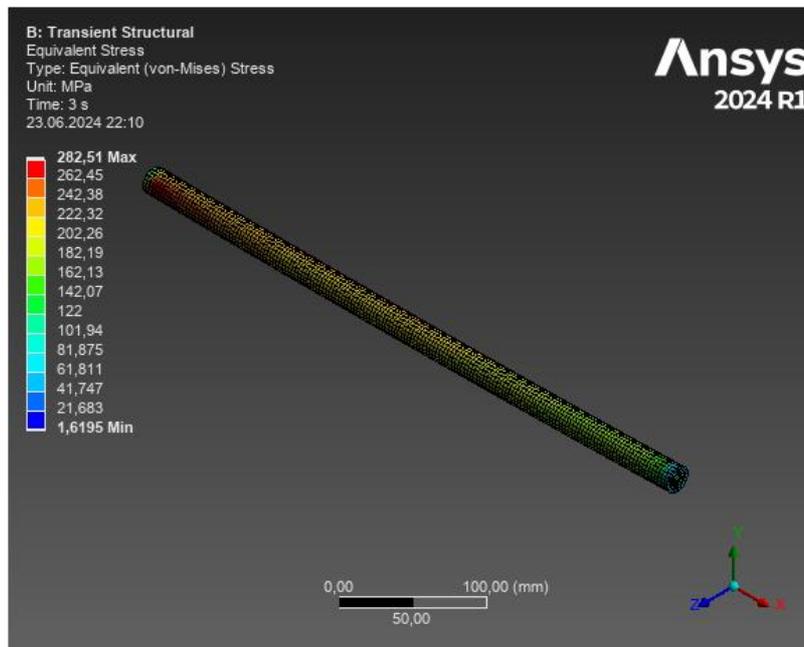


Рисунок 31. Напряжение на третьем шаге нагрузки вала

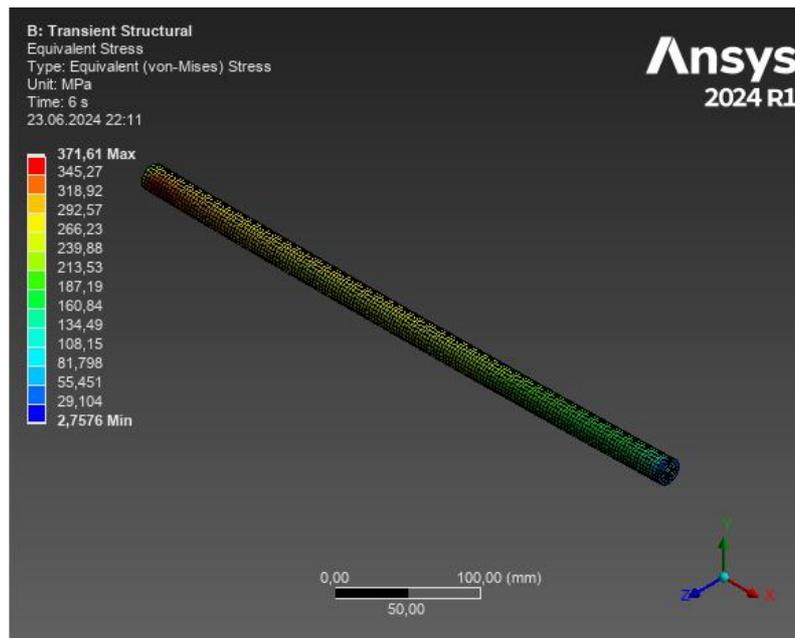


Рисунок 32. Напряжение на шестом шаге нагрузки вала

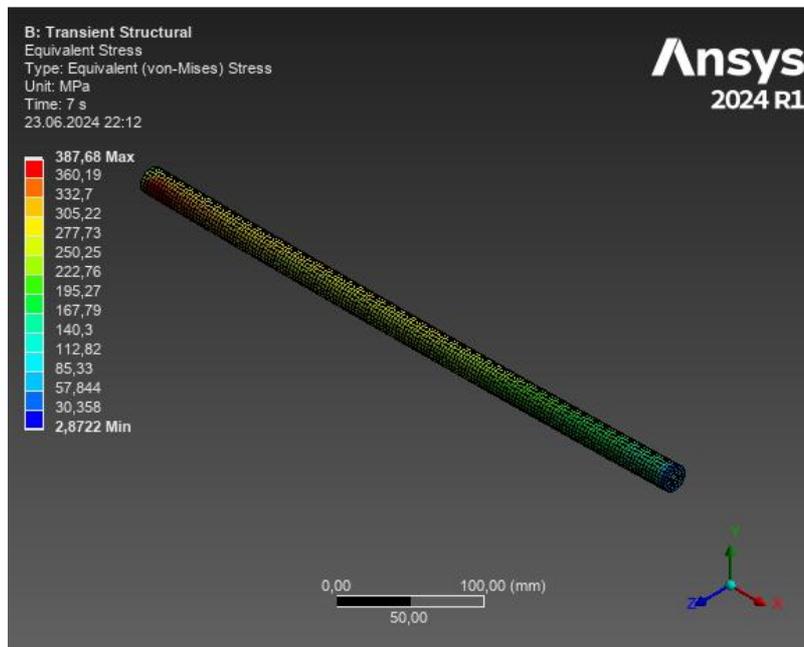


Рисунок 33. Напряжение на седьмом шаге нагрузки вала

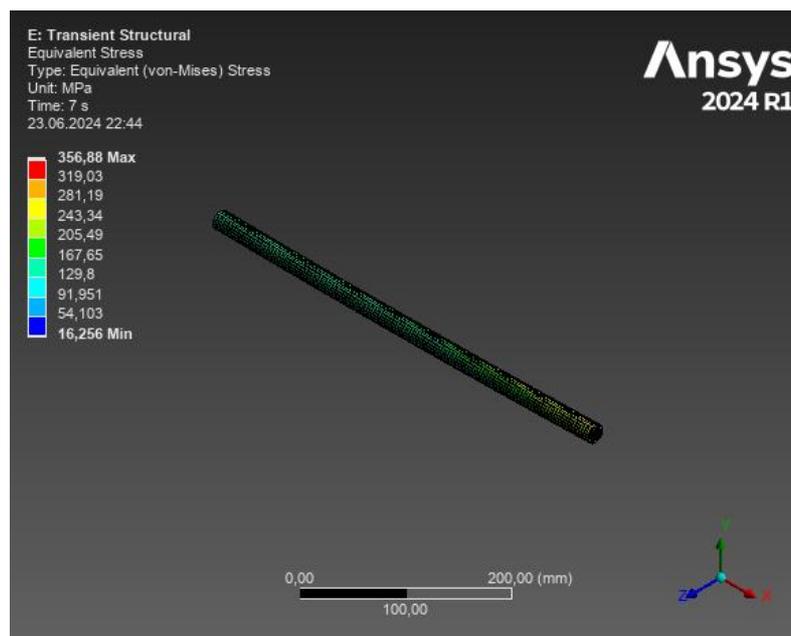


Рисунок 34. Напряжение на первом шаге разгрузки вала

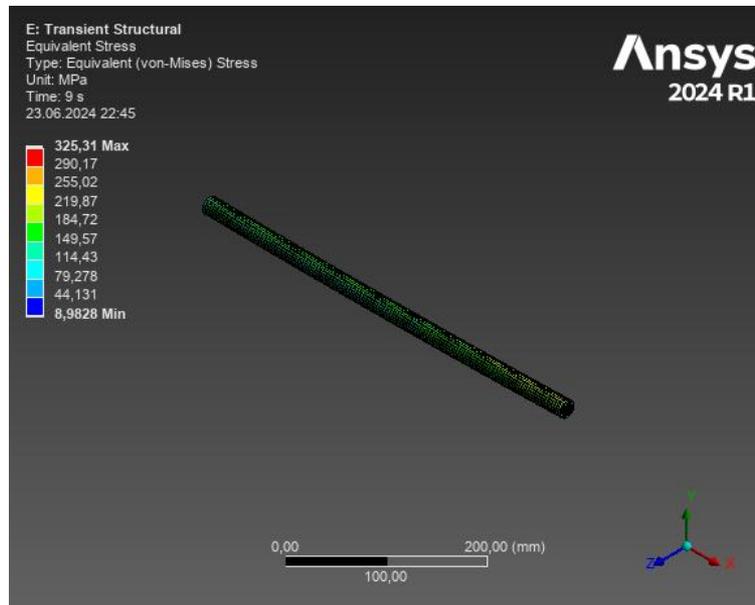


Рисунок 35. Напряжение на третьем шаге разгрузки вала

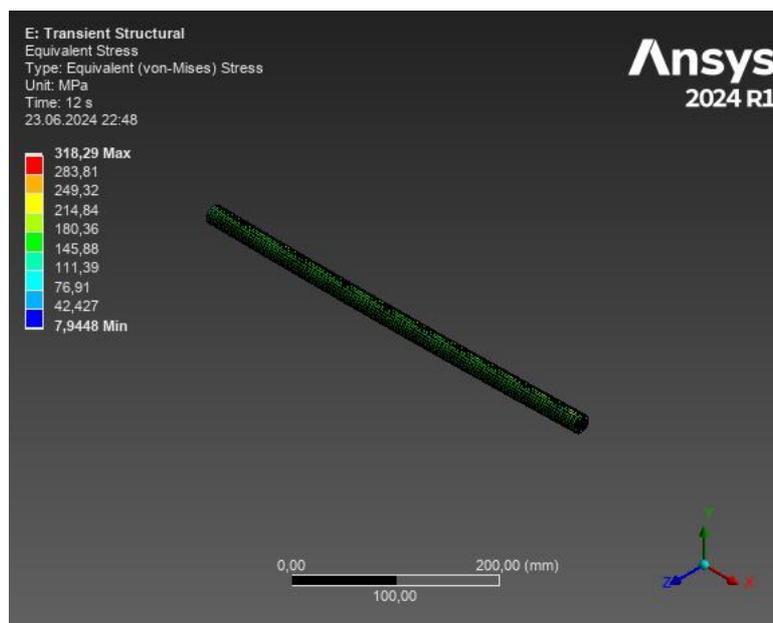


Рисунок 36. Напряжение на пятом шаге разгрузки вала

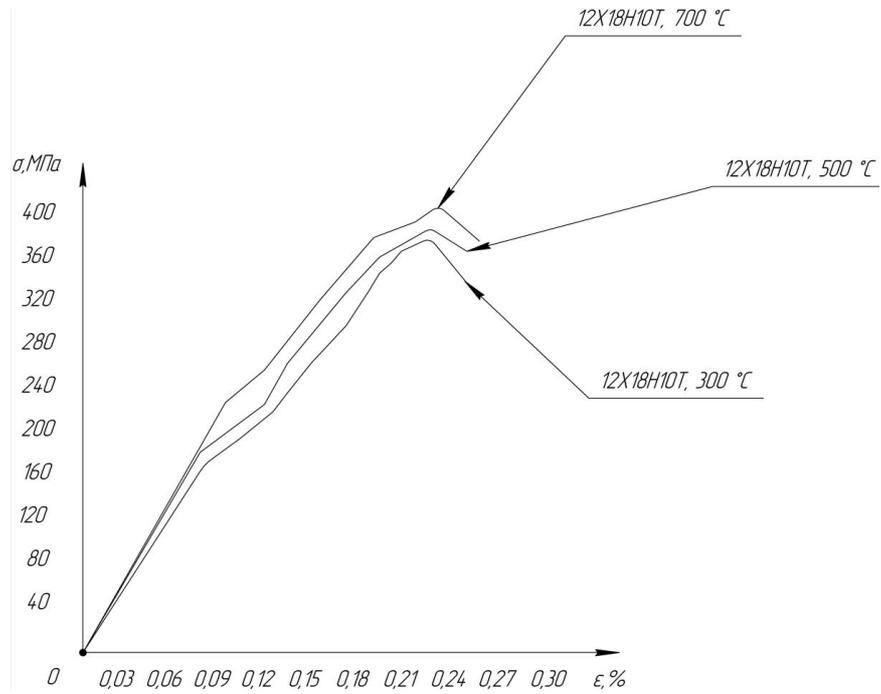


Рисунок 37. Зависимость напряжений от деформации для вала 500 мм. и материала 12X18H10T

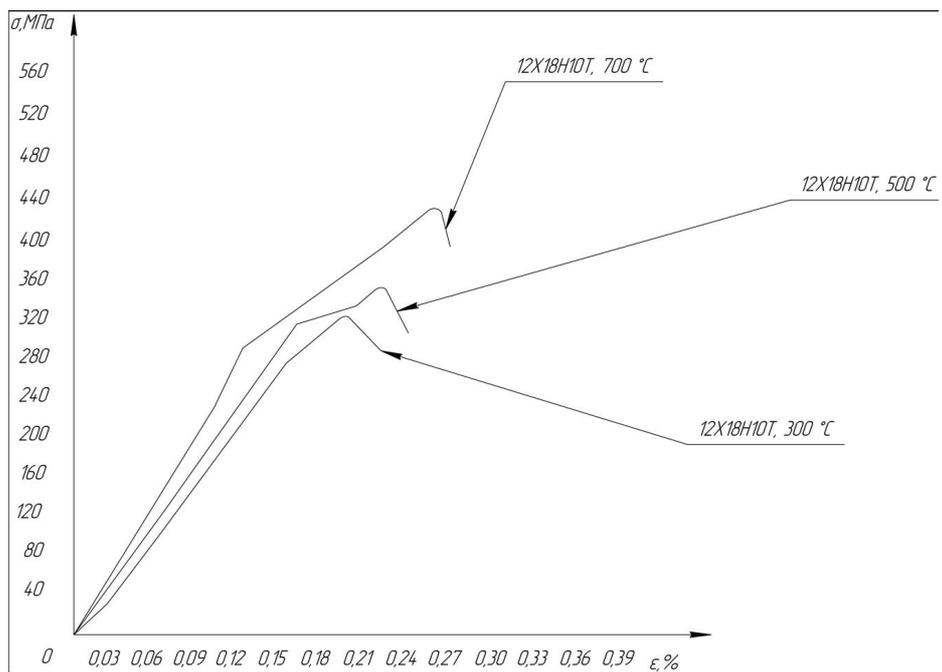


Рисунок 38. Зависимость напряжений от деформации для вала 700 мм. и материала 12X18H10T

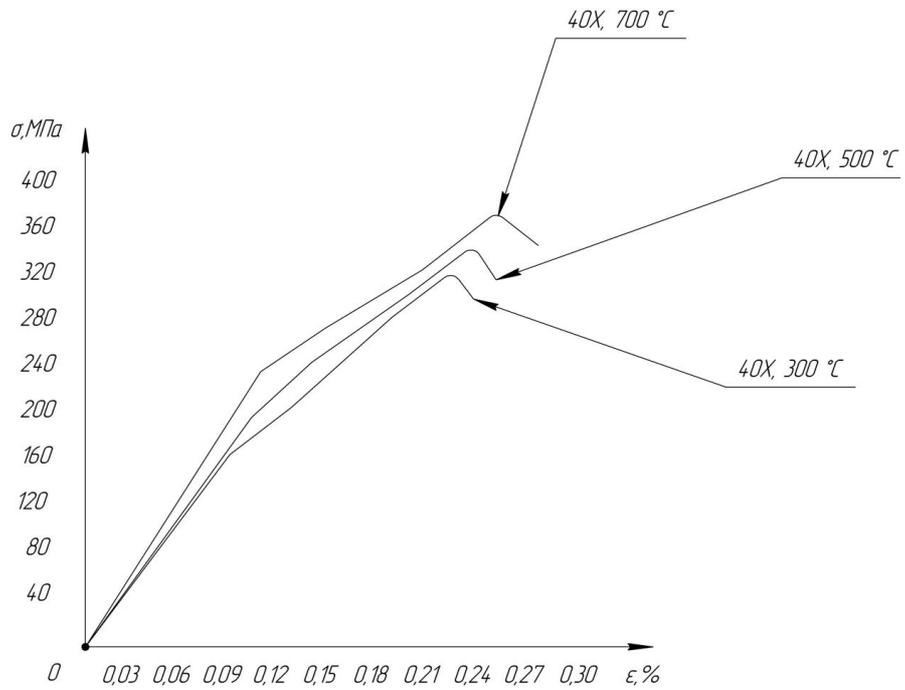


Рисунок 39. Зависимость напряжений от деформации для вала 500 мм. и материала Сталь 40X

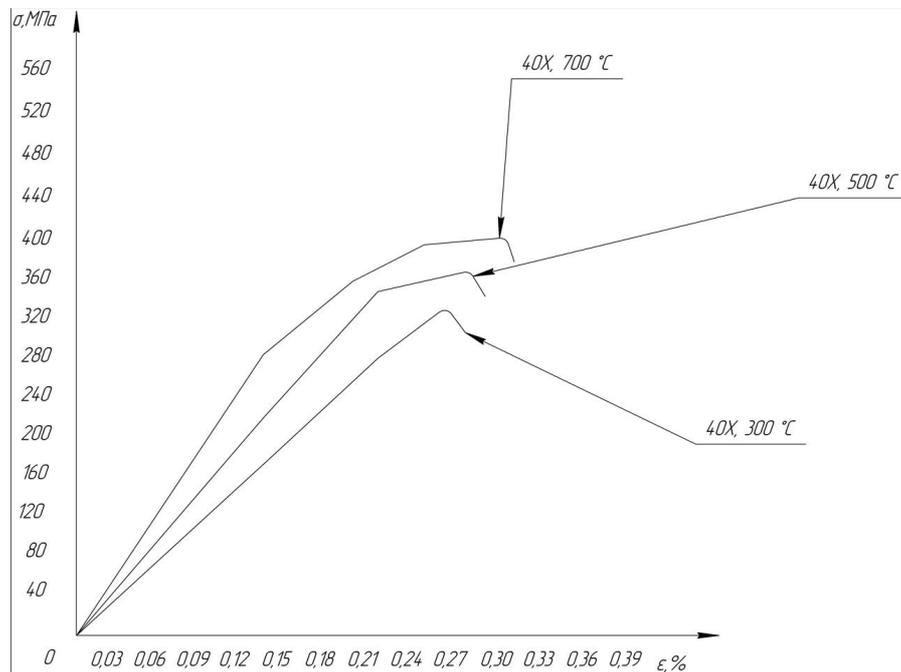


Рисунок 40. Зависимость напряжений от деформации для вала 700 мм. и материала Сталь 40X

Из показанных рисунков, можно сделать вывод, что процесс протекает правильно, согласно графикам, показанным во 2 главе, и напряжение

относительно оси вала к концу процесса выравниваются. Это видно по сечению вала и тому, как эти напряжения распределены от наружной поверхности к центру. Исходя из ранее показанных диаграмм, мы пришли к выводу, что эти могут отражать характер перераспределения напряжения при термосиловой, а также зависимость напряжений от деформаций вала.

Но картина не является полной, так как не учтено напряженно-деформированное состояние после получения заготовки перед процессом термосиловой обработки и не учтены структурно-фазовые превращения, которые происходят во время процесса, так как это невозможно учесть в программном комплексе Ansys. Но данная схема конечно-элементного моделирования, можно сказать, является базовой и, следовательно, на неё можно наложить напряженно-деформированное состояние после, например, винтовой и термической обработки.

Исходя из всего вышесказанного получаются следующие выводы:

- были получены результаты математического моделирования с помощью программы Ansys, которые примерно сходятся с результатами из работ, в которых. Погрешность получается из-за того, что не учитываются структурно-фазовые превращения в материале маложесткого вала.

- метод конечных элементов можно использовать для определения остаточных напряжений и деформаций, для различных модификаций процесса термосиловой обработки, но для этого желательно иметь результаты реального технологического процесса, чтобы можно было понять, насколько далеко или близко к реальному результату находится смоделированный процесс.

Заключение

Подводя итог вышеизложенному, решение проблемы распределения остаточных напряжений в маложестких валах можно добиться использованием термосиловой обработки способную снизить общий уровень и придать осевую направленность этих напряжений, исключая дефекты маложестких валов. Также для совершенствования процесса необязательно добавлять новые технологии, а можно оптимизировать уже устоявшиеся процессы.

Проведя анализ возможных методов совершенствования термосиловой обработки, можно сделать вывод, что все поставленные задачи были выполнены:

- были выявлены перспективные технологии, которые могут быть применены к термосиловой обработке для ее последующего усовершенствования, в том числе для улучшения качества заготовки для вала, снижения остаточных напряжений, а также оптимизации технологического процесса;

- проанализирован процесс термосиловой обработки для того, чтобы лучше понять, как проходит процесс для последующего разработки методики моделирования процесса в программно комплексе Ansys проведения эксперимента;

- проанализировано напряженно-деформированное состояние для разработки методики проведения эксперимента, чтобы повысить эффективность не столько со стороны привнесения новых и перспективных технологий, сколько со стороны повышения эффективности уже устоявшихся технологических процессов путем сокращения сроков и затрат на освоение новой технологии, уменьшение затрат, связанных с отработкой технологических процессов изготовления деталей и сборки изделий, повышение надёжности, долговечности и эксплуатационной пригодности изделий;

- была создана методика, по которой можно проводить анализ процесса термосиловой обработки и которая подтвердила свою состоятельность

получением корректных результатов, несмотря на невозможность учесть структурно-фазовые превращения материала.

Следовательно, можно сказать, что цель работы выполнена.

Список используемой литературы

1. Аверченков В.И. Основы научного творчества. [Электронный ресурс] / В.И. Аверченков, Ю.А. Малахов. — Электрон. дан. — М. : ФЛИНТА, 2011. — 156 с.
2. Авлукова Ю.Ф. Основы автоматизированного проектирования. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — Минск : "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.

- [Электронный ресурс] / В.Ф. Безъязычный, М.Л. Кузменко, В.Н. Крылов, А.В. Лобанов. — Электрон. дан. — М. : Машиностроение, 2007. — 539 с.
9. Биргер, И. А. Остаточные напряжения [Текст] / И. А. Биргер. — М. : Машгиз, 1963. — 232 с.
10. Блюменштейн В.Ю. Проектирование технологической оснастки. [Электронный ресурс] / В.Ю. Блюменштейн, А.А. Клепцов. — Электрон. дан. — СПб. : Лань, 2014. — 224 с.
11. 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.
12. Бруйка В.А., Фокин В.Г., Солдусова Е.А., Глазунова Н.А., Адеянов И.Е. Инженерный анализ в Ansys Workbench. Часть 1. — Самара : Самар. гос. техн.ун-т, 2010. — 271 с.
13. Бруйка В.А., Фокин В.Г., Курвева Я.В. Инженерный анализ в Ansys Workbench. Часть 2. — Самара : Самар. гос. техн.ун-т, 2013. — 148 с.
14. Базров Б.М. Основы технологии машиностроения: Учебник для вузов. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — М. : Машиностроение, 2007. — 736 с.
15. Быков В.В. Исследовательское проектирование в машиностроении. [Электронный ресурс] / В.В. Быков, В.П. Быков. — Электрон. дан. — М. : Машиностроение, 2011. — 256 с.
16. Вивденко Ю.Н. Технологические системы производства деталей наукоемкой техники: Учебное пособие для вузов. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — М. : Машиностроение, 2006. — 559 с.
17. Гарифуллин Ф.А. Материаловедение и технология конструкционных материалов: учебно-методическое пособие. [Электронный ресурс] / Ф.А. Гарифуллин, Р.Ш. Аюпов, В.В. Жилияков. — Электрон. дан. — Казань : КНИТУ, 2013. — 248 с.
18. Грызунов В.И. Metallургическая теплотехника. [Электронный ресурс] / В.И. Грызунов, Н.В. Фирсова, С.Е. Крылова, Е.Ю. Приймак. — Электрон. дан. — М. : ФЛИНТА, 2014. — 108 с.

19. Гусев А.А. Проектирование технологической оснастки. [Электронный ресурс] / А.А. Гусев, И.А. Гусева. — Электрон. дан. — М. : Машиностроение, 2013. — 416 с.
20. Драчев, О. И. Моделирование упруго-пластических деформаций при термосиловой обработке [Текст] / О. И. Драчев, Д. А. Расторгуев, М. В. Старостина // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. — 2012. — № 3. — С. 80-85.
21. 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.
22. Ермолаев В.А. Технологические процессы в машиностроении: конспект лекций: учебное пособие для вузов. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — М. : НИЯУ МИФИ, 2011. — 264 с.
23. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике [Текст]. / Пер. с англ. — М. : Мир, 1987. — 541 с.
24. Исакова, И.В. Основы инженерного творчества. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — Кемерово : КузГТУ имени Т.Ф. Горбачева, 2013. — 63 с.
25. Испытания по оценке влияния параметров термосиловой обработки на коробление валов и измерение кривизны мало жестких валов в цеховых условиях. Казанская наука. №10 2010г.-Казань: Издательство Казанский Издательский Дом. Воронов Д.Ю., Логинов Н.Ю.
26. Каплун, А. Б. и др. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство [Текст]. / А. Б. Каплун, Е. М. Морозов, М. А. Олферьева. — М. : Едиториал УРСС, 2003. — 272 с.
27. Киселев А.П. Поверхностные явления и дисперсные системы: учебное пособие для вузов. [Электронный ресурс] / А.П. Киселев, А.А. Крашениников, А.А. Фатина. — Электрон. дан. — СПб. : БГТУ "Военмех" им. Д.Ф. Устинова, 2014. — 42 с.
28. 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.
29. 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.
30. 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.
31. Патент РФ № RU2484907C1, авторов Никулин А.Н., Филиппов Г.А., Комков Н.А., Гриншпон А.С., Яндимиров А.А., Ромашова Н.Н.
32. Патент РФ № RU2800483C1, автора Голец А.В.
33. 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.
34. 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.
35. 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.
36. 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.
37. Устройство для термосиловой обработки. Патент на изобретение от 10.07.04. № 2232198. Воронов Д.Ю., Драчёв О. И. Расторгуев Д.А.
38. Устройство для термосиловой обработки осесимметричных деталей. Патент на изобретение от 20.09.05. № 2260628. Воронов Д.Ю., Драчёв О. И., Расторгуев Д.А.

39. 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.
40. Фещенко В.Н. Справочник конструктора. Комплект в двух томах: Книга 2. Проектирование машин и их деталей: Учебно-практическое пособие. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — Вологда : "ИнфраИнженерия", 2016. — 400 с.
41. Филонов И.П. Инновации в технологии машиностроения. / И.П. Филонов, И.Л. Баршай. — Электрон. дан. — Минск : "Высшая школа", 2009. — 110 с.
42. Чулков В.А. Методология научных исследований.— Пенза : ПензГТУ, 2014. — 200 с.
43. ANSYS 12 Theory Reference, LS-DYNA User's Guide / SAS IP, Inc., 2009.
44. Choi, Yong-Jin & Lee, Sang-Kon & Lee, In-Kyu & Cho, Yong-Jae & Lee, Jae-Wook & Cho, Jung-Woo & Jeong, Myeong-Sik. (2015). Multi-Stage Forging Process Design of Steering System Output Shaft for Reduction of Energy Consumption. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 16. 1455-1460. 10.1007/s12541-015-0192-0.
45. Deng, Xuwen & Hui, Songxiao & Ye, Wenjun & Liu, Rui & Huang, Liang. (2022). Numerical simulation research on hot stretch straightening of thinwalled T-shaped profile of titanium alloy assisted by resistance heating. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 121. 10.1007/s00170-022-09714-y
46. Dong, Juan & Epp, Jérémy & da Silva Rocha, Alexandre & Nunes, Rafael & Zoch, Hans-Werner. (2015). Investigation of the Influence Factors on Distortion in Induction-Hardened Steel Shafts Manufactured from Cold-Drawn Rod. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 47. 10.1007/s11661-015- 3250-4.
47. Usui, E. and Shirakashi T. *Mechanics of machining – from descriptive to predictive theory*. ASME Publication, 1982. PED 7, 13 – 35.
48. Usui, E., Shirakashi T. and Obikawa T. Simulation analysis of cutting fluid action. *J. Japan Soc. Prec. Eng.*, 1977. 43(9), 1063 – 1068.

Приложение А
Сертификат о публикации статьи



Рисунок А.1 – Сертификат о публикации статьи на портале «Сибак»