

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

Институт машиностроения
(наименование института полностью)

Кафедра «Оборудование и технологии машиностроительного производства»
(наименование)

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

Технология автоматизированного машиностроения
(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Исследование процессов стабилизации и снижения остаточных напряжений в
маложестких деталях

Обучающийся

Д.А. Подгорнов

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

к.т.н., доцент, Д.А. Расторгуев

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

Тольятти 2023

Содержание

Введение.....	3
1 Обзор состояния вопроса о технологическом обеспечении стабильности размеров	5
1.1 Технологическое обеспечение точности	5
1.2 Виды и влияние остаточных напряжений на геометрию деталей	6
1.3 Технологические особенности обеспечения прямолинейности правкой	8
1.4 Термомеханическая обработка	11
1.5 Обзор технологий формирования напряжений	12
2 Управление остаточными напряжениями	26
2.1 Определение параметров деформации и напряжений	26
2.2 Технологическое управление остаточными напряжениями	28
3 Результаты моделирования силового нагружения вала.....	33
3.1 Описание эксперимента	33
3.2 Рекомендации по управлению напряжениями.....	61
4 Экспериментальное исследование термосиловой обработки	67
4.1 Контроль геометрических параметров вала.....	67
4.2 Релаксация остаточных напряжений	68
4.3 Реологическое моделирование	69
4.4 Методика эксперимента	73
Заключение	78
Список используемых источников.....	80
Приложение А Научная статья	85
Приложение Б сертификат участника.....	89

Введение

Обеспечение точности является важной задачей, стоящей перед технологами. Это задача выполняется совместно с обеспечением объемов выпуска и производительностью, а также снижением технологической себестоимости. Если изделия отличаются не высокой технологичностью, например, малой конструктивной жесткостью, возникают технологические трудности. Для обеспечения точности такой детали требуется больше переходов, операций, снижение режимов обработки. Кроме этого, необходимо использовать не стандартные или дополнительные элементы технологического оснащения для выравнивания или повышения конструктивной жесткости заготовки.

Необходимо учитывать большое влияние на геометрическую точность внутреннего распределения остаточных технологических напряжений. В ходе технологического процесса они проявляют себя двояким образом. Первое, это изменение внутреннего распределения напряжений при снятии припуска. При установлении нового равновесного состояния для напряжений может происходить коробление заготовки. Особенно это ярко проявляется, если исходное поле остаточных напряжений было изначально неравномерным или снимался переменный припуск. Второе, самопроизвольная релаксация остаточных технологических напряжений также ведет к потере точности. Учитывая дополнительные возмущения от температурных напряжений, изменения структуры материала из-за фазовых переходов, общей динамики обработки, формирование заданной точности является трудно технологической задачей для маложестких заготовок. Для таких деталей развито отдельное направление в прикладной технологии машиностроения - технологическая наследственность. В ней изучаются взаимные связи отдельных операций и в целом этапов технологического процесса с точки зрения обеспечения комплекса заданных конструктивно - технологических параметров. В данной теории введено понятие операций - барьеров. Они

обеспечивают прерывание передачи вредных параметров и сохранение или усиление полезных характеристик. К таким операциям относят термические, химико - термические, термомеханические, термосиловые операции и методы поверхностного пластического деформирования.

В работе приведено описание таких подходов для обеспечения заданной геометрической точности заготовки. Для осесимметричных деталей типа вал, шток, втулка или труба, наиболее важным геометрическим параметром является отклонение от прямолинейности. Кроме этого, рассмотрены технологические методы, направленные на повышение различных физико - механических свойств заготовки. Это относится к повышению износостойкости обработанной поверхности, коррозионной стойкости, упрочнению и повышению усталостной выносливости и общего уровня прочности.

1 Обзор состояния вопроса о технологическом обеспечении стабильности размеров

1.1 Технологическое обеспечение точности

Повышение точности обработки в машиностроительном производстве является одной из главных задач, которые стоят перед технологом. Она дополняется обеспечением производительности, экономичности, экологичности, достижением минимальных затрат. Решение сложной задачи по обеспечению точности зависит от множества различных факторов, связанных со всеми этапами технологических процессов изготовления различных деталей. Формирование точности начинается на заготовительном этапе, где формируется материал заготовки по химическому составу, структуре, физико - механическим свойствам, а также геометрии заготовки.

Исходная форма заготовки определяет дальнейшие шаги на этапе механической обработки. Упрощение формы заготовки, снижение ее точности положительно сказывается на себестоимости и производительности собственно заготовительного этапа, но отрицательно - на этапе механической обработке. Такая упрощенная форма заготовки требует дополнительных технологических операций или переходов, а самое главное - усложняет обеспечения технических требований, которые формирует конструктор в технических условиях рабочей документации. Требуется вводить дополнительные переходы, использовать более сложное технологическое оборудование и инструмент [25].

Точность обработки складывается из нескольких основных погрешностей, которые относят к элементарным составляющим [31]. Это погрешности, связанные непосредственно с оборудованием, что определяется с одной стороны его нормами точности, а с другой - текущим состоянием. Другие погрешности формируются на этапе размерной наладки данного оборудования и связаны с выбором соответствующего метода настройки

станка, а также его инструментальным обеспечением контрольно - измерительными и регулировочными средствами [36].

Еще одна группа погрешностей связана с установкой заготовки и определяется несколькими факторами. К ним относят точность изготовления и установки самого приспособления и состояние его установочных элементов. В случае несоблюдения принципа единства баз возникает погрешность базирования. Может понадобиться учитывать погрешность от сил зажима. Последняя составляющая особенно актуальна для маложестких заготовок. Упругая деформация вала или трубы при установке на токарной операции под действием сил закрепления приводит к потере точности после ее раскрепления [24].

Процесс обработки приводит к формированию элементарных погрешностей. Это погрешности от упругих деформаций технологической системы, которая доминирует в погрешности обработки жестких заготовок. Также процесс резания сопровождается температурными деформациями технологической системы. Еще одной важной составляющей погрешности является погрешность от износа режущего инструмента. Учитывая взаимные связи этих погрешностей между собой, например износ режущего инструмента увеличивает силу резания, что приводит к повышению упругих и температурных деформаций, повышение эффективности обработки таких заготовок является сложной, но важной производственной задачей [29].

Поэтому обеспечения точности обработки таких заготовок начинается с заготовительного этапа, где отклонение от прямолинейности оси трубы является одним из ключевых параметров [13].

1.2 Виды и влияние остаточных напряжений на геометрию деталей

Остаточные напряжения - это внутренние напряжения, оставшиеся в материале после того, как на него было оказано воздействие внешних нагрузок. Они могут возникнуть в процессе изготовления, связанного с

термической или механической обработкой материала, или же в результате эксплуатации изделия. Остаточные напряжения могут влиять на работоспособность и прочность материала, могут стать причиной различных повреждений и деформаций, а также могут быть использованы в качестве дополнительной информации о состоянии материала изделия [27].

Остаточные напряжения - это напряжения, которые остаются в материале после процесса обработки или деформации и не исчезают при удалении внешней нагрузки. Они могут быть как сжимающими, так и растягивающими.

Виды остаточных напряжений:

- термические напряжения - возникают при нагреве и охлаждении материала;
- пластические напряжения - возникают при деформации материала;
- растягивающие напряжения - возникают при нагрузке на материал в направлении растяжения;
- сжимающие напряжения - возникают при нагрузке на материал в направлении сжатия.

Причины появления остаточных напряжений разнообразны. Это и неправильный выбор технологии обработки, и неправильное применение инструментов и оборудования [34].

Перераспределение напряжений и формирование новых зависят от расположения деталей на станке при обработке, что определяет жесткость.

Обеспечение стабильности геометрии детали должно происходить за счет учёта и управления остаточными напряжениями. Способы управления остаточными напряжениями разнообразны. Использование специальных технологий обработки, которые позволяют снизить уровень остаточных напряжений (термических, вибрационных). Использование специальных материалов, которые обладают более высокой устойчивостью к остаточным напряжениям (показатель – высокая релаксационная стойкость) [14].

При обработке снижения уровня напряжений можно добиться выбором режимов резания, геометрии инструмента. Также положительно сказывается регулярное обслуживание станка и замена изношенных деталей.

Можно использовать специальные методы термической обработки, которые позволяют снизить уровень остаточных напряжений. Также можно использовать специальные устройств для снятия остаточных напряжений.

Управление остаточными напряжениями - это процесс изменения величины остаточных напряжений в материале с целью повышения его прочности и стабильности геометрии. Для этого могут использоваться различные методы, такие как термическая обработка, включая нормализацию, отжиг. Используются другие способы, такие как гидроабразивная и вибрационная обработка, ультразвуковая обработка и другие [30].

При правильном управлении остаточными напряжениями можно получить ряд преимуществ. Улучшение прочностных характеристик материала за счет повышения уровня сжимающих напряжений. Повышение точности геометрических параметров изделий за счет или минимальных напряжений или формирования не направленных напряжений. Снижение вероятности повреждений и деформации деталей в процессе эксплуатации и соответственно увеличение срока их службы изделий.

1.3 Технологические особенности обеспечения прямолинейности правкой

Управление остаточными напряжениями проводится с учетом особых требований, которые предъявляются к конкретным изделиям. Оно осуществляется на всех этапах производственного процесса, начиная с получения исходного материала и заканчивая последней операцией обработки.

В [4] Отнюдь что повышение изгибной жесткости длинномерных деталей формированию остаточных технологических напряжений на

заданную глубину и заданной величины (рисунок 1). График 1 для сжатия. График 2 – для растяжения. График 3 при напряжений. Это также является одним из обоснований повышения жесткости после поверхностной пластической деформации.

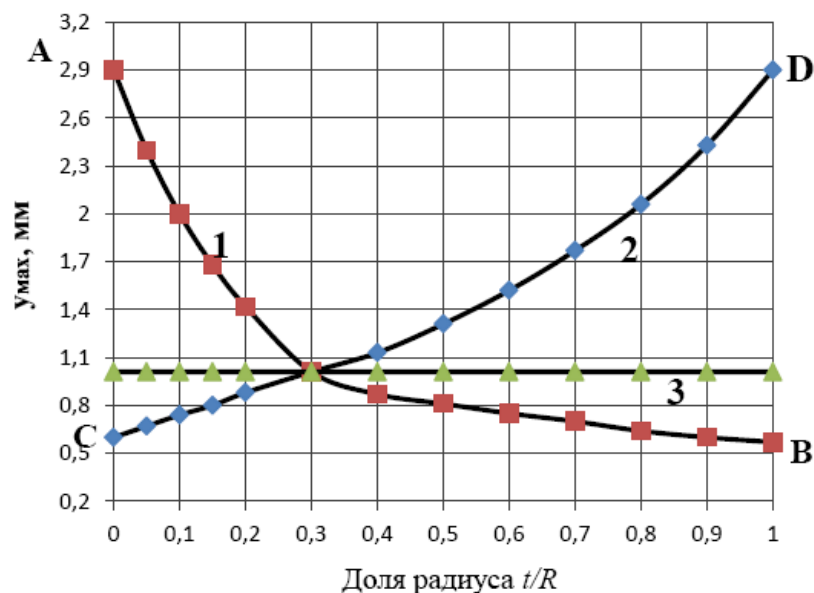


Рисунок 1 – Прогиб вала от толщины упрочненного слоя [4]

При моделировании методом конечных элементов рассматривалась влияние схемы нагружения мало жесткой детали при растяжении и сжатии, а также знак остаточных напряжений и толщина слоя в котором распределены. Оказалось, что при схеме нагружения растяжением, при условии формирования остаточных напряжений в тонком слое, величина деформации при изгибе снижается что свидетельствует об общем повышении жесткости детали.

В [3] для образца из листового проката исследовалось влияние знака переменного нагружения на физико - механические свойства. В данной статье приведены результаты экспериментальных исследований предела текучести и временного сопротивления в условиях изгиба. Для низкоуглеродистой стали получены следующие результаты. Только для одно циклового нагружения

наблюдается понижение предела текучести при увеличении предел прочности. При увеличении циклов нагружения из-за деформационного упрочнения происходит рост обоих показателей.

В [34] при моделировании методом конечных элементов зафиксировано более высокая точность при использовании модели материала с кусочно-линейным кинематическим упрочнением. Сравнивалась данная модель материала с линейным заданием пластического поведения материала.

Одним из наиболее известных и распространенных методов снижения остаточных технологических напряжений, наряду с термообработкой, является виброобработка. Приложение знакопеременных нагрузок с небольшой амплитудой на высокой частоте приводит структуру материала к равновесному состоянию. Это осуществляется за счет увеличения подвижности внутренних дефектов и повышения температуры материала в результате поглощения энергии колебаний, что способствует повышению пластичности.

Нагрузка колебательного характера может прикладываться в виде вибрационных столов, вибростендов, приводов устанавливаемых на заготовку или закрепляемых на ней. Динамическая нагрузка может прикладываться также и импульсно на счет ударных воздействий. Например, в [33] рассматривалось воздействие вибрационной обработки на качество сварных соединений. Результаты исследования показали, что наличие дефектов типа холодных трещин в сварных швах после вибрационной обработки существенно снижено.

Использование вибрационной обработки обеспечивает повышение качества не только с точки зрения снижения остаточных напряжений, но и способствует повышению других эксплуатационных свойств. Частота вибрационных воздействий может изменяться от низкочастотного диапазона порядка нескольких герц до ультразвука.

В результате использования вибрационного воздействия во время сварочного процесса [33] характеристики сплава, такие как межкристаллитная

коррозия снижается, и повышается ударная прочность, усталостная выносливость.

В работе [35] на примере волочения тонкостенных труб из коррозионностойких материалов рассматривается технологический прием, который заключается в финишном растяжении с обеспечения пластической деформации для формирования прямолинейности заготовки. Данный технологический прием обеспечивает равномерность остаточных напряжений и исключает необходимость применения дополнительной холодной правки, которая может приводить к снижению качества поверхности полученной трубы, а также наводит новые не равновесные остаточные напряжения.

Еще одним из методов одновременного воздействия на заготовку температурного нагрева и пластического деформирования является горячее изостатическое прессование. Данная технология имеет особенность прессования в том, что давление действует на заготовку во всех направлениях одинаково. Это способствует удалению различных микропор и трещин. Рассмотрен пример применения данной технологии для повышения усталостной прочности торсионов [3]. При нагреве до 500° используется давление до 100 МПа с длительностью выдержки до 5 часов в газовой среде аргоне. При этом на глубине до 0,1 мм формируются преимущественно тангенциальные технологические остаточные напряжения сжатия. Это способствует тому, что усталостная выносливость возрастает.

1.4 Термомеханическая обработка

Термомеханическая обработка используется для изменения свойств материала и формы заготовки путем сочетания термических и механических воздействий. Она может применяться для улучшения механических свойств материала, увеличения прочности и твердости, а также изменения формы и размеров заготовки.

Термомеханическая обработка проводится с целью изменения микроструктуры материала и остаточных напряжений в детали. Термомеханическая обработка может проводиться различными способами, например, нагревом и охлаждением детали или ее частей, применением высоких давлений [26].

Одним из наиболее распространенных методов термомеханической обработки является закалка.

Для выполнения термомеханической обработки необходимо специальное оборудование, которое позволяет создавать определенные термические и механические условия. К такому оборудованию относятся, например, пресса, ковочные машины, гидравлические прессы [2], термические камеры и другие [1].

В процессе термомеханической обработки используются различные режимы обработки, которые зависят от свойств материала и требуемых результатов [32]. К ним относятся такие параметры, как температура нагрева, скорость нагрева, время выдержки при заданной температуре, давление на материал и другие.

Контроль выполнения геометрии заготовки и её свойств осуществляется с помощью измерительных инструментов, таких как микрометры, штангенциркули, измерительные микроскопы и другие [35]. Также могут использоваться неразрушающие методы контроля, например, ультразвуковая дефектоскопия или рентгеновский контроль [33].

1.5 Обзор технологий формирования напряжений

Для повышения точности маложестких деталей осесимметричной формы применяют различные технологические методы. Они направлены на решение двух задач: обеспечение заданной геометрии и формирования необходимого распределения остаточных напряжений.

Эти задачи могут решаться совместно при выполнении следующих технологических операций или переходов.

Использование методов деформирования путем общего нагружения заготовки или местного при помощи поверхностного пластического деформирования [18].

Примером первого способа является способ, описанный в [8]. Основной технологической задачей заявлено повышение усталостной выносливости. Объект обработки насосные штанги для глубинно-насосной эксплуатации скважин. Особенность – необходимость предварительной обработки пластическим деформированием (высадка с обоих концов заготовки из проката головок с буртиком, квадратом и галтелью). Конструктивные элементы нужны для обеспечения зажима заготовки с приложением осевой нагрузки и крутящего момента.

Сама правка заключается в продольной деформации до величины пластической деформации 1,0 - 1,5%. Во время обработки контролируют величину силы растяжения. Зафиксировав достигнутую деформацию, закручивают заготовку. При уменьшении продольной силы в 2 - 2,5 раза закручивание заканчивают.

Данный метод усовершенствован для обеспечения изготовления насосных штанг с механическими характеристиками, обеспечивающих более высокую надежность при эксплуатации. Достигается это контролем величины удлинения. Это исключает влияние на эффективность обработки погрешности длины проката.

В процессе правки продольное нагружение вала ведут до величины остаточного удлинения 1,0-1,5%. При этом заявляется однородность деформирования по длине длинномерного изделия. Необходимо это для исключения возможности образования локальных сужений в теле заготовки. Диапазон пластической деформации штанги до величины остаточного удлинения объясняется следующим. Если деформация менее

1,0%, то не обеспечивает прямолинейность заготовки, а при деформации более 1,5% - имеет место неоднородная пластическая деформация.

При достижении при продольном нагружении заготовки величины остаточного удлинения 1,0-1,5% указанную пластическую деформацию фиксируют. За счет наложения на фиксированную упруго-пластическую деформацию заготовки деформации кручения, каждое поперечное сечение сдвигается относительно друг друга.

Если вместе с растяжением использовать кручение заготовки, в ней возникают сдвиговые деформации. Это приводит к формированию неоднородных напряжений в поперечных сечениях. Как заявлено, нормальные напряжения в сечении уменьшаются, что положительно сказывается на усталостной прочности заготовки. Из-за этого при кручении происходит снижение растягивающая сила. Из-за этих особенностей деформации после снятия нагрузки в поверхностных слоях заготовки формируется остаточные напряжения сжатия, а в центральной области - напряжения растяжения.

Максимальные остаточные напряжения сжатия, как показали исследования, обеспечиваются при снижении продольной нагрузки при кручении до 2,5 раз. Использование данной технологии требует изменения всего технологического маршрута изготовления детали. Вначале с использованием индукционного нагрева для повышения пластичности производят высадку заготовки с формированием утолщения по концам стержня. Эти технологические элементы используют для закрепления заготовки в устройстве для комплексного нагружения с растяжением и кручением. Перед этим производят термообработку - нормализацию для обеспечения физико-механических свойств. Комплексное нагружение ведут с фиксацией нагрузок и деформаций. Это связано с необходимостью достижения при растяжении пластической деформации около от 1,5 %. Кручение следует за растяжением и проводят его до уменьшения продольной нагрузки в 2,5 раза.

Данная технология апробированы в промышленных условиях с использованием для индукционного нагрева высокочастотной установки ВПЧ-100/8000 для нагрева до температуры 1250°C.

Для формирования технологических приливов по концам заготовки используется ручьевого пресс. Для термообработки используется газопламенный нагревательный аппарат.

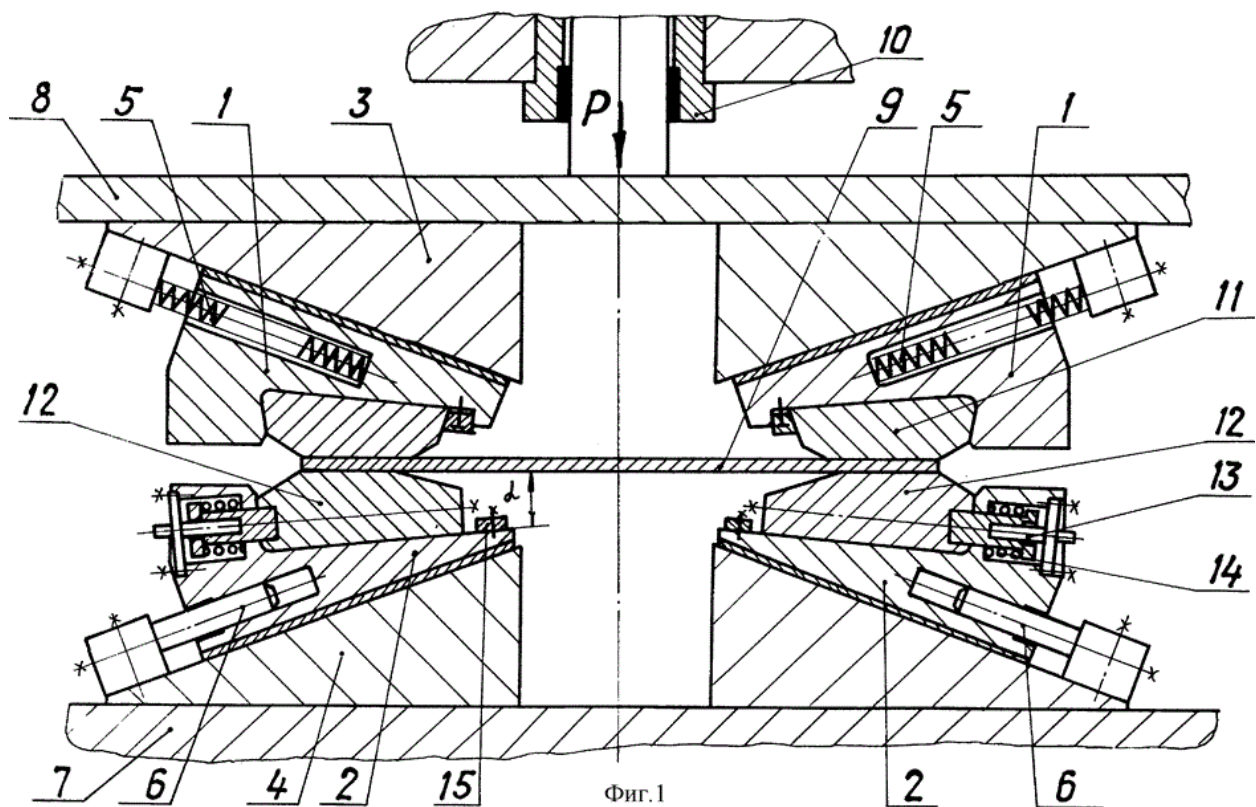
Предел выносливости, характеризующий усталостную прочность материала насосной штанги, увеличился на 85% по сравнению с этим показателем у насосной штанги, изготовленной по известному по прототипу способу.

В заявке [9] описана та же технология, только параметры нагружения изменены. Продольное нагружение в области пластической деформации ведут до величины остаточного удлинения 0,2 - 0,35%, при котором фиксируют величину продольного нагружающего усилия. После чего, при сохранении указанного пластического удлинения, производят кручение изделия с одновременным контролем продольного нагружающего усилия и при уменьшении его в 1,5-3,3 раза кручение прекращают, после чего снимают продольное нагружающее усилие.

В заявке [10] описывается способ контроля структуры металла протяженной заготовки.

В этом способе прописывается двух уровневое нагружение заготовки. Сначала растяжение с последующим кручением, не выходя за предел упругости. Далее этот цикл повторяют уже за пределом упругости, обеспечивая пластическую деформацию изделия. При этом проводят отслеживание контрольных меток виде продольных рисок, нанесенных на изделия для контроля дефектов материала заготовки.

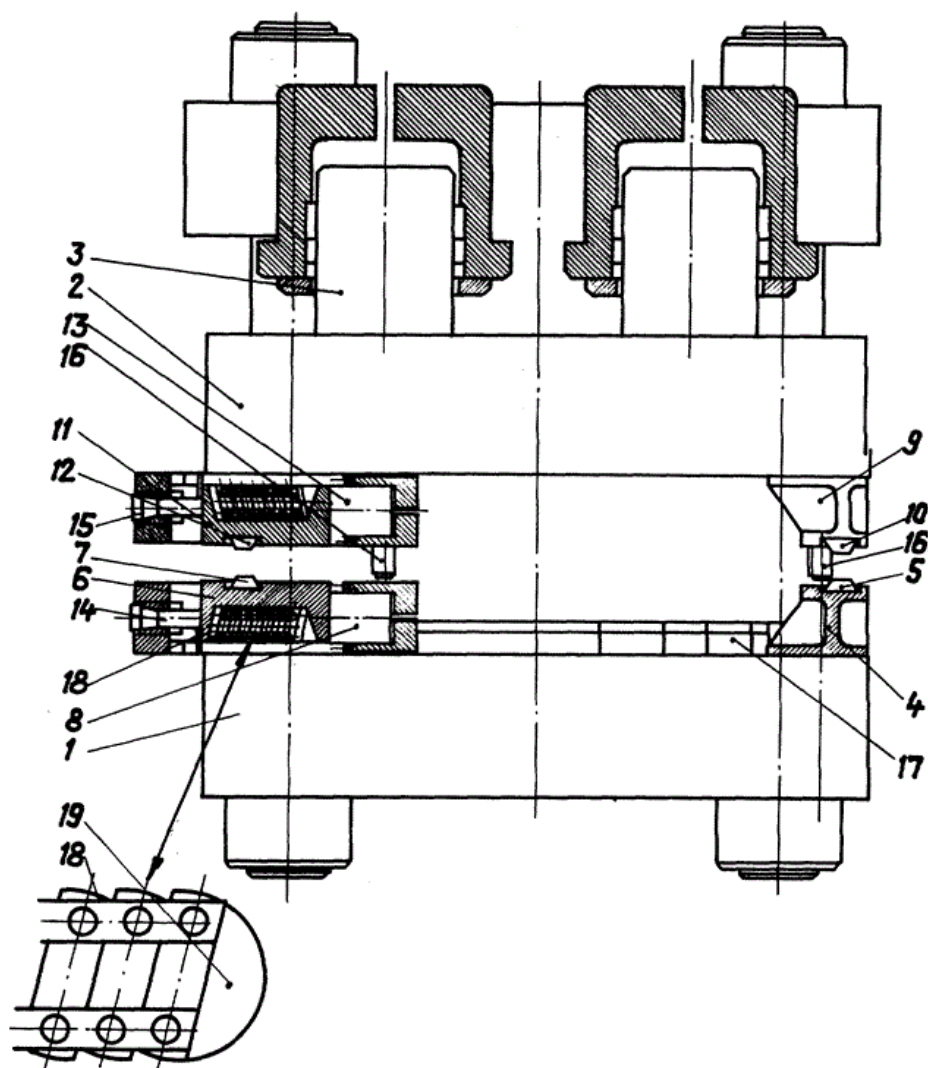
Растяжение применяют не только для цилиндрических, но и для плоских изделий [22] (рисунок 2).



Подвижные клиновые захваты 1 и 2, неподвижные клиновые захваты 3 и 4, пружина 5, гидроцилиндр 6, станина 7, траверса 8, заготовка 9, гидроцилиндр 10, губки 11 и 12

Рисунок 2 – Захваты для правки растяжением

В конструкциях предназначенных для растяжения плоских заготовок принцип действия такой же, как и для цилиндрических изделий. Отличаются механизмы закрепления. Они выполнены более простой конструкции в виде клиновых зажимов (рисунок 3). Для создания рабочих нагрузок используется рабочий гидроцилиндр. Использование клиньев для закрепления обеспечивает адаптацию этих сил при растяжении за счет сил самоторможения.



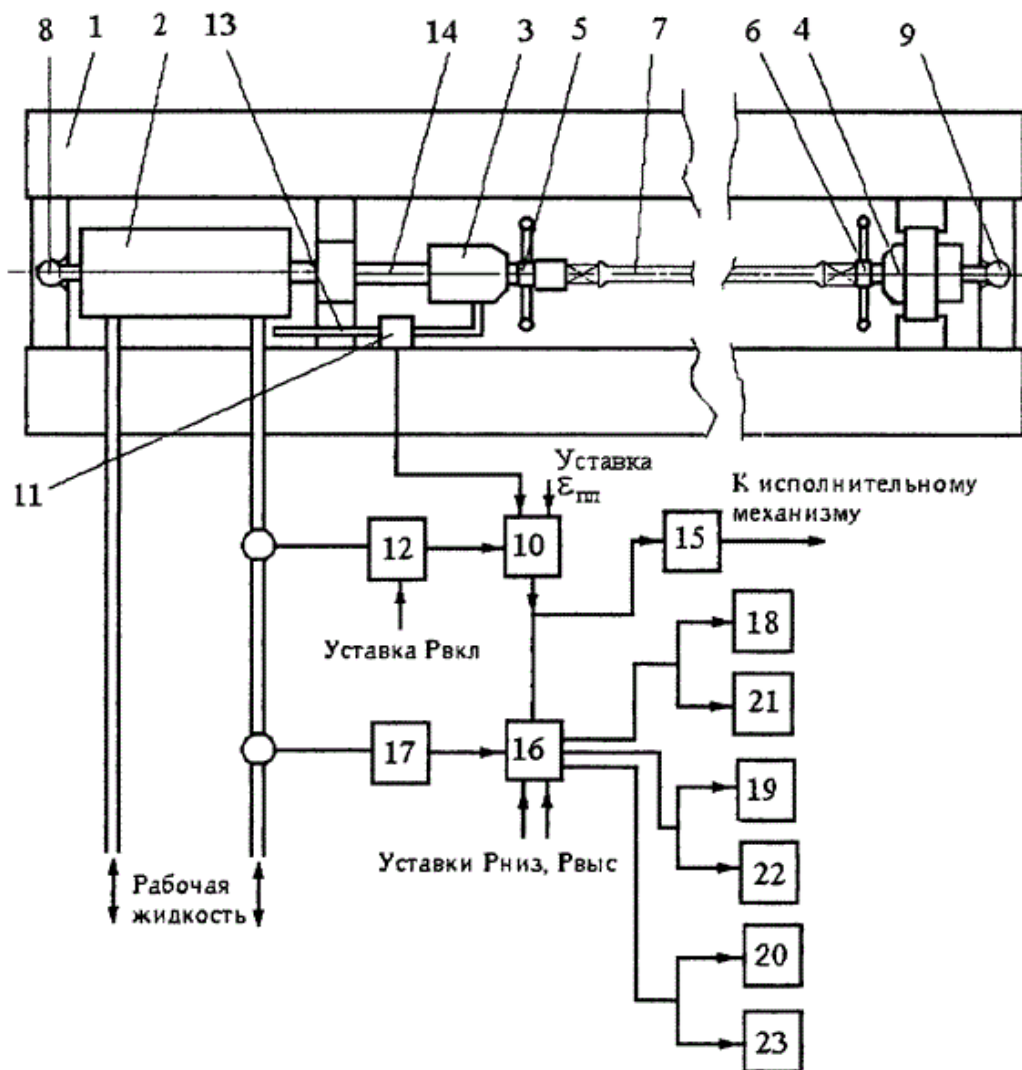
станина 1, траверса 2, цилиндр 3, опора 4, губка 5, каретка 6, губка 7, гидроцилиндр 8, опора 9, губка 10, каретка 11, губка 12, гидроцилиндр 13, гидроцилиндры обратного хода 14 и 15, зажим 16, заготовка 17, рычаги 18, опора 19

Рисунок 3 - Устройство для правки растяжением

В патенте [16] описано устройство с тем же принципам работы по растяжении заготовки. Отличается только компоновка силовых элементов, механизмы закрепление концов заготовки и кинематика работы.

В [17] к преимуществам конструкции следует отнести также и то, что каретки с зажимными губками могут монтироваться на существующем вертикальном гидравлическом прессе, вследствие чего конструкция становится многофункциональной.

В конструкцию устройство для нагружения заготовок [15] могут встраиваться разнообразные измерительные системы, что позволяет проводить контроль усилий и смещению элементов технологической системы (рисунок 4). По полученным данным возможно группирование заготовок например по категориям прочности.



Станина 1, силовой цилиндр 2, подвижный захват 3, неподвижный захват 4, наконечники 5, 6, штанга 7, шаровые шарниры 8, 9, счетчик 10, датчик перемещения 11, реле 12, шток 13, плунжер 14, блок управления подачей рабочей жидкости 15, компаратор 16, измеритель давления 17, устройства индикации группы прочности 18, 19, 20, устройства маркировки 21, 22, 23

Рисунок 4 - Устройство нагружения

На рисунке 5 показана диаграмма для сечения, по которому должен произойти обрыв штанги, если последнюю тянуть до обрыва. Практический интерес представляет начальный участок диаграммы, справедливый для любого сечения тела штанги. Растяжению заготовки до точки А1 (кривая 1) соответствует упругая деформация с относительным удлинением $\varepsilon_{упр}$. Пластической деформации с относительным удлинением $\varepsilon_{пл}$ соответствует отрезок кривой А1-В1.

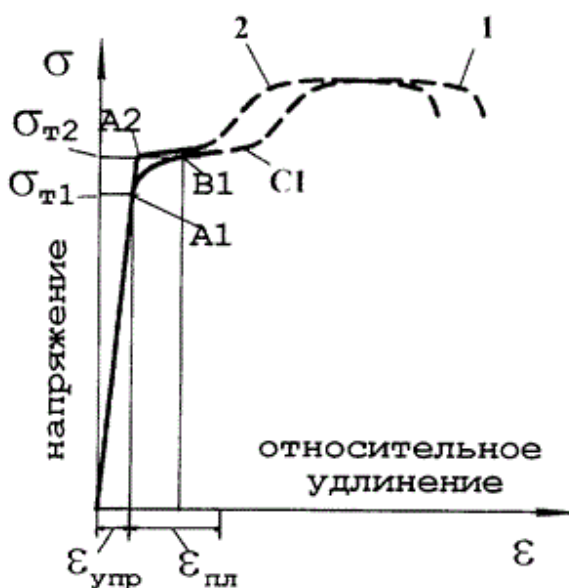


Рисунок 5– Схема нагружения

В процессе пластической деформации материал вала упрочняется. Предел текучести (усредненный по сечению) возрастает от величины σ_{T1} в точке А1 до σ_{T2} в точке В1. Величина σ_{T2} связана с давлением в гидроцилиндре в момент окончания правки следующим соотношением:

$$\sigma_{T2} = \frac{P_{ц} F_{ц}}{F_{шт}}, \quad (1)$$

где $F_{ц}$ - площадь штоковой полости цилиндра;

$P_{ц}$ - давление;

$F_{шт}$ - площадь сечения тела штанги.

Если теперь разгрузить вал, а затем вновь его растянуть, то процесс пластической деформации для упрочненного вала начнется с точки А2 (кривая 2), а предел текучести в момент начала пластической деформации будет равняться σ_{T2} . Таким образом, для того чтобы определить предел текучести выправленного вала σ_{T2} , достаточно измерить давление $P_{ц}$ в силовом цилиндре в момент окончания правки, а для того чтобы отнести вал к той или иной группе прочности, необходимо сравнить это давление с диапазоном аналогичных давлений, заранее определенным для валов каждой из групп прочности.

Техническое решение в [19] включает в себя правку местной кривизны вала. Это делается путем деформации, которая включает в себя упругую и пластическую составляющие. После правки проводится контроль длины изделия и расстояния, на которое сместился подвижный захват на этапе упругого деформирования, а также контроль величины усилия. Критерием выполнения операции является равенство пластической деформации заданной величине (рисунок 6).

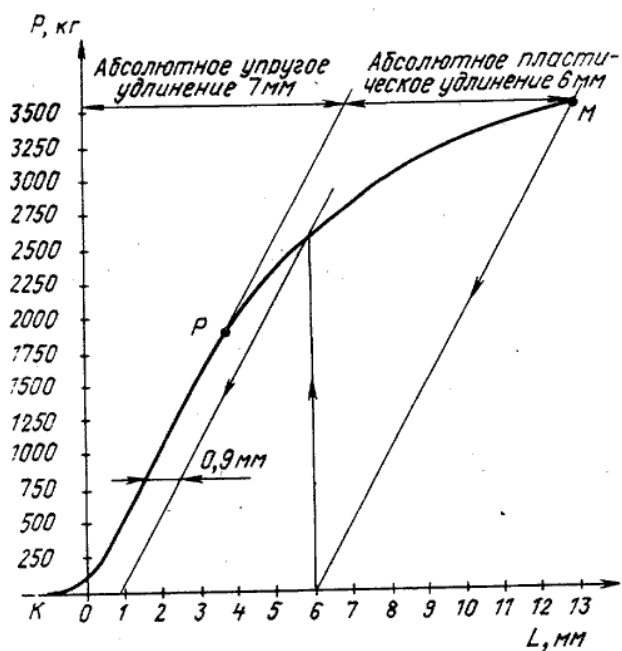


Рисунок 6 - Кривая нагружения-разгрузки

Техническое решение в [21] заключается в правке с повторным нагружением заготовки (рисунок 7). Проводится контроль фактической пластической деформации после частичной разгрузки до заданного уровня и правку продолжают до достижения заданной величины деформации. Это позволяет снизить влияние неизвестной заранее упругой деформации.

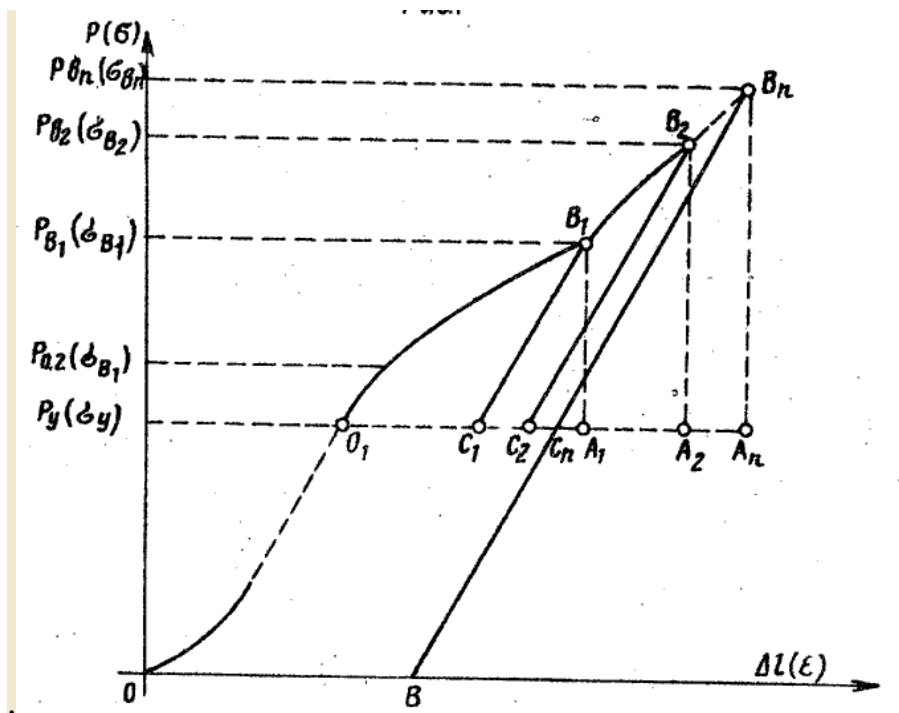
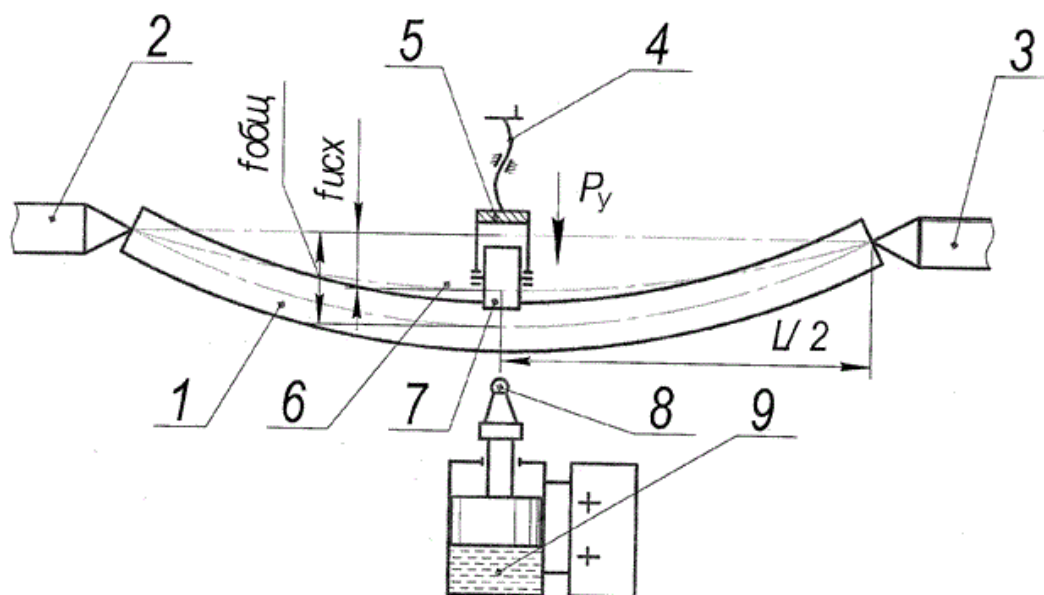


Рисунок 7 - Кривая нагружения-разгрузки

Разработан способ правки с использованием методов деформирования [7]. Он включает правку мало жестких валов поверхностным пластическим деформированием (ППД). Упругое деформирование изгибом вала ведут с одновременным ППД. Для инструмента типа накатника обеспечивают постоянное усилие деформирования. При этом инструмент ведут вдоль продольной образующей параллельно оси заготовки (рисунок 8).

Предварительное упругое деформирование не жесткого вала осуществляют приложением поперечной силы с вогнутой стороны изделия

в направлении деформирующего инструмента на определенную величину. Правку с одновременным ППД осуществляют в каждом поперечном сечении заготовки с обеспечением смещения ее оси вращения на величину $f_{общ}$ на участке, который симметрично расположен относительно середины вала.



1 – заготовка; 2,3 – передний и задний центра; 4 - кинематическая пара; 5 - поперечная каретка; 6- кронштейн; 7 - опорные ролики; 8 – накатник; 9 – рабочая среда

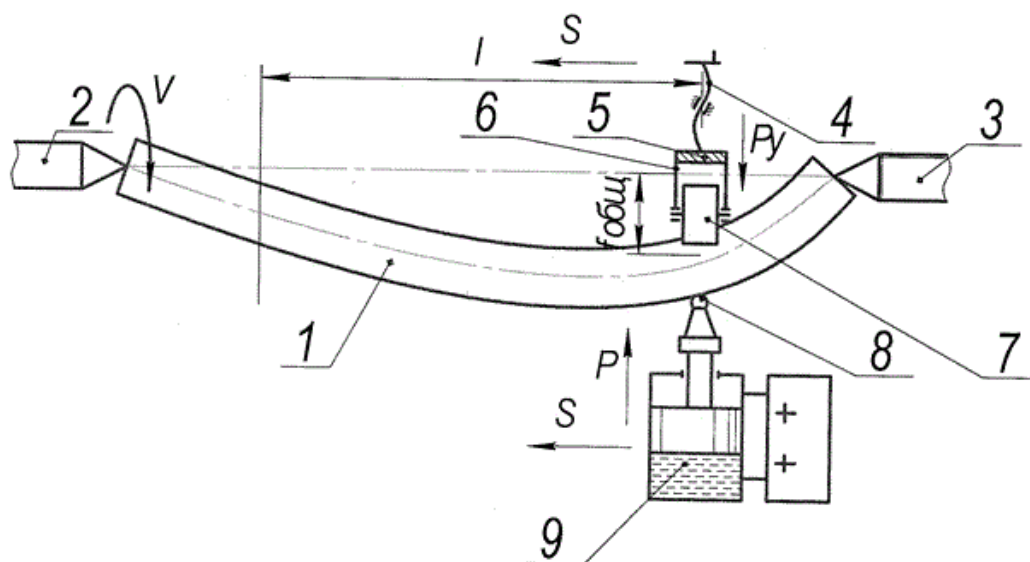
Рисунок 8 - Схема правки вала в середине пролета

Накатник 8 закрепляют в рабочем органе станка. Устройство правки заготовки 1 состоит из кинематической пары 4 и поперечной каретки 5. Кронштейн 6 имеет опорные ролики 7.

В данном способе деформирования правки создается неравномерность пластической деформации в поперечном сечении заготовки. Она необходима для снижения кривизны. При установке в центрах 2, 3 заготовку 1 поворачивают выпуклым профилем к накатнику 8. После этого давят опорой 6 на заготовку 1 с деформацией $f_{общ}$. Накатник 8 с заданным

усилием P , которое задается режимом ППД. Затем с вращением заготовки 1 и продольной подачей инструмента проводят обработку. Длина l рабочего участка, где проходит обработка, симметрична относительно середины заготовки (рисунок 9). За счет переменного по обороту усилия деформирование поверхностного слоя происходит с выпуклой стороны, что и приводит к выпрямлению вала в плоскости изгиба.

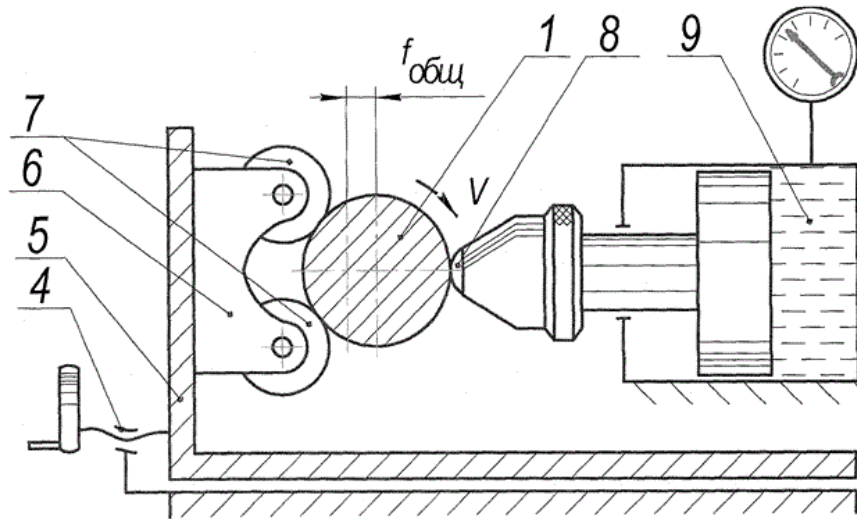
Данный метод ведет к формированию неравновесного распределения остаточных напряжений.



1 – заготовка; 2,3 – передний и задний центра; 4 - кинематическая пара; 5 - поперечная каретка; 6- кронштейн; 7 - опорные ролики; 8 – накатник; 9 – рабочая среда

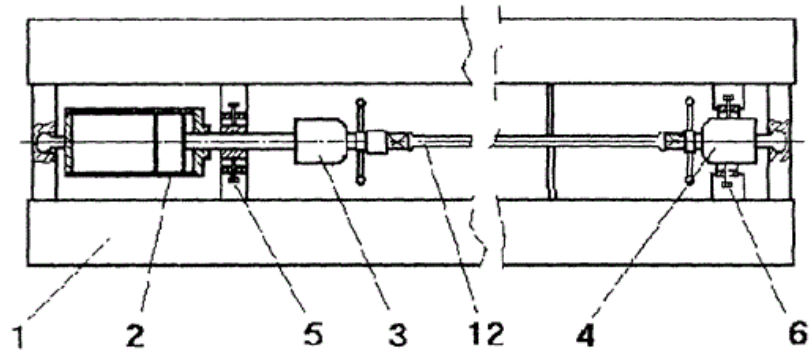
Рисунок 9 - Схема правки вала в конце пролета

В описании патента [21] рассматривается способ механизированной правки новых или бывших в употреблении насосных штанг (рисунок 10). Особенность установки в том, что она имеет механизм для демпфирования удара, возникающего в случае обрыва штанги. На рисунке 11 представлен общий вид устройства, на рисунке 12 - конструкция неподвижного захвата с демпфирующим механизмом.



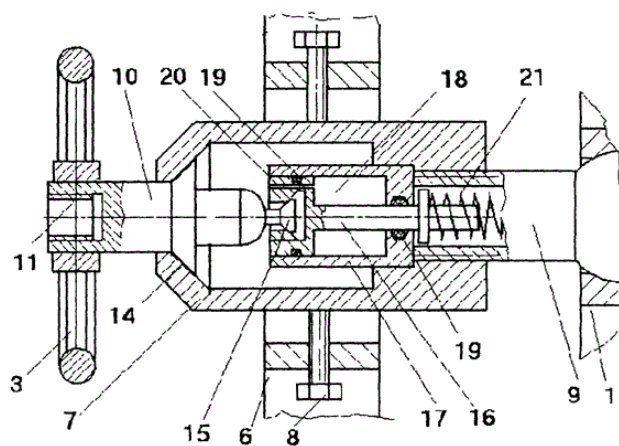
1 – заготовка; 4 - кинематическая пара; 5 - поперечная каретка; 6- кронштейн; 7 - опорные ролики; 8 – накатник; 9 – рабочая среда

Рисунок 10 - Схема устройства для правки вала



Станина 1, силовой цилиндр 2, подвижный и неподвижный захваты 3 и 4, узлы ориентирования 5 и 6, корпус 7, винт 8, шаровой шарнир 9, наконечник 10, резьба свинчивания 11, штанга 12, маховик 13, конусная поверхность 14, муфта 15, поршень 16, цилиндр 17, пространство 18, уплотнение 19, жиклер 20, пружина 21

Рисунок 11 - Вид установки для правки



станина 1, подвижный захват 3, 4, узел ориентирования 6, корпус 7, винт 8, шаровой шарнир 9, наконечник 10, резьба свинчивания 11, штанга 12, маховик 13, конусная поверхность 14, муфта 15, поршень 16, цилиндр 17, пространство 18, уплотнение 19, жиклер 20, пружина 21

Рисунок 12 - Механизм демпфирования

Выводы по разделу

Выполнен анализ влияния технологических методов и их особенности по формированию технологических остаточных напряжений. Проанализированы методы как повышающие, так и понижающие остаточные напряжения. К первым отнесены метода правки изгибом и обработка поверхностным пластическим деформированием, а также термомеханическая обработка, закалка, черновые лезвийные методы, а также чистовые отделочные (абразивная обработка), при условии, что последняя выполняется при ограниченных скоростях резания и подачи. К технологическим методам, снижающим уровень остаточных технологических напряжений, отнесены стабилизирующие виды термообработки (отжиг, нормализация, отпуск), а также вибрационная обработка, вибро-термическая обработка, обработка ультразвуком. Вибропрессование, а также термо-силовая обработка, за счет изменения технологических режимов могут обеспечивать как повышение, так и снижение уровня остаточных напряжений.

2 Управление остаточными напряжениями

2.1 Определение параметров деформации и напряжений

Для определения параметров материала можно использовать кривые нагружения при испытаниях на растяжение. Кривая нагружения при испытании на растяжение содержит информацию о свойствах материала при различных уровнях и скоростях деформации. По этой кривой можно определить следующие параметры, которые характеризуют материал. Это предел прочности. Он определяет максимальную нагрузку, которую может выдержать материал до разрушения [23].

Определяем предел текучести. Это максимальная нагрузка, при которой материал исчерпывает свойства упругой деформации и начинает пластически деформироваться. Модуль упругости - отношение напряжения к деформации в упругой области кривой нагружения, характеризует жесткость материала при растяжении. Для конкретных условий нагружения можно определить энергию разрушения - количество работы, необходимое для полного разрушения материала [28]. Оно определяется по площади под кривой нагружения. Точка разрыва, то есть место на кривой нагружения, где происходит разрушение материала при исчерпании предела прочности. Еще один параметр, характеризующий жесткость материала - коэффициент Пуассона. Это отношение продольной деформации к поперечной деформации в рамках кривой нагружения. Дополнительно, по кривой нагрузки можно определить удлинение и сужение образца при разрыве, что позволяет оценить способность материала к деформации без разрушения. Все эти параметры важны для понимания свойств материала, его технических характеристик и выбора оптимального материала для конкретной инженерно-технической задачи.

Энергия пластической деформации, запасенная в материале, определяется как работа, затраченная на деформацию материала в

пластическую зону. Когда материал пластически деформируется, это приводит к изменению внутренней энергии материала, которая может быть сохранена в виде энергии деформации [6].

Для расчета энергии пластической деформации используют формулу:

$$W = \int \sigma d\varepsilon, \quad (1)$$

где W - энергия пластической деформации,

σ - напряжение,

ε - относительная деформация, интеграл берется от начального значения деформации до конечного.

Для расчета этой энергии необходимо знать зависимость напряжения от деформации материала, которая определяется экспериментально. Эта зависимость может быть представлена в виде кривой напряжения-деформации, полученной в результате испытаний материала на растяжение.

Параметры материала, которые учитываются при расчете энергии пластической деформации, включают прочностные характеристики материала [5]. К ним относят такие параметры, как предел текучести и предел прочности, а также модуль упругости - характеристику жесткости материала, которая также используется при расчете энергии пластической деформации. Также необходимо учитывать размер и форму образца, на котором проводится испытание.

Энергоемкость процесса пластического деформирования можно снизить [37]. Энергоемкость процесса пластического деформирования зависит от многих параметров, таких как свойства материала, условия деформирования и параметры обработки. При правильном выборе этих параметров можно снизить энергоемкость деформирования. Ниже представлены некоторые пути для снижения энергоемкости процесса пластического деформирования:

– использование материалов с более высоким значением предела текучести. Это позволяет увеличить деформационные возможности материала

при сохранении его прочности, что в свою очередь позволяет снизить энергоемкость процесса пластического деформирования;

- оптимизация технологии пластического деформирования, включая установление оптимальных значений параметров обработки, применение более эффективных инструментов и методов обработки [22];

- уменьшение переходов в действующем маршруте последовательности обработки, при этом сохранение технологических режимов, которые обеспечивают максимальную эффективность [20];

- создание материала с лучшими свойствами по термической стабильности, что позволяет увеличить качество процесса обработки за счет уменьшения размеров формирующихся зерен;

- применение методов обработки с своевременными циклами охлаждения и нагрева. Они позволяют увеличить производительность процесса обработки и уменьшить энергоемкость процесса пластического деформирования;

- оптимизация формы обрабатываемых деталей путем формирования рационального припуска и напуска. Это позволяет снизить количество отходов при обработке и, соответственно, уменьшить энергоемкость процесса.

2.2 Технологическое управление остаточными напряжениями

Существует несколько видов термической обработки, которые могут помочь снизить уровень остаточных напряжений.

Категория стабилизирующих методов обработки. К ним относят отжиг. Отжиг - это нагревание материала до определенной температуры и последующее его медленное охлаждение в печи. Он может помочь снизить остаточные напряжения, вызванные пластической деформацией материала.

Разновидность отжига - высокотемпературный отжиг. Это процесс, при котором материал нагревается до очень высокой температуры (обычно более 1000 градусов Цельсия) и затем медленно охлаждается. Этот процесс также

может помочь снизить остаточные напряжения. Причем необходимо правильно проектировать операцию, так могут наводиться новые остаточные напряжения, вызванные фазовыми переходами.

Упрочняющий вид термообработки – закалка. Это процесс, при котором материал нагревается до очень высокой температуры и затем быстро охлаждается в воде или масле. Здесь максимальный риск повысить или сформировать неуравновешенные остаточные напряжения, вызванные пластической деформацией материала, температурными воздействиями или фазовыми переходами.

Частично эффект от закалки можно скомпенсировать отпуском. Отпуск - это процесс, при котором закаленный материал нагревается до более низкой температуры (ниже температуры критических точек) и затем медленно охлаждается. Этот процесс может помочь снизить остаточные напряжения, вызванные закалкой.

Все эти методы могут помочь снизить уровень остаточных напряжений в материале. Однако выбор конкретного метода зависит от типа материала, его свойств и характера остаточных напряжений.

Кроме температурных методов, существуют другие способы обработки, основанные на внесении энергии в материал. Это приводит к перестройке структуры и снижению остаточных напряжений. Существует несколько вибрационных методов, которые могут помочь снизить остаточные напряжения

Ультразвуковая обработка - это процесс, при котором материал подвергается воздействию высокочастотных ультразвуковых волн. Это может помочь снизить остаточные напряжения, за счет поглощения энергии колебаний.

Вибропрессование - это процесс, при котором материал подвергается воздействию вибраций и давления. Этот метод может помочь снизить остаточные напряжения за счет пластического деформирования ход которых

облегчается за счет разупрочнения материала, вызванного вибрационным воздействием.

Вибротермическая обработка - это процесс, при котором материал подвергается совместному воздействию вибраций и температуры. Он объединяет достоинства термообработки и чисто вибрационной обработки.

Геометрия и материал детали могут существенно влиять на коробление при изменении остаточных напряжений [3]. Если деталь имеет сложную геометрию или маложесткая, а также изготовлена из материала с неравномерными физико-механическими, химическими или структурными свойствами, то остаточные напряжения могут вызвать коробление и деформацию детали. В таких случаях может потребоваться дополнительная обработка или исправление формы детали после снижения остаточных напряжений путем правки.

Например, если деталь имеет тонкие стенки и большую длину, то остаточные напряжения могут вызвать коробление и деформацию детали в разных направлениях. Это приводит к потере точности и формы и расположения. В таких случаях может потребоваться дополнительная комплексная обработка в виде и правки полноразмерной и правки локальной. При этом не гарантируется исправление детали после снижения остаточных напряжений из-за сложных процессов.

Также материал детали может влиять на коробление при изменении остаточных напряжений [10]. Если материал имеет неравномерные или нестабильные свойства, то остаточные напряжения могут быть вызваны, например переходом одной фазы в другую (мартенсита в аустенит). Поэтому при выборе материала для детали необходимо учитывать его свойства и возможные последствия изменения остаточных напряжений. Или необходимо предусматривать технологии стабилизирующую структуру материала (обработка холодом).

Механическая обработка может, как увеличивать, так и снижать остаточные напряжения в детали. Например, при процессах лезвийной

обработки и шлифования может происходить снятие слоя материала, что приводит к снижению остаточных напряжений из-за перераспределения первоначального уравновешенного состояния. Однако, если процесс обработки не проводится правильно или используется неподходящее оборудование, то остаточные напряжения могут увеличиваться.

Лезвийные методы обработки, такие как фрезерование и токарная обработка, могут приводить к увеличению остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое. Это связано с тем, что при таких методах обработки происходит сильное деформирование материала задней поверхностью инструмента, вытягиванию зерен вдоль вектора силы резания. Это может приводить к появлению новых остаточных напряжений сжатия.

Абразивные методы обработки, такие как шлифование, суперфиниширование и полирование, могут приводить как к увеличению, так и к снижению остаточных напряжений в детали [5]. Если процесс шлифования проводится правильно и с использованием подходящего оборудования, то это приводит к оптимальному соотношению сил и температур в зоне резания. В определенных случаях (ограниченные скорость резания, силовое резание) происходит упрочнение поверхностного слоя. Однако, если процесс шлифования не проводится правильно или используется неподходящее оборудование, то остаточные напряжения могут увеличиваться. Температурный перегрев из-за не корректных режимов резания или отсутствия СОЖ приводит к неблагоприятным последствиям.

В целом, влияние механической обработки на остаточные напряжения зависит от многих факторов, таких как тип обработки, материал детали, ее геометрия и геометрия режущей части. Поэтому при выборе параметров обработки необходимо учитывать все это.

Закалка проводится путем нагрева детали до температуры выше фазовых превращений, затем ее быстрого охлаждения, что приводит к изменению и стабилизации микроструктуры материала и формированию остаточных напряжений. Это может привести к улучшению механических

свойств материала, таких как прочность и устойчивость к износу, но отрицательно сказывается на стабильности размеров и форм.

Остаточные напряжения могут оказывать влияние на свойства материала (например, на прочность, усталость и износ), поэтому их важно учитывать при проектировании и эксплуатации различных конструкций и деталей. Для их измерения и управления необходимо использовать специальные методы, например, рентгенодифрактометрический метод, магнитный контроль. Неуправляемые напряжения могут вызывать деформации, трещины и другие дефекты в детали. Однако, остаточные напряжения могут быть контролируемы, если использовать специальные технологии и методы [12]. Вот несколько способов управления остаточными напряжениями.

Поверхностное упрочнение является процессом, который используется для повышения твердости и износостойкости материалов путем изменения их микроструктуры на поверхности [11]. Для этого создают в поверхностных слоях материала более высокие напряжения, чем внутри.

Уровень остаточных напряжений зависит от многих факторов, таких как тип и параметры поверхностного упрочнения, свойства материала, методы испытаний и т.д. Обычно поверхностное упрочнение приводит к увеличению остаточных напряжений на поверхности материала, особенно в местах перехода от упрочненной к не упрочненной областям. Однако при правильном выборе технологии и параметров поверхностного упрочнения можно добиться снижения остаточных напряжений.

Вид остаточных напряжений может быть различным в зависимости от типа поверхностного упрочнения и свойств материала. Например, при наложении давления на поверхность материала могут возникнуть компрессионные остаточные напряжения, тогда как при использовании метода глубокой закалки преобладают тензорные остаточные напряжения. При этом компрессионные напряжения могут положительно влиять на усталостные характеристики материалов, а тензорные напряжения могут

обеспечивать лучшую коррозионную стойкость. Распределение остаточных напряжений также зависит от параметров поверхностного упрочнения. Обычно напряжения распределяются неравномерно на поверхности материала, и часто имеют максимальное значение на глубине около 0,2-0,4 мм. Однако при правильном выборе параметров поверхностного упрочнения можно добиться более равномерного распределения напряжений на поверхности материала.

Выводы по разделу

Для учета особенностей термической операции при формировании остаточных напряжений необходимо провести анализ влияния различных технологических факторов. Для термообработки это температуры нагрева и охлаждения. Нагрев должен быть достаточно высоким, чтобы обеспечить полное разупрочнение материала и последующее формирование напряжений, а охлаждение должно быть достаточно быстрым, чтобы остаточные напряжения сохранялись. Также для термообработки важны скорости нагрева и охлаждения. Слишком высокая скорость нагрева может привести к неоднородному нагреву материала и формированию нежелательных напряжений, а слишком низкая скорость охлаждения может привести к недостаточному разупрочнению материала. Время выдержки при температуре для формирования желаемых напряжений без излишнего разупрочнения материала. Способа охлаждения (воздушное охлаждение, охлаждение водой, охлаждение в масле), который обеспечит сохранение остаточных напряжений. Для достижения желаемых остаточных напряжений необходимо проводить экспериментальные исследования на прототипах изделий, анализировать результаты и вносить коррективы в параметры термической операции.

3 Результаты моделирования силового нагружения вала

3.1 Описание эксперимента

Общую методологию для моделирования в программе следующая. Создание 3D-модель вала в программе. Это выполнено через создание нового проекта и импорта геометрических данных вала (рисунок 13).

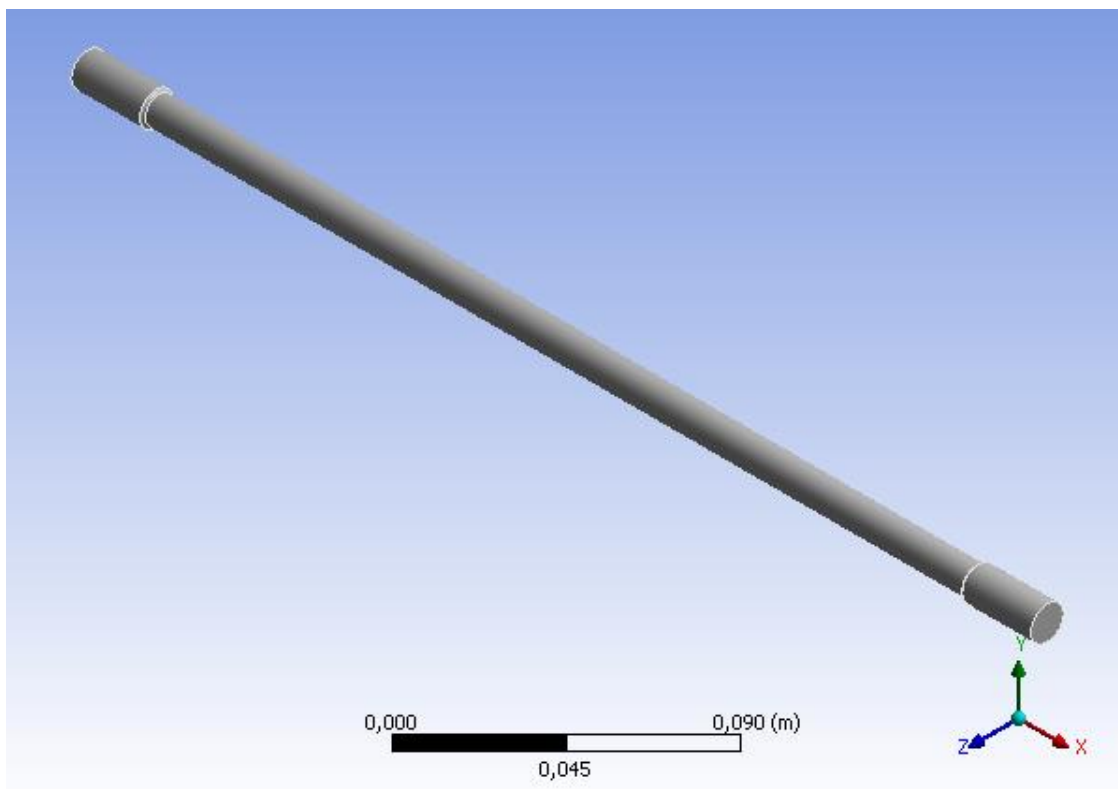


Рисунок 13 – Исходный образец

Определение нелинейного материала, используемого для изготовления вала. Заданы соответствующие свойства материала, такие как модуль Юнга, предел прочности и коэффициент Пуассона. Для учета пластичности задан секущий модуль упругости, соответствующий стадии пластического течения (таблицы 1 и 2).

Таблица 1 – Параметры материала

Модуль упругости, Па	Коэффициент Пуассона	Объемный модуль, Па	Модуль сдвига, Па
----------------------	----------------------	---------------------	-------------------

2,e+011	0,3	1,6667e+011	7,6923e+010
---------	-----	-------------	-------------

Таблица 2 – Параметры пластичности

Предел текучести, Па	Секущий модуль, Па
2,5e+008	1,45e+009

Заданы граничные условия для модели. Это включает задание фиксированных точек закрепления на одном конце вала. Задание определенного растягивающего усилия до завершения первого этапа расчета. Затем идет сброс усилия до нуля. Там, где прикладывалась сила, допускалось осевое движение вала (рисунок 14).

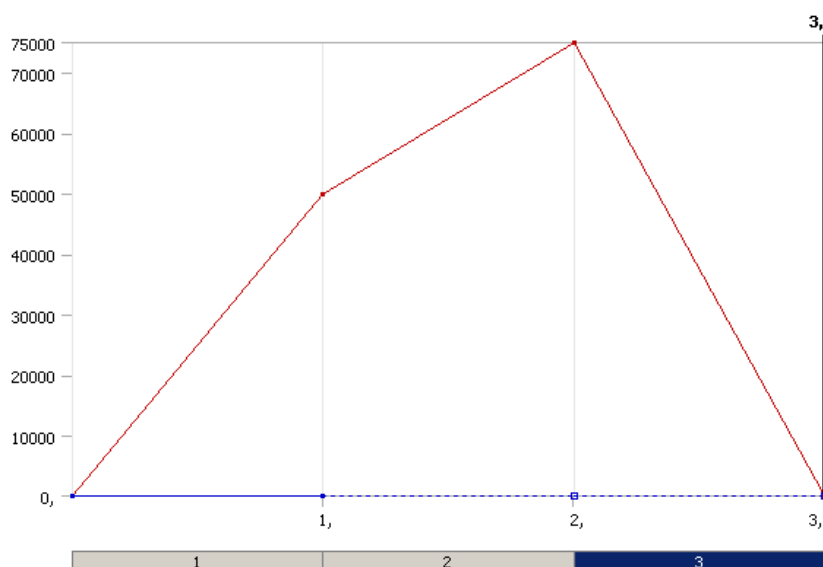


Рисунок 14 – Изменение силы по этапам расчета

После запуска анализа эквивалентной пластической деформации с использованием модуля Mechanical программы расчета методом конечных элементов.

Получены результаты анализа, такие как напряжения и деформации. Видно, что произошла ли пластическая деформация вала (рисунок 15) и таблица 3.

График напряжений показан на рисунке 16, таблица с данными 4, а сам образец, растянутый до значительной величины пластической деформации на рисунке 17.

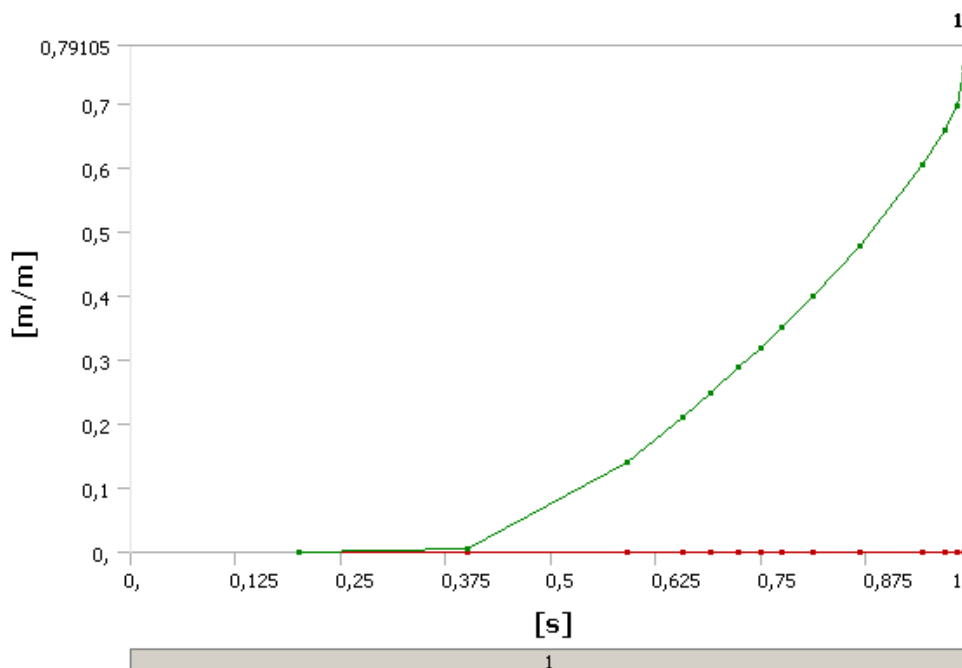


Рисунок 15 – Изменение пластической деформации

Таблица 3 – Деформация по этапам расчета

t, с	Максимум [м/м]
1	2
0,2	4,2722e-005
0,4	4,9332e-003
0,59059	0,13948
0,6573	0,20967

Продолжение таблицы 3

1	2
---	---

0,69065	0,24796
0,724	0,28795
0,74902	0,31892
0,77403	0,35069
0,81156	0,39995
0,86784	0,47872
0,94223	0,60449
0,96823	0,65757
0,98411	0,6956
0,99126	0,75561
0,99323	0,79105
1,	

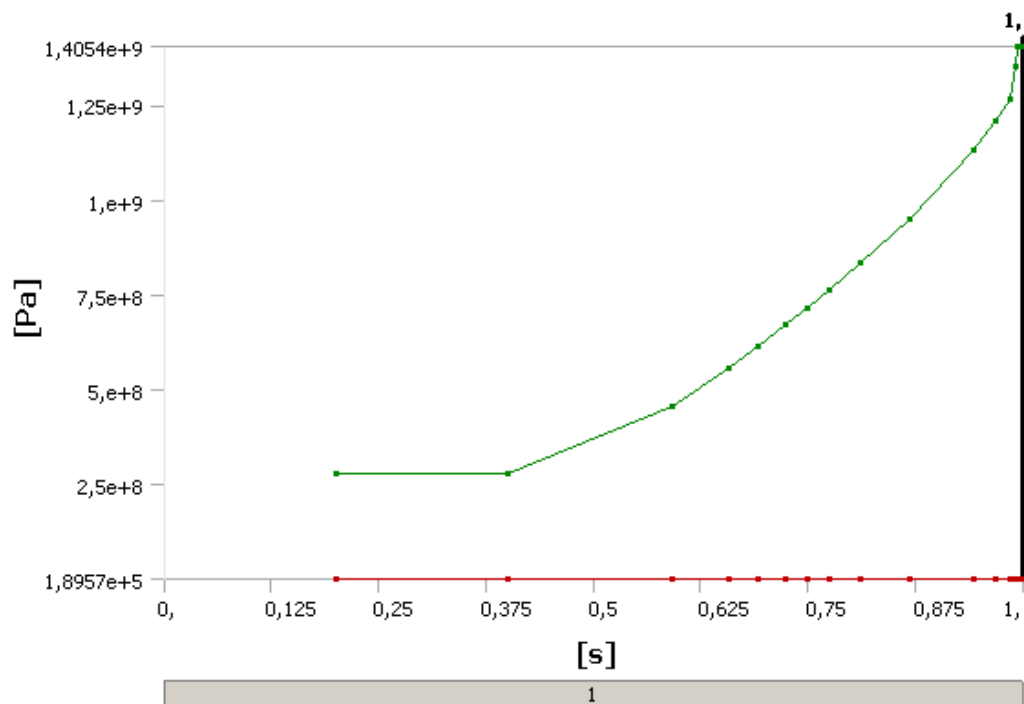


Рисунок 16 – Напряжения по этапам расчета

Таблица 4 – Крайние напряжения

Время, с	Минимальные напряжения, МПа	Максимальные напряжения, МПа
1	2	3
0,2	1,8957e+005	2,807e+008

Продолжение таблицы 4

1	2	3
---	---	---

0,4	3,9671e+005	2,7924e+008
0,59059	6,4647e+005	4,5351e+008
0,6573	7,7577e+005	5,5619e+008
0,69065	8,4882e+005	6,1218e+008
0,724	9,2813e+005	6,7066e+008
0,74902	9,9324e+005	7,1593e+008
0,77403	1,0622e+006	7,6238e+008
0,81156	1,1759e+006	8,3443e+008
0,86784	1,3785e+006	9,4966e+008
0,94223	1,7234e+006	1,131e+009
0,96823	1,8719e+006	1,2098e+009
0,98411	1,9718e+006	1,2662e+009
0,99126	2,019e+006	1,3536e+009
0,99323	2,0321e+006	1,4054e+009
1,		

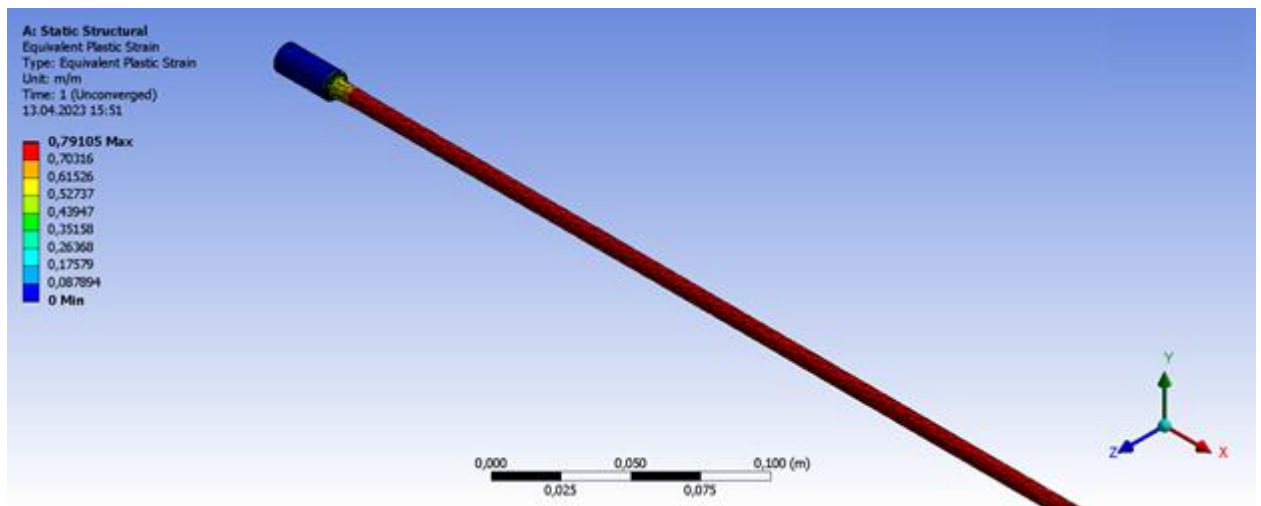


Рисунок 17 – Пластическая деформация

На рисунке 18 показан график изменения силы растяжения с новыми значениями (50000 Н).

На рисунке 19 показан график сходимости результатов расчета по смещению, а график на рисунке 20 показывает плавное изменение пластической деформации. Данные расчета приведены также по деформации в таблице 5, по напряжениям – в таблице 6.

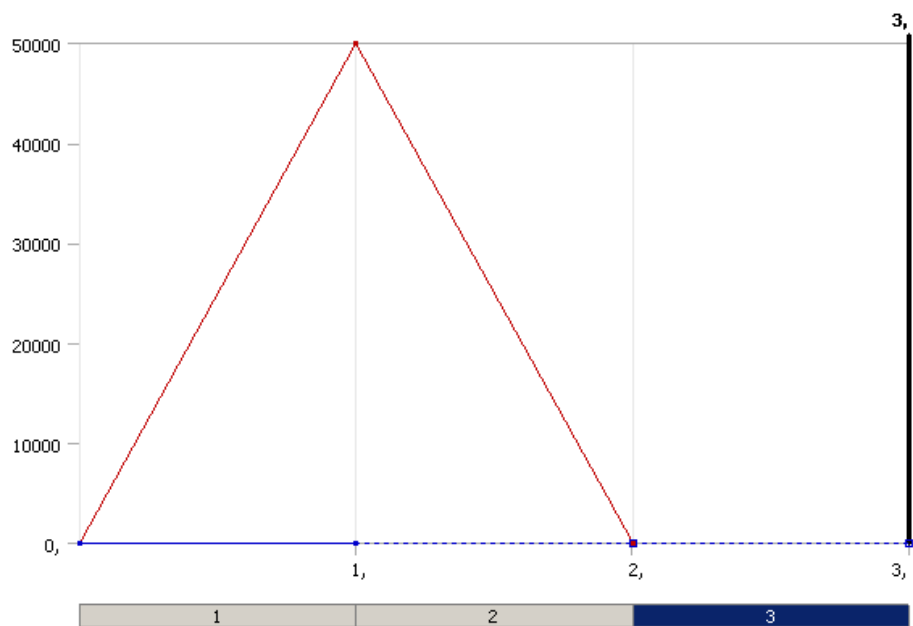


Рисунок 18 – Сила по этапам расчета

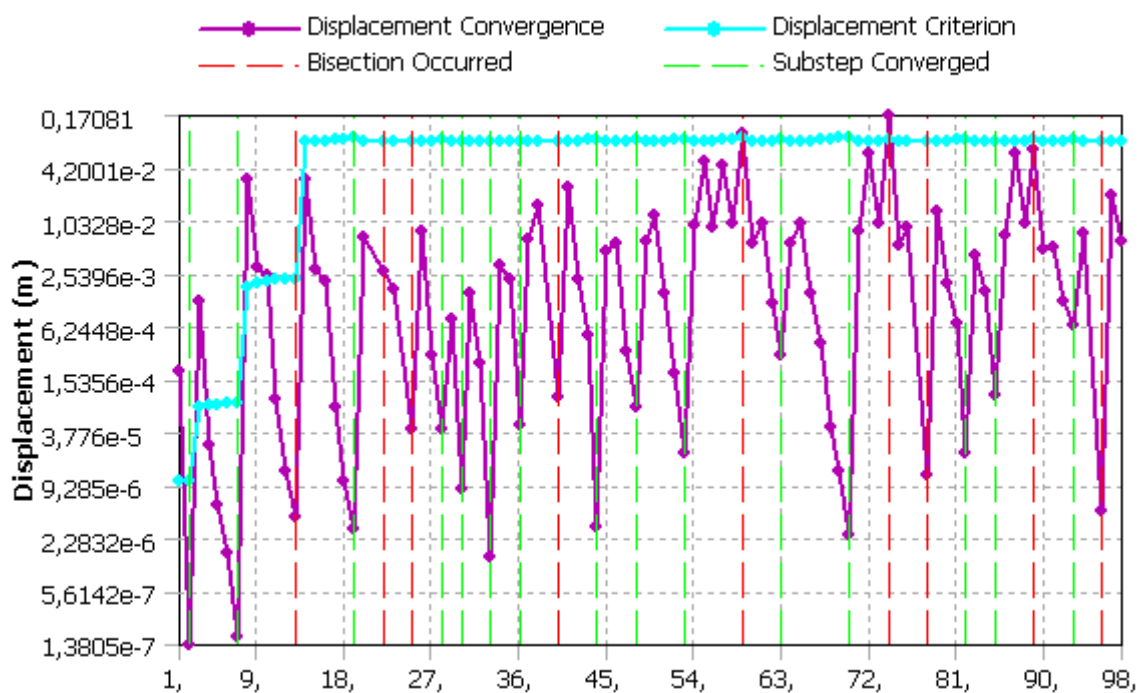


Рисунок 19 - График сходимости по смещениям

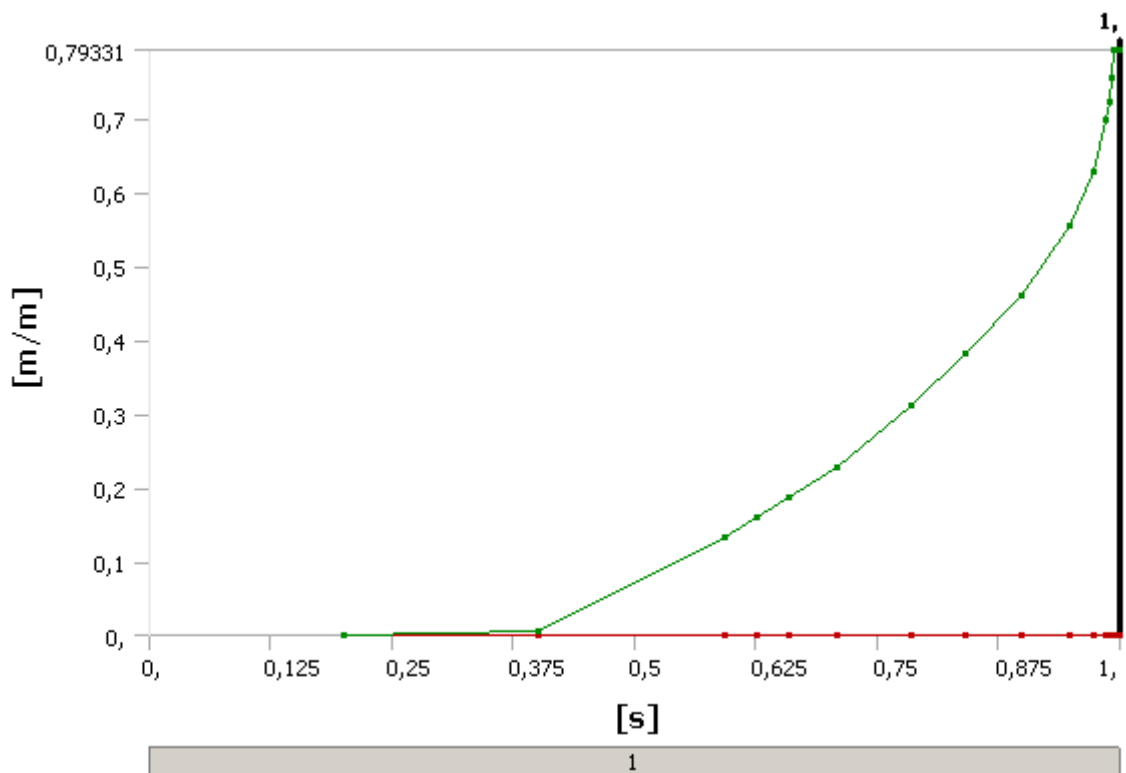


Рисунок 20 – Пластическая деформация

Таблица 5 - Пластическая деформация

Время, с	Величина
0,2	0,
0,4	4,8185e-003
0,59201	0,13204
0,62561	0,15844
0,65922	0,18551
0,70962	0,22821
0,78522	0,31137
0,84193	0,38101
0,89863	0,45984
0,94932	0,5545
0,97212	0,62803
0,98606	0,69833
0,9892	0,72174
0,99233	0,75417
0,99445	0,79331
1,	

Напряжения в образце показаны на графике на рисунке 21 и в таблице 6.

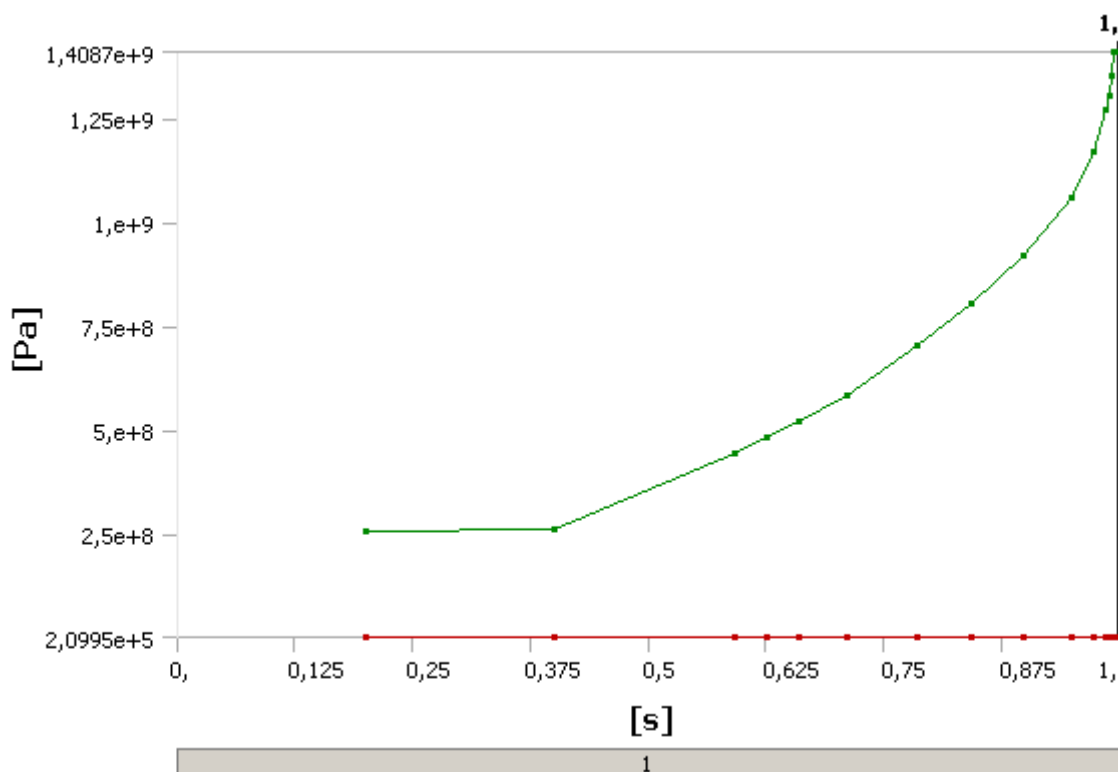


Рисунок 21 – Напряжения в образце

Таблица 6 – Напряжения

Время, с	Минимальные напряжения, МПа	Максимальные напряжения, МПа
0,2	2,0995e+005	2,5656e+008
0,4	4,389e+005	2,6137e+008
0,59059	7,1303e+005	4,428e+008
0,6573	7,8391e+005	4,8137e+008
0,69065	8,6103e+005	5,2092e+008
0,724	9,9197e+005	5,8331e+008
0,74902	1,2289e+006	7,0141e+008
0,77403	1,4446e+006	8,031e+008
0,81156	1,698e+006	9,184e+008
0,86784	1,9737e+006	1,0599e+009
0,94223	2,118e+006	1,1673e+009
0,96823	2,2125e+006	1,27e+009
0,98411	2,2345e+006	1,3042e+009
0,99126	2,2568e+006	1,3515e+009
0,99323	2,2719e+006	1,4087e+009

Модель образца со значительным искривлением оси показана на рисунке 22. Сила изменялась до 20000 Н и до нуля (рисунок 23). Сходимость результатов на рисунке 24.

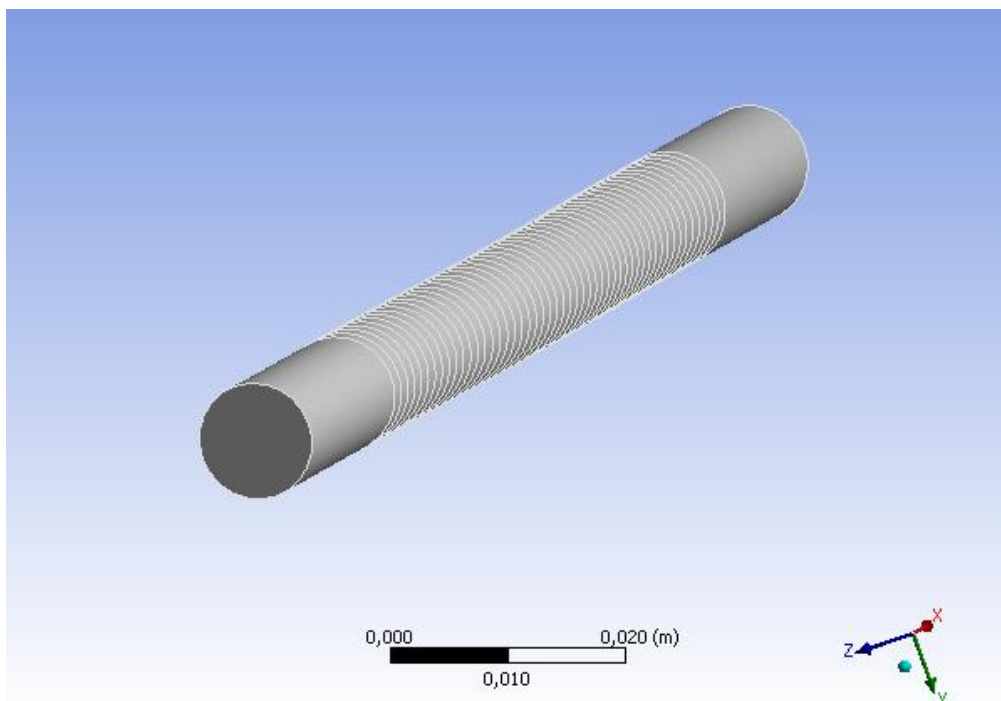


Рисунок 22 – Модель образца, составленного из смещенных объемов

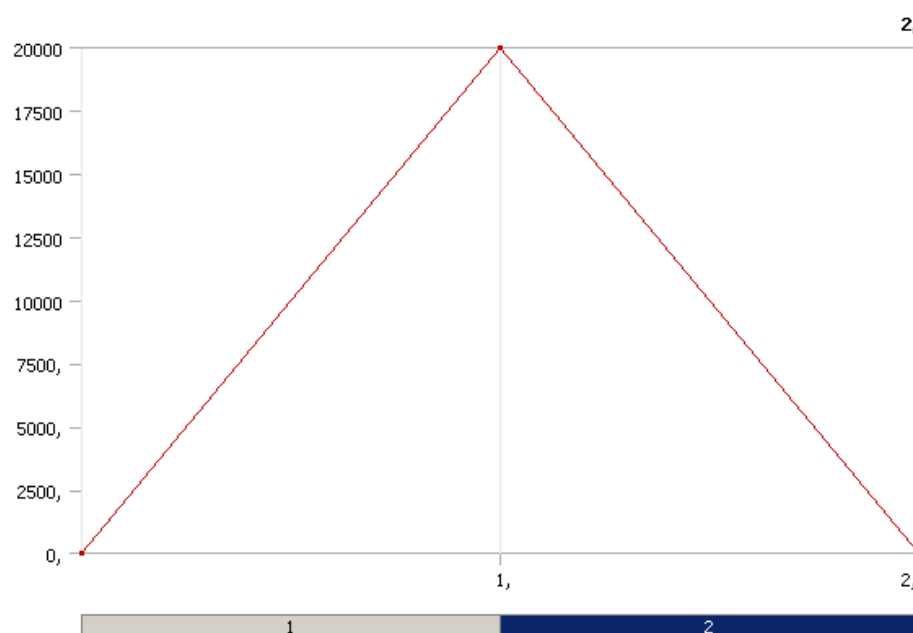


Рисунок 23 – График изменения силы по этапам расчета

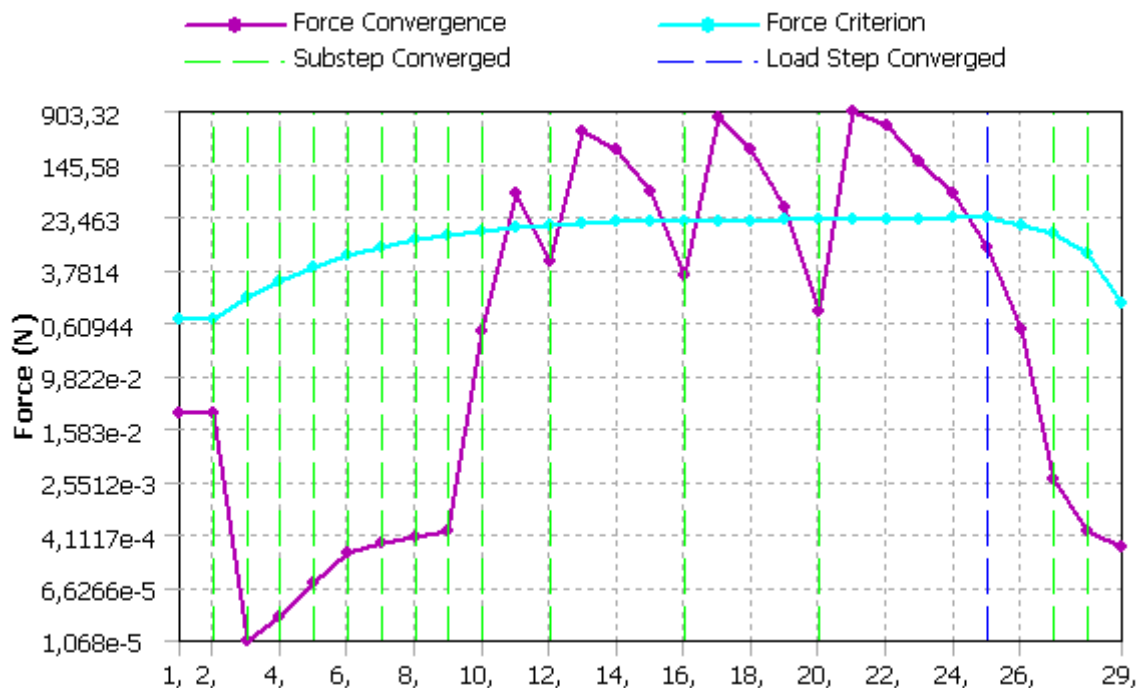


Рисунок 24 – График сходимости для схождения результатов по силе

Результаты расчета показывают максимальные и минимальные значения на всем цикле расчета следующие данные. Минимальное значение от 1623,2 Па до 79,25 МПа. Максимальные данные от 12,71 МПа до 299 МПа. Последняя величина превышает порог для определенного предела текучести 250 МПа.

На первой стадии идет активное нагружение до 20000 Н, вторая стадия – сброс нагрузки до 0 Н. Результат в таблице 7 и на рисунке 25.

Таблица 7 - Результаты расчета по пластической деформации

Время, с	Максимальные пластические деформации (м/м)
0,033333 - 0,59167	0
0,69167	0,000031316
0,79167	0,00037728
0,89167	0,0032594
0,94583	0,0091888
1 - 2	0,15006

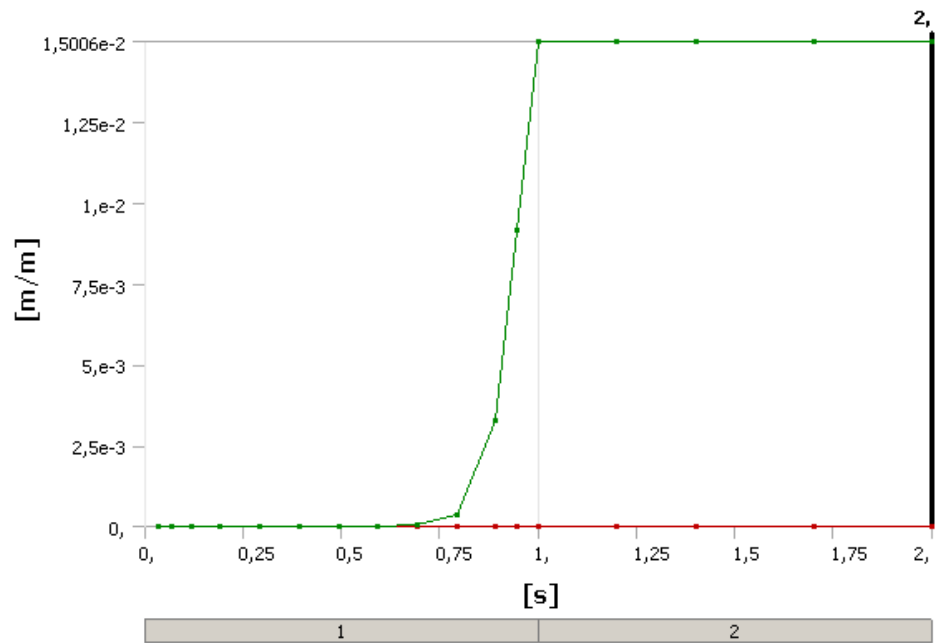


Рисунок 25 - Изменение пластической деформации

После модельного времени 1 с пластическая деформация имеет конечную величину 0,015. Напряжения максимальные и минимальные показаны на рисунке 26. После отсчета 1 с идет снижение напряжений за счет упругой разгрузки.

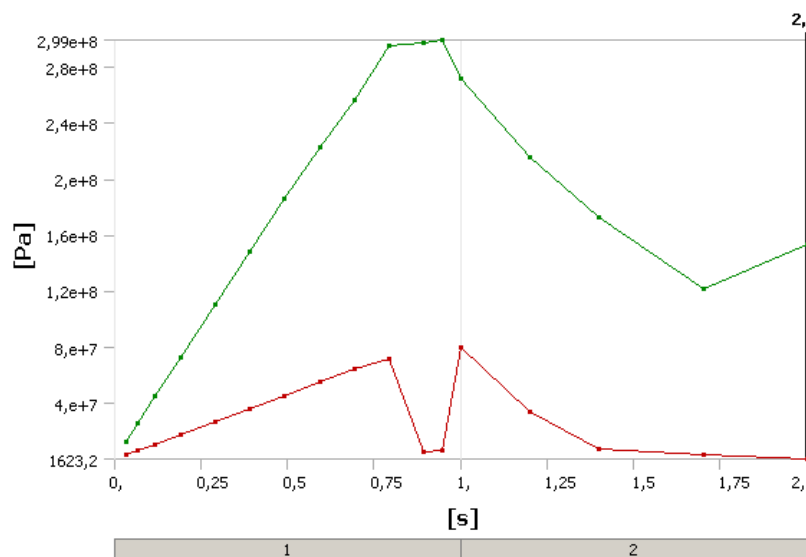


Рисунок 26– Напряжения по этапам расчета

Результаты расчета напряжений в таблице 8. Максимальные напряжения доходят до 299 МПа. Это превышает заданный предел текучести материала в 250 МПа.

Очень характерно выглядят зоны распределения пластической деформации по длине в соответствии с кривизной вала (рисунок 27). Это свидетельствует о неуравновешенности распределения остаточных напряжений по сечениям (рисунок 28).

Таблица 8 - Результаты расчета напряжений

Время модельное, с	Минимум напряжений, Па	Максимум напряжений, Па
0,033333	$2,9804 \cdot 10^6$	$1,2708 \cdot 10^7$
0,06667	$5,9738 \cdot 10^6$	$2,5397 \cdot 10^7$
0,11667	$1,0488 \cdot 10^7$	$4,4397 \cdot 10^7$
0,19167	$1,7313 \cdot 10^7$	$7,2819 \cdot 10^7$
0,29167	$2,6512 \cdot 10^7$	$1,1058 \cdot 10^8$
0,39167	$3,582 \cdot 10^7$	$1,4817 \cdot 10^8$
0,49167	$4,5236 \cdot 10^7$	$1,8562 \cdot 10^8$
0,59167	$5,4757 \cdot 10^7$	$2,2292 \cdot 10^8$
0,69167	$6,4362 \cdot 10^7$	$2,5569 \cdot 10^8$
0,79167	$7,1353 \cdot 10^7$	$2,9473 \cdot 10^8$
0,89167	$5,0026 \cdot 10^6$	$2,9692 \cdot 10^8$
0,94583	$5,8036 \cdot 10^6$	$2,99 \cdot 10^8$
1,	$7,9247 \cdot 10^6$	$2,7192 \cdot 10^8$
1,2	$3,3478 \cdot 10^7$	$2,157 \cdot 10^8$
1,4	$6,822 \cdot 10^6$	$1,7295 \cdot 10^8$
1,7	$2,6155 \cdot 10^6$	$1,2095 \cdot 10^8$
2,	1623,2	$1,5305 \cdot 10^8$

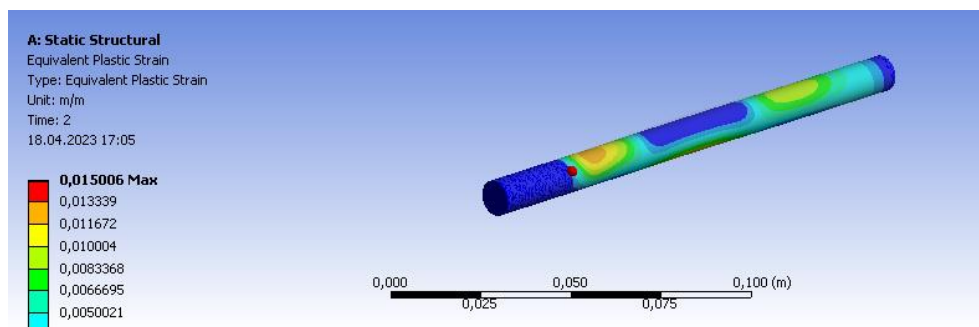


Рисунок 27- Распределение остаточных деформаций при растяжении

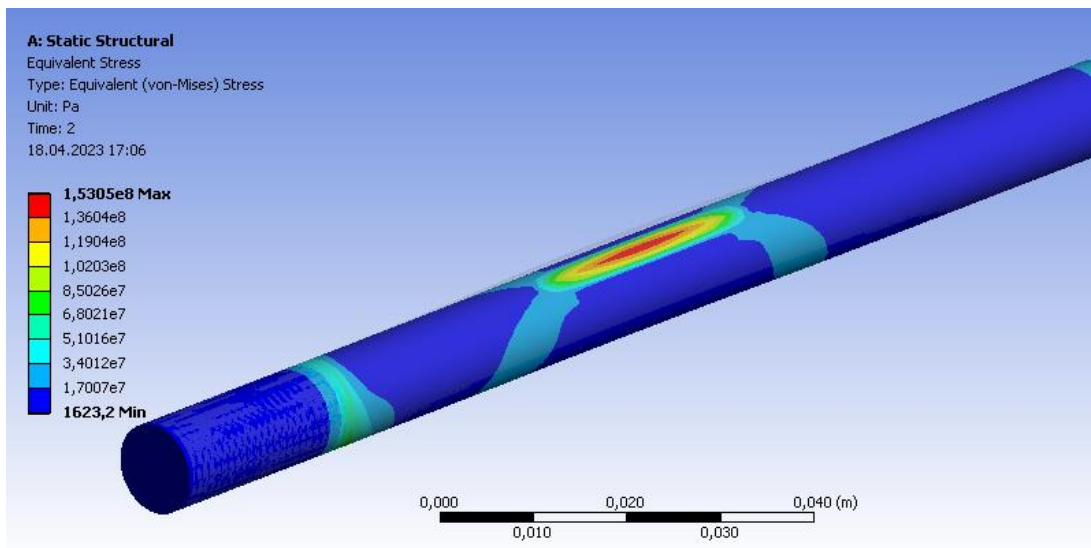


Рисунок 28 - Распределение напряжений при растяжении

Для того, чтобы избежать таких последствий, деформирование должно проходить при более высоких напряжениях. Это приводит к более интенсивной пластической деформации по длине. За счет этого выравнивается общий уровень напряжений. Сила до 30000 Н показана на рисунке 29.

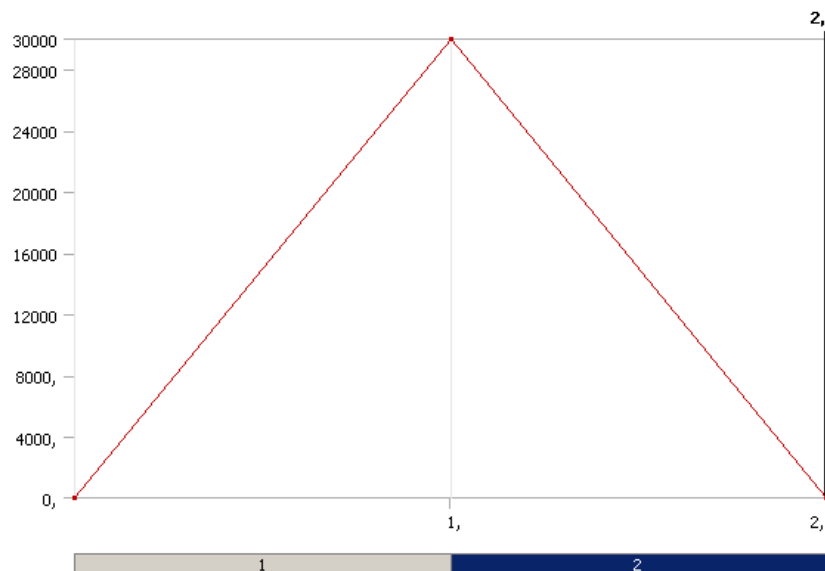


Рисунок 29 – График изменения силы по этапам расчета
 График сходимости результатов расчета на рисунке 30.

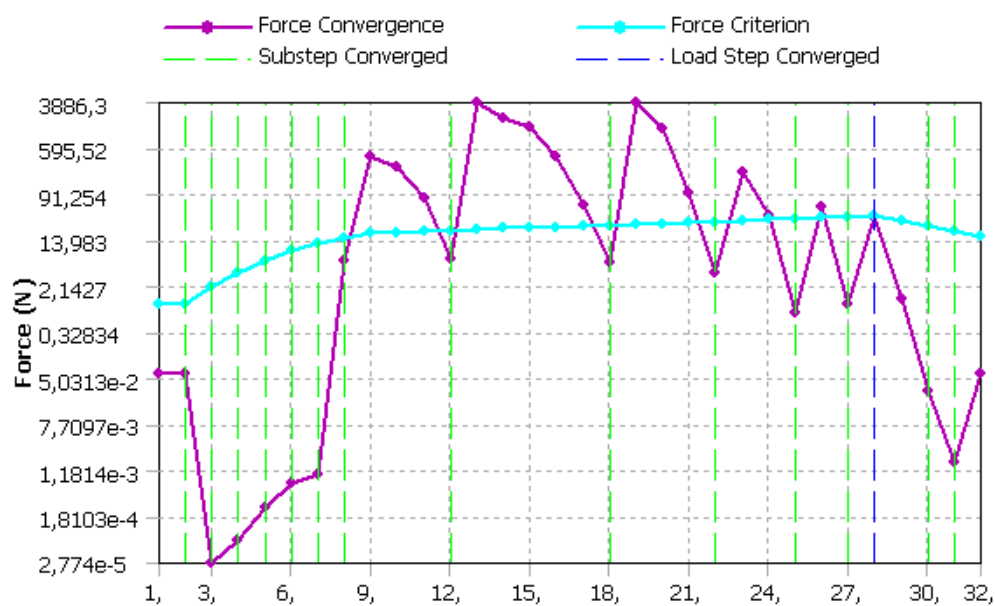


Рисунок 30 – График сходимости для схождения результатов по силе

Уровень деформации увеличивается на порядок по сравнению с предыдущим расчетом (рисунок 31). Максимальная деформация 0,14354 при 459 МПа (таблица 9).

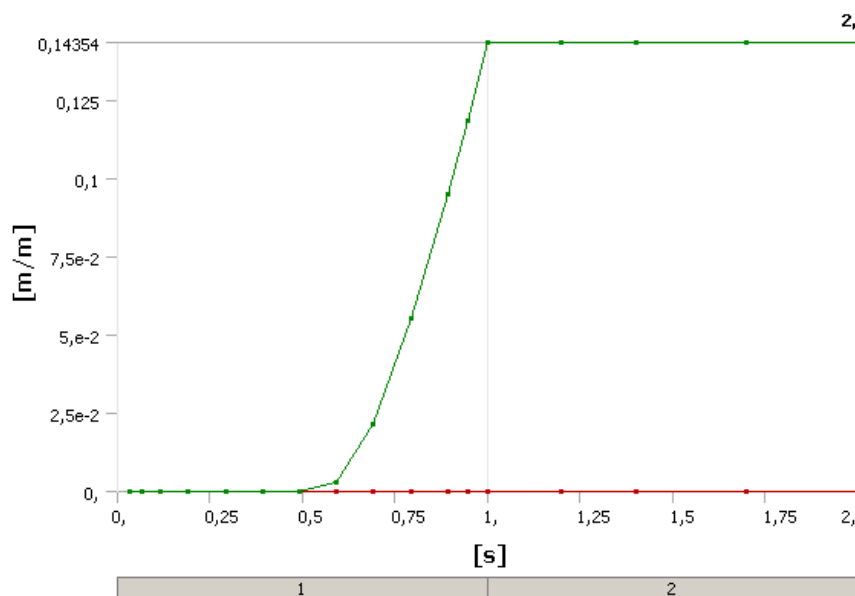


Рисунок 31 - Изменение пластической деформации

На первой стадии идет активное нагружение, вторая – сброс нагрузки до 0. Уровень напряжений до 459 МПа (рисунок 32 и таблица 10).

Таблица 9 - Результаты расчета по пластической деформации

Время, с	Максимальные пластические деформации (м/м)
0,033333 - 0,39167	0
0,49167	0,0014253
0,59167	0,0029268
0,69167	0,021388
0,79167	0,055154
0,89167	0,094927
0,94583	0,11873
1 - 2	0,14354

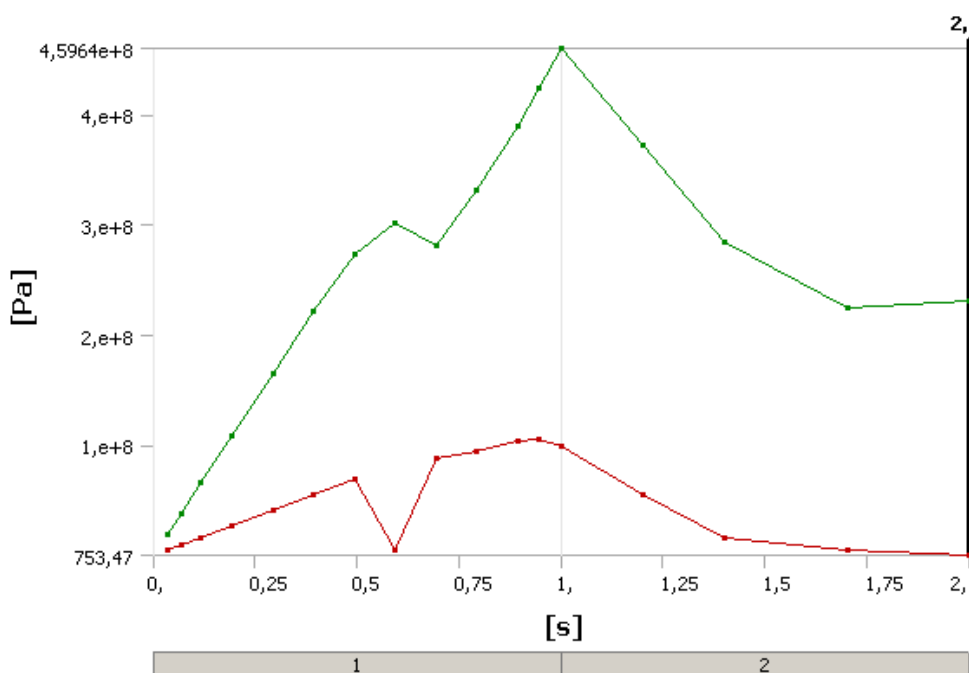


Рисунок 32 – Напряжения по этапам расчета

Таблица 10 - Результаты расчета напряжений

Время модельное, с	Минимум напряжений, МПа	Максимум напряжений, МПа
1	2	3
3,3333e-002	4,4755	19,055

Продолжение таблицы 10

1	2	3
6,6667e-002	8,9802	38,068
0,11667	15,791	66,511
0,19167	26,126	109,01
0,29167	40,123	165,36
0,39167	54,359	221,36
0,49167	68,397	272,71
0,59167	4,3975	300,6
0,69167	87,775	281,24
0,79167	94,641	330,56
0,89167	103,15	388,65
0,94583	104,91	423,41
1,	98,051	459,64
1,2	54,339	371,85
1,4	14,933	284,57
1,7	4,3155	223,84
2,	0,00075347	230,55

На рисунке 33 показано распределение пластических деформаций внутри вала, имеющих один уровень – 0,1435, на рисунке 34 – по поверхности.

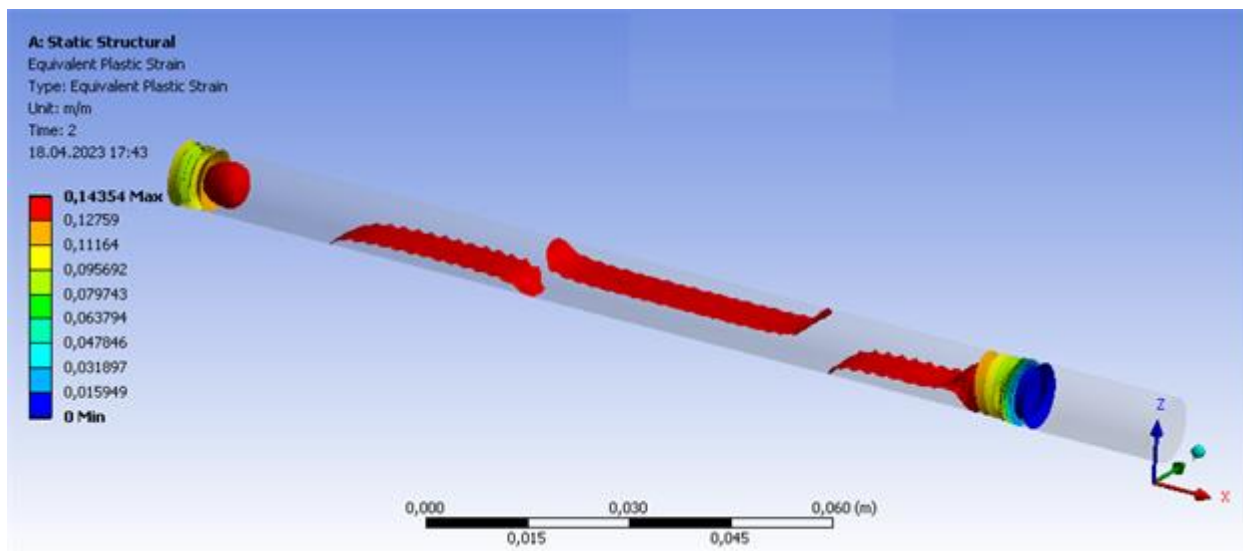


Рисунок 33 - Изоповерхности пластической деформации

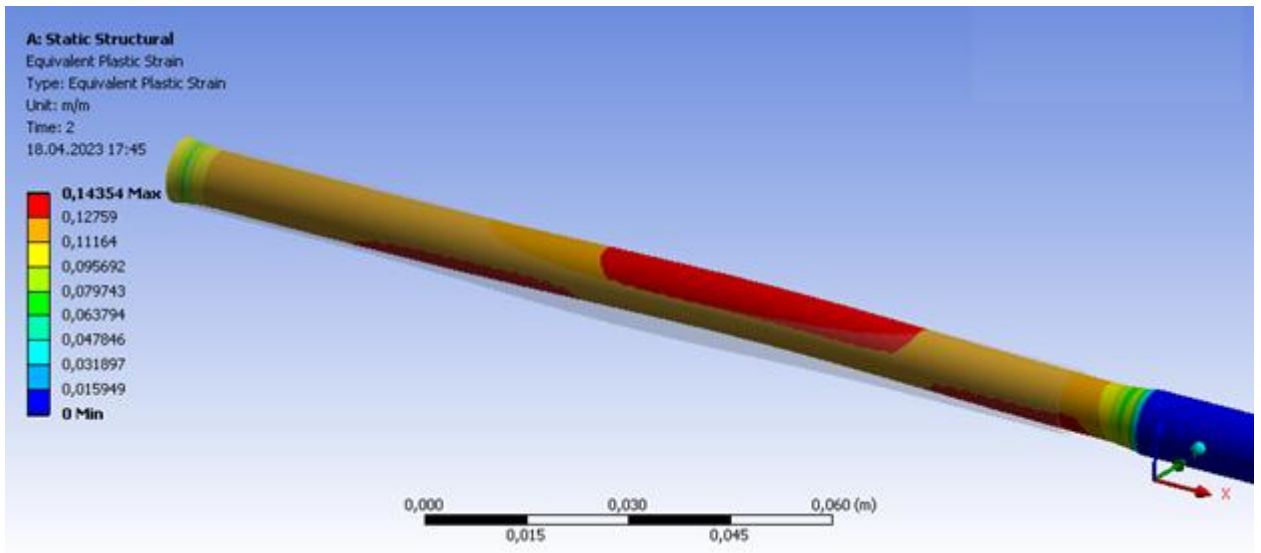


Рисунок 34 – Пластические деформации

Из-за изменения геометрии вала и свойств материала изменяются собственные частоты колебаний. Для исследования этого процесса проведен модальный анализ. Определялись первые 6 гармоник собственных колебаний вала. Схема закрепления соответствовала схеме нагружения. Жесткая заделка по одной шейке и подвижная в осевом направлении по другой. Результаты представлены на графике на рисунке 35 и в таблице 11.

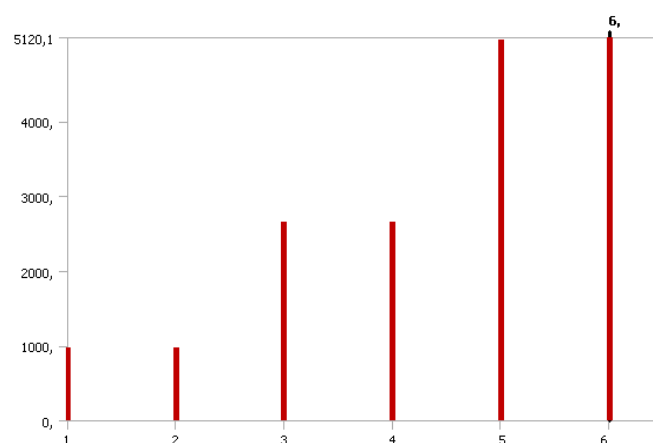


Рисунок 35 – Частоты колебаний

Таблица 11 – Частоты колебаний

Гармоника колебаний	Частота, Гц
1 мода	973,97
2 мода	974,43
3 мода	2653,
4 мода	2654,
5 мода	5091,4
6 мода	5120,1

Сила нагружения аналогична графику на рисунке 23.

Результаты расчета следующие (рисунок 36 и таблица 12).

Максимальная величина деформаций 0,010186 при 271,5 МПа.

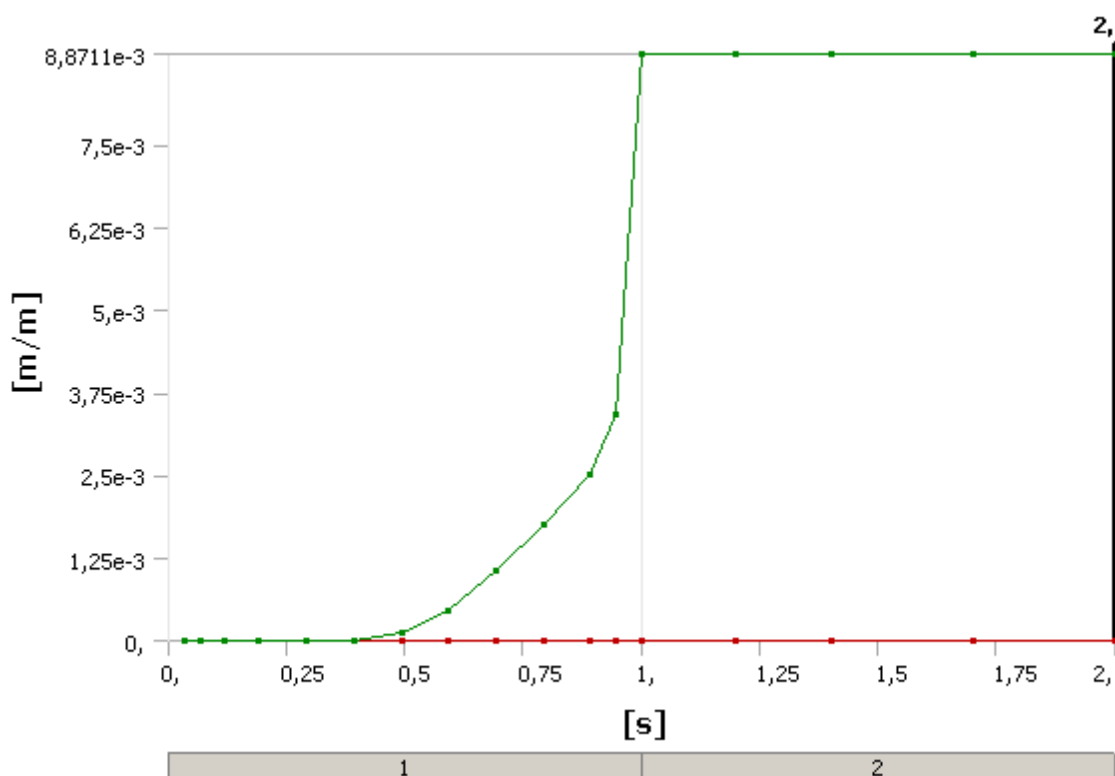


Рисунок 36 - Изменение пластической деформации

На первой стадии идет активное нагружение, вторая – сброс нагрузки до 0. На графике, на рисунке 37 показана общая деформации, где виден сброс упругой деформации после 1 с (таблица 13).

Таблица 12 - Результаты расчета по пластической деформации

Время, с	Максимальные пластические деформации (м/м)
0,033333-0,39167	0
0,49167	1,219e-004
0,59167	4,6355e-004
0,69167	1,0508e-003
0,79167	1,7654e-003
0,89167	2,5251e-003
0,94583	3,4233e-003
1 - 2	8,8711e-003

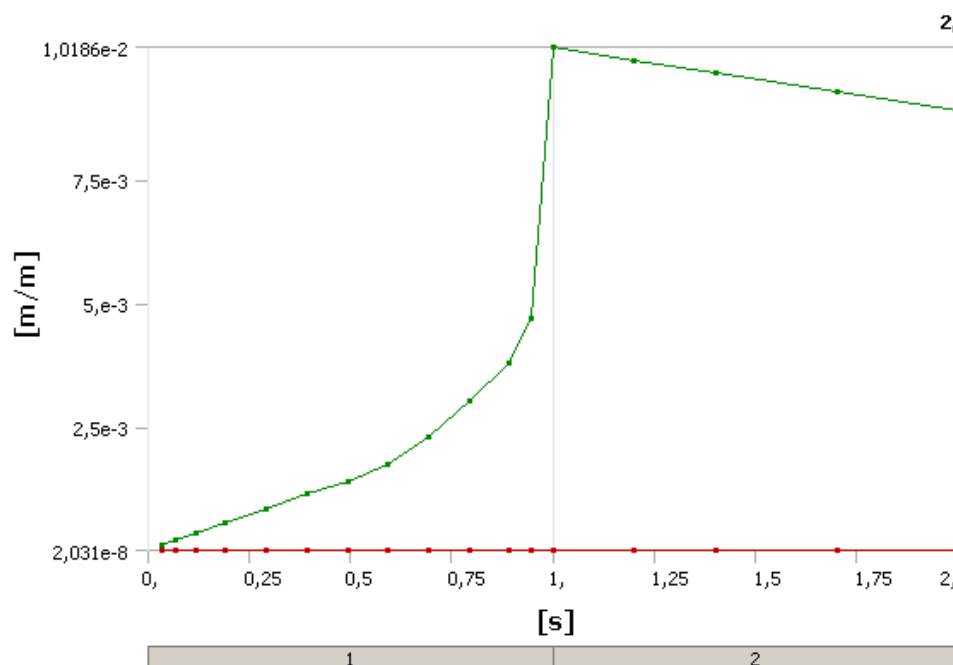


Рисунок 37 – Общая деформация по этапам расчета

Таблица 13 - Результаты расчета общей деформации

Время модельное, с	Минимум деформаций	Максимум деформаций
1	2	3
0,033333	7,5334e-008	9,808e-005
0,06667	1,5068e-007	1,959e-004
0,11667	2,6371e-007	3,4216e-004
0,19167	4,333e-007	5,605e-004

Продолжение таблицы 13

1	2	3
0,29167	6,5948e-007	8,4979e-004
0,39167	8,8572e-007	1,1371e-003
0,49167	1,114e-006	1,3737e-003
0,59167	1,3478e-006	1,7475e-003
0,69167	1,59e-006	2,3085e-003
0,79167	1,8464e-006	3,0283e-003
0,89167	2,1154e-006	3,7935e-003
0,94583	2,2571e-006	4,6984e-003
1,	2,3947e-006	1,0186e-002
1,2	1,9382e-006	9,924e-003
1,4	1,4817e-006	9,6617e-003
1,7	7,9687e-007	9,2676e-003
2,	2,031e-008	8,8971e-003

На рисунке 38 и в таблице 14 представлены результаты расчета максимальных и минимальных по объему образца напряжений.

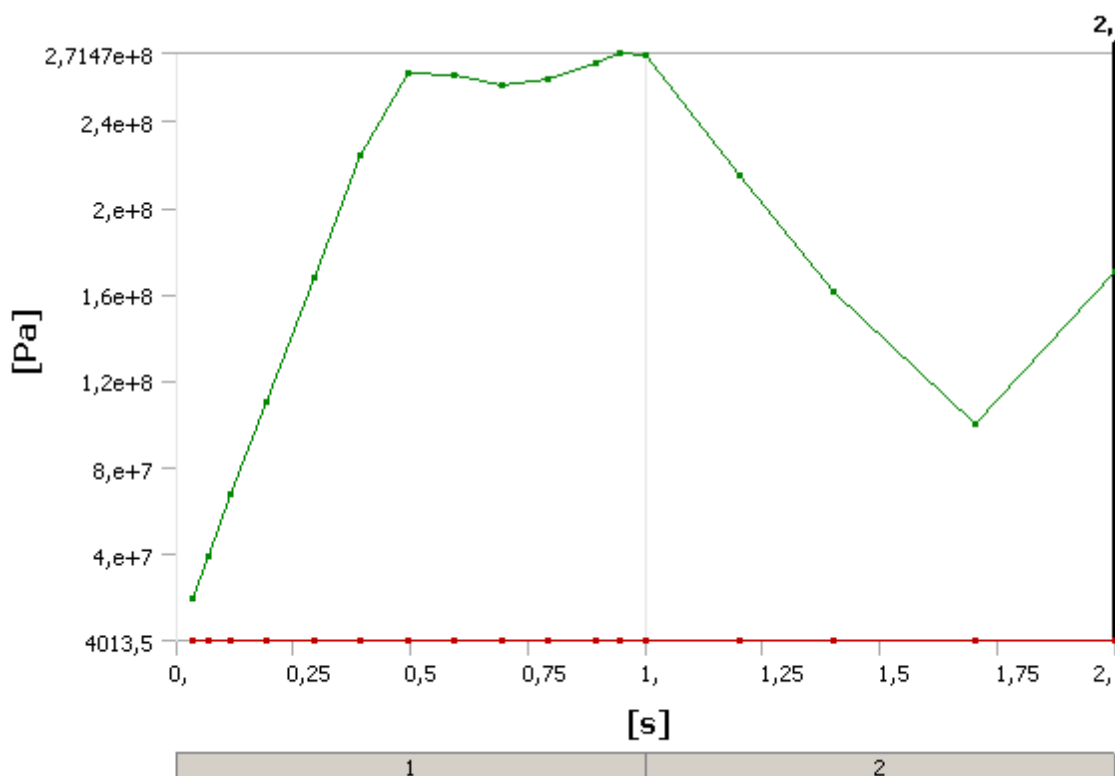


Рисунок 38 – Напряжения по этапам расчета

Таблица 14 - Результаты расчета напряжений

Время модельное, с	Минимум напряжений , Па	Максимум напряжений, Па
0,033333	12008	1,9364e+007
0,06667	24018	3,8677e+007
0,11667	42034	6,7553e+007
0,19167	69065	1,1066e+008
0,29167	1,0511e+005	1,6778e+008
0,39167	1,4117e+005	2,2451e+008
0,49167	1,7756e+005	2,6222e+008
0,59167	2,1484e+005	2,6095e+008
0,69167	2,5345e+005	2,5649e+008
0,79167	2,9432e+005	2,5967e+008
0,89167	3,3718e+005	2,673e+008
0,94583	3,5967e+005	2,7147e+008
1,	3,8145e+005	2,7084e+008
1,2	3,0875e+005	2,1539e+008
1,4	2,3604e+005	1,6156e+008
1,7	1,2697e+005	9,9795e+007
2,	4013,5	1,701e+008

Для данного образца также проведен модальный анализ. Определялись первые 6 гармоник собственных колебаний вала. Результаты представлены на графике на рисунке 39 и в таблице 15.

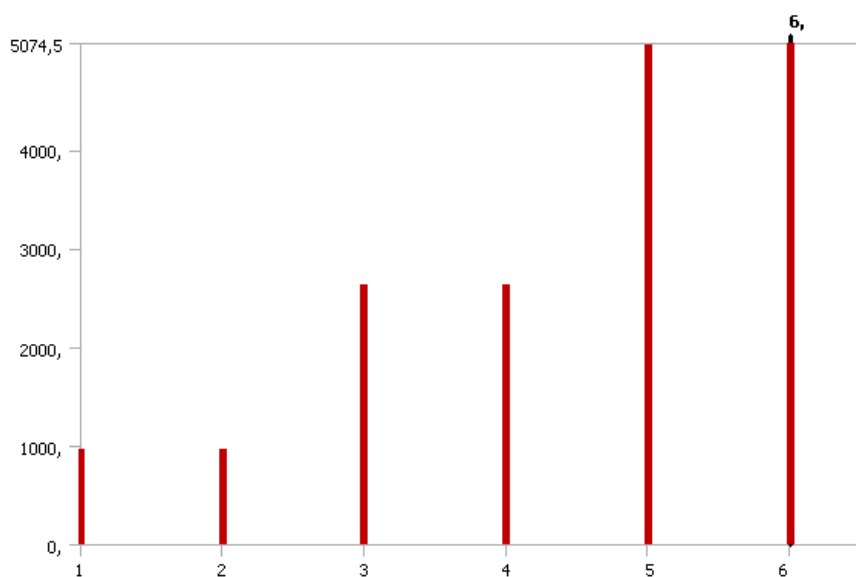


Рисунок 39 – Частоты колебаний

Качественно спектр распределение собственных частот похож на результаты предыдущего расчета. Но, значения частот сместились в более низкую область. Это значит, что данное изменение геометрии и напряженного состояния привели к меньшей конструктивной жесткости образца.

Таблица 15 – Частоты колебаний

Гармоника колебаний	Частота (первый расчет), Гц	Частота (второй расчет), Гц
1 мода	973,97	965,13
2 мода	974,43	965,51
3 мода	2653,	2629,
4 мода	2654,	2630,
5 мода	5091,4	5057,8
6 мода	5120,1	5074,5

На рисунке 40 приведено распределение пластической деформации по объему заготовки.

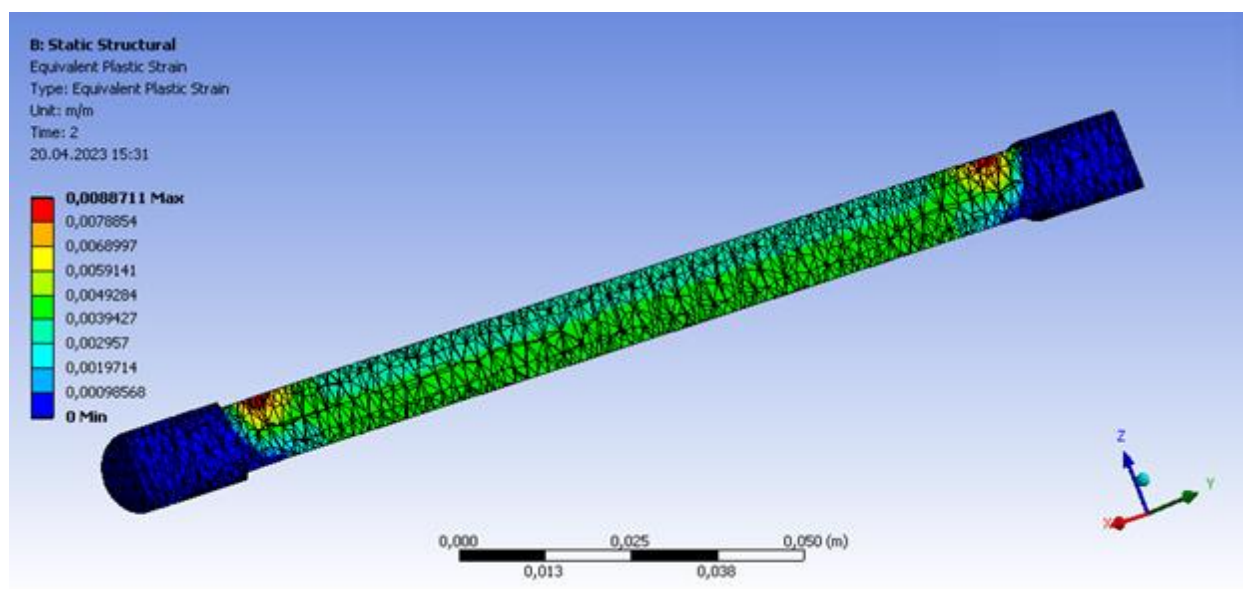


Рисунок 40 - Распределение пластической деформации по объему заготовки

Остаточные напряжения в объеме заготовки выделяются на минимальном уровне (рисунок 41). Есть небольшие локальные всплески около шеек под крепления под захваты.

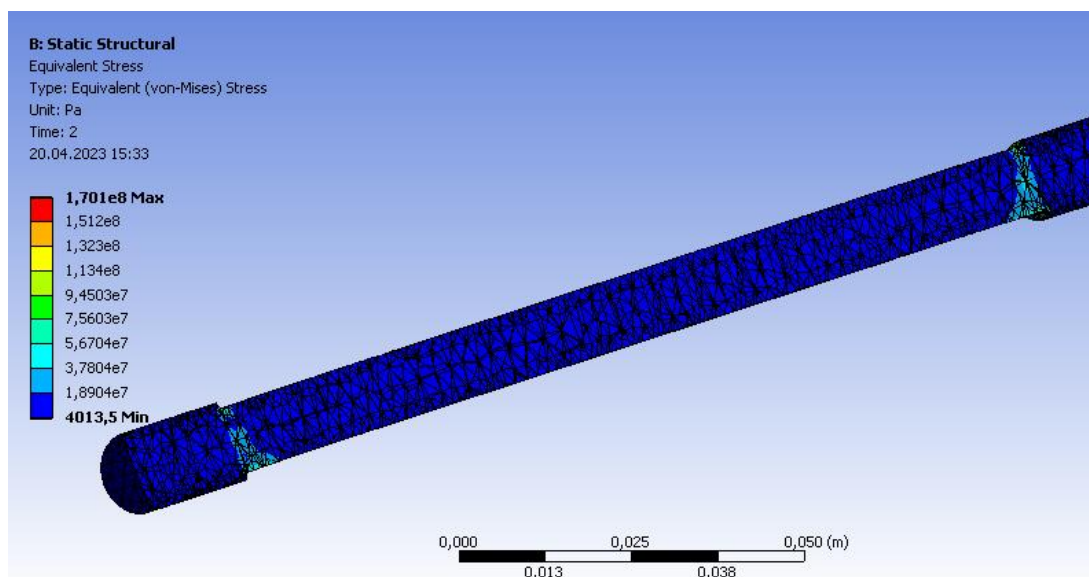


Рисунок 41 - Распределение напряжений по объему заготовки

Видно, что по поперечному сечению идет градиент распределение пластических деформаций. Локально очень сильно выделяются зоны около шеек под крепление захватов.

На рисунке 42 показана пластическая деформация образца, который имеет исходный прогиб в 2 мм. Степень пластической деформации составила 0,0149. Как видно, локальное увеличение пластических деформаций идет около шеек под крепление.

Результаты деформаций растяжением образца с прогибом 2 мм показаны на рисунке 43, где на второй стадии показана остаточная пластическая деформация.

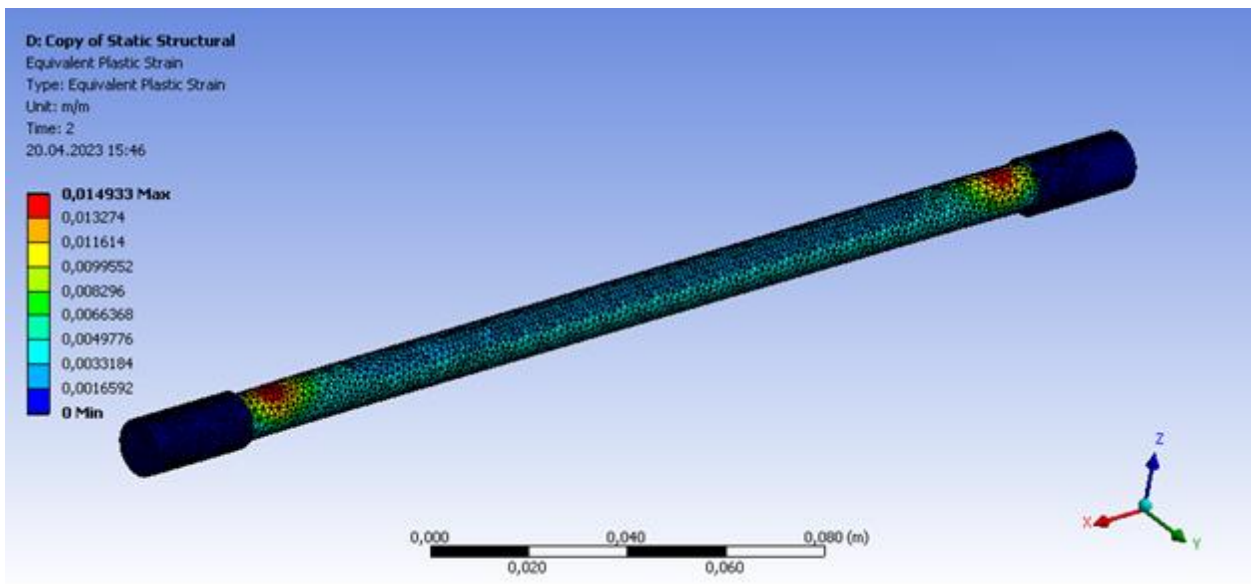


Рисунок 42 - Пластические деформации

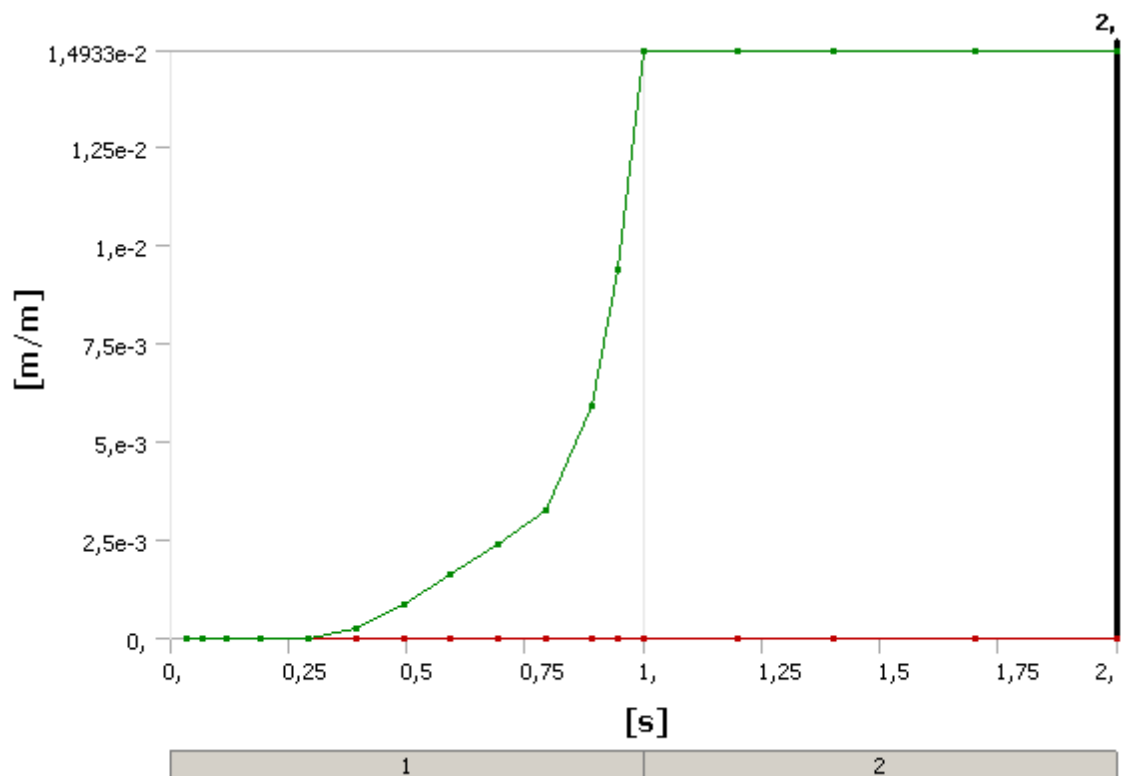


Рисунок 43 – Пластическая деформация

Напряженное состояние имеет характерное распределение с пиком в конце цикла нагружения и спадом из-за упругих деформаций.

Распределение деформаций равномерно по объему, кроме мест для крепления, где имеет максимальную величину. Там деформация максимальная около шеек под крепления. Напряжения показаны на рисунке 44.

На рисунке 45 показано распределение пластических деформаций в поперечном сечении, на котором отчетливо видно неравновесность этих деформаций.

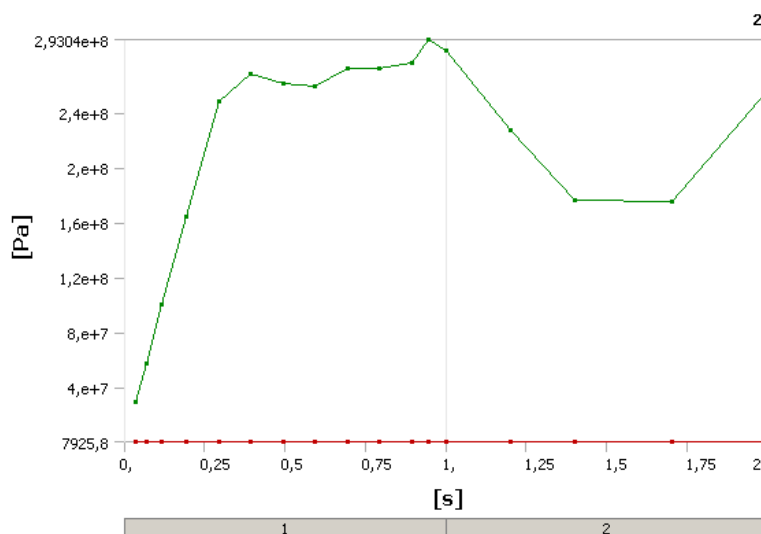


Рисунок 44 – Напряжения

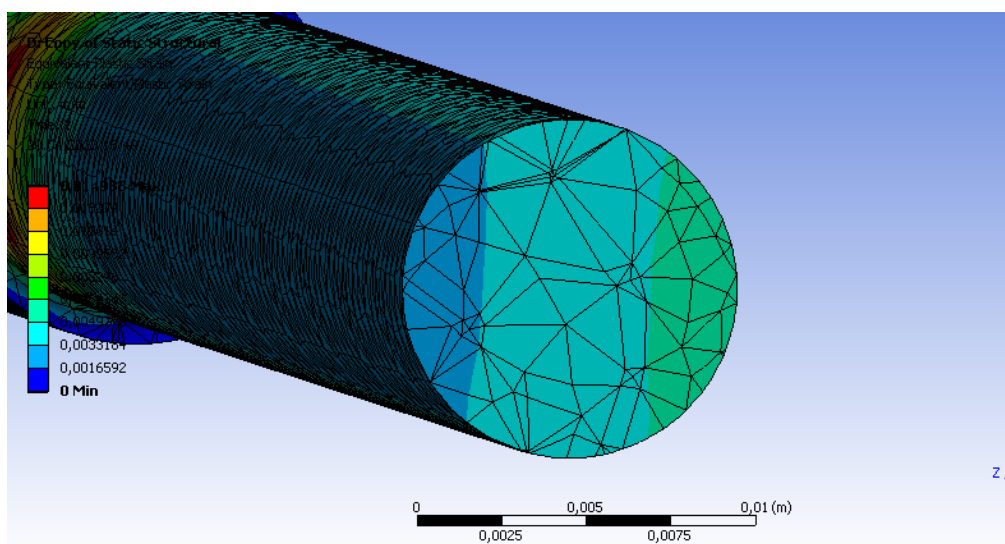


Рисунок 45 – Распределение деформаций в поперечном сечении

На рисунке 46 остаточные напряжения в образце около захвата распределяются по объему заготовки не равномерно.

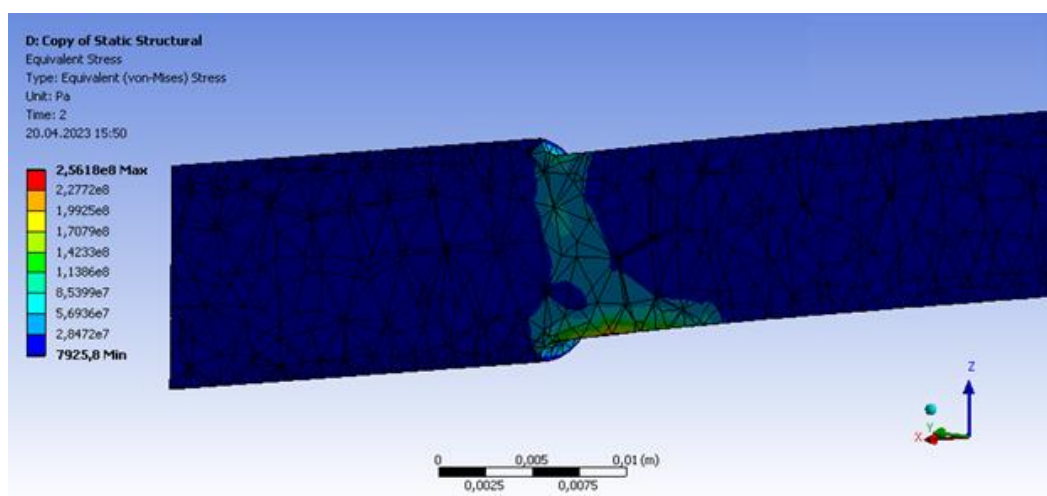


Рисунок 46 - Напряжения в месте заделки

Пластические деформации в образце показаны на рисунке 47 с нагружением вала большей силой в 23000 Н.

В следующем эксперименте сила изменялась по закону, показанному на рисунке 48 (до 23000 Н).

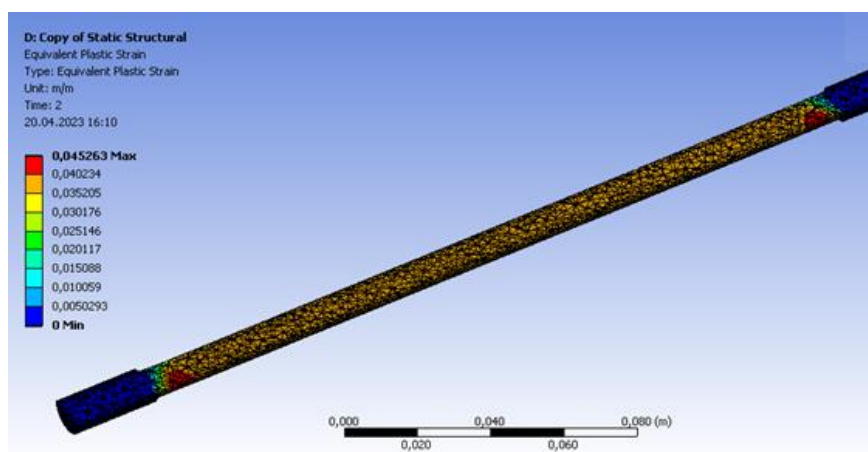


Рисунок 47 - Пластические деформации

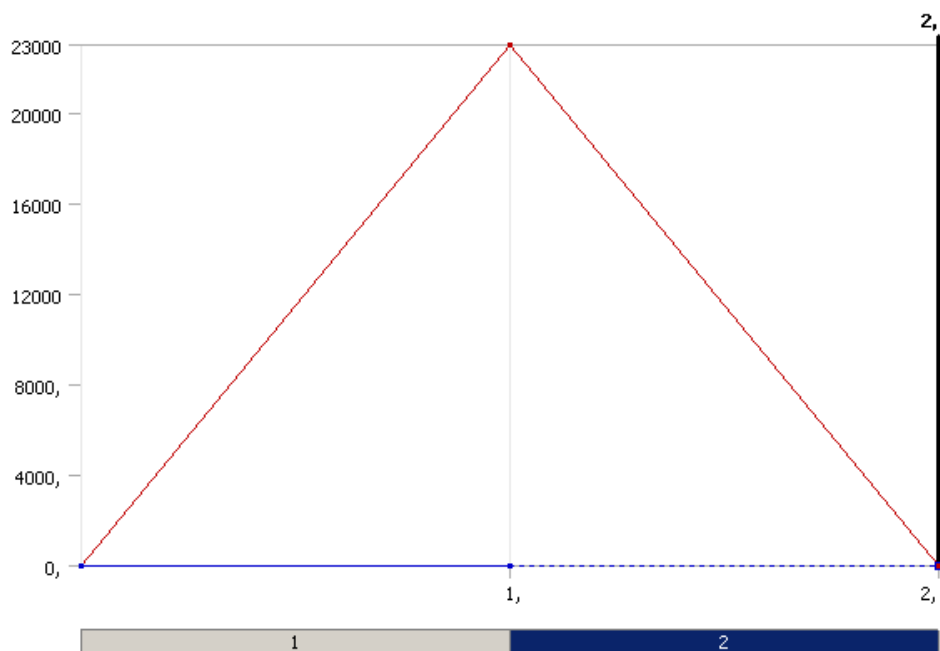


Рисунок 48 - Изменение силы

На рисунке 49 и на рисунке 50 показаны соответственно пластические деформации по этапам нагружения и эквивалентные напряжения. Более высокие уровни силы при растяжении приводят к выравниванию распределения пластической деформации по поперечному сечению образца.

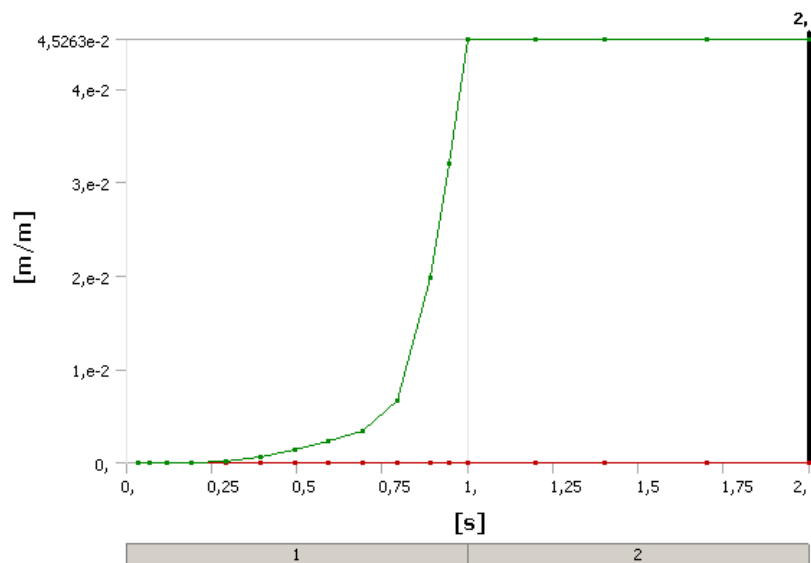


Рисунок 49 - Пластические деформации

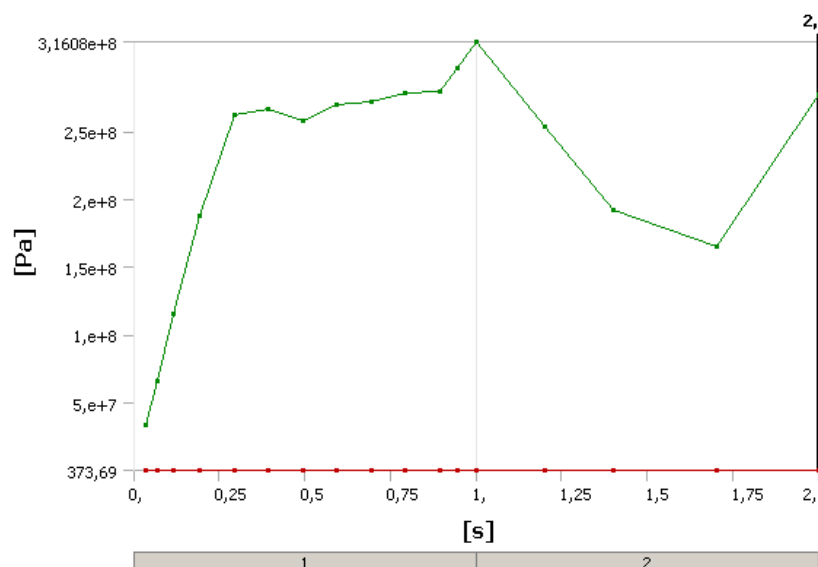


Рисунок 50– Напряжения

Для выравнивания напряжений необходимо обеспечить минимально необходимый уровень нагрузки и деформации.

3.2 Рекомендации по управлению напряжениями

Обеспечения точности механической обработки заключается в формировании целого комплекса показателей. Они разделяются на три категории. Это конструкторские, технологические и эксплуатационные параметры.

Конструкторские показатели качества деталей включают в себя характеристики детали, указанные на рабочем чертеже. Это масса, габаритные параметры, общая и средняя точность и шероховатость поверхностей, материал. В совокупности они определяют жесткость, виброустойчивость, материалоемкость, электрические и магнитные свойства.

Совокупность данных конструкторских параметров приводит к определенному уровню технологических характеристик. Это себестоимость и трудоемкость. Эти два параметра, связанные с понятием технологичности

заготовки и детали. Это свойство определяется конструкторскими параметрами при условии обеспечения минимальных затрат при изготовлении деталей. Обязательное условие обеспечить изготовление с заданными требованиями в установленном объеме в заданный промежуток времени. Соответственно, уровень конструкторской проработки и технологического обеспечения данных параметров, в конечном итоге, приводит к формированию эксплуатационных показателей качества.

Два основных показателя определяют надежность функционирования детали. Это усталостная выносливость и износостойкость. Эти характеристики определяют степень надежности работы изделия, ресурс и долговечность. Поэтому технологическая проработка производственных процессов с учетом конструкторских требований и при обеспечении минимальных показателей является сложной и ответственной работой.

Усугубляется данная сложная задача современными подходами к проектированию изделий машиностроения. Это повышение технических требований к эксплуатационным условиям и использование новых материалов с низкими технологическими параметрами. При этом сами изделия проектируются с обеспечением критерия минимальной материалоемкости. Это приводит к снижению конструктивной и технологической жесткости. В технологических процессах это приводит к повышению количества переходов. Также к снижению интенсивности процессов обработки за счет снижения частоты вращения, глубины резания и подачи.

При этом указанные методы не приводят к решению проблемы повышения точности маложестких высокоточных изделий. Это связано с процессами формирования и изменения остаточных технологических напряжений в материале заготовок и деталей. Технологические остаточные напряжения принято разделять на три группы.

Остаточные напряжения третьего рода рассматриваются в пределах элементов кристаллической решетки и связаны с локальными дефектами типа дислокаций, дисклинаций.

Технологические остаточные напряжения второго рода рассматриваются в объеме зерна или группы зерен.

Остаточные напряжения первого рода рассматриваются в макрообъеме. Все эти напряжения различных групп взаимно влияют друг на друга.

В рамках современного подхода к рассмотрению процессов деформации и разрушения материалов мезо-механики рассматриваются эти взаимодействия. Формирование макронапряжений в объеме определяется совокупностью процессов на различных уровнях от элементов кристаллической решетки, отдельных зерен, групп зерен до макро-объемов.

Технологические приложения, как правило, рассматривают напряжения в макро-объеме. Обычно это связано с определением пластичности и особенностей пластического течения заготовок при горячей или холодной объемной штамповке.

Если рассматривать симметричные длинномерные детали типа валы, штоки, втулки, трубы, технологическими методами повышения геометрической точности и формирования физико - механических свойств является осевое растяжение или сжатие. Это воздействие может дополняться кручением.

Для снижения нагрузок при выполнении данных деформирующих воздействий заготовку подвергают нагреву. Степень нагрева определяется характером силового воздействия, задачей формирования физико-механических свойств, то есть характером термообработки, параметрами материала заготовки.

Особенностью технологических методов воздействия на заготовку таких деталей является необходимость обеспечения определенного комплекса геометрических показателей. Это отклонение от прямолинейности. Также формирование заданной геометрической точности диаметров.

Основной проблемой при технологическом воздействии на такие заготовки является самопроизвольное изменение геометрических параметров заготовок в послеоперационный и эксплуатационные периоды. Это связано с

процессами самопроизвольной релаксации остаточных технологических напряжений. Данные напряжения с течением времени могут изменяться в различных участках с разной скоростью и на разную величину в сторону их снижения. Это происходит за счет перехода упругих деформаций в пластические, что разгружает внутренний объем заготовки и приводит к снижению уровня остаточных напряжений.

Данные процессы могут ускоряться при эксплуатации, в случае значительных динамических рабочих нагрузок или при повышенных температурах. Соответственно, существуют технологические методы, которые позволяют ускорить процесс на стадии изготовления деталей.

Термообработка с использованием длительной выдержки при температурах до 500° С позволяет инициировать процесс релаксации технологических напряжений, в том числе, за счет перестройки структуры материала. Данный процесс является энергоемкими, трудоемкими и приводят на этих операциях к потере точности за счет коробления заготовок.

Существуют вибрационные методы воздействия, которые приводят к снижению остаточных технологических напряжений за счет внесения в материал заготовки вибрационной энергии. Здесь возникает задача максимально эффективного использования энергии колебаний. Это возможно при резонансной настройке технологической системы, которой является заготовка с установленной на нем приводом вибраций. Подбором частоты возмущений обеспечивается резонансной режим технологического воздействия, при котором возникает максимальная амплитуда смещения заготовки. Отслеживание процессов релаксация обеспечивается за счет нагрузки на приводе источника колебаний. При релаксации происходит изменение параметров заготовки, то есть изменяется ее собственная частота. Это приводит к рассогласованию первоначальной частотной настройки источника колебаний на собственную частоту заготовки. Отслеживание этого рассогласования по частоте и приводит к оперативной диагностики состояния материала.

Можно контролировать уровень и скорость релаксация остаточных технологических напряжений. Существует другой путь стабилизации геометрических параметров заготовки. Он связан с обеспечением релаксационной стойкости материала заготовки. Это достигается за счет поверхностного упрочнения материала заготовки путем приложение концентрированного воздействия в локальной точке. Это обеспечивается методами поверхностного пластического деформирования. Использование раскатников или накатников, выглаживателей обеспечивает наклеп поверхностного слоя. Это ведет к формированию каркаса в виде упрочненной оболочке, которая и держат в дальнейшем форму детали.

Такой технологический способ повышения геометрической точности заготовки является оптимизационной задачей. Использование термомеханических или термо-силовых методов воздействия на заготовку на начальном этапе технологического процесса позволяет сформировать наиболее благоприятные условия как для последующей обработки, так и на ее поведение в период эксплуатации.

Сочетание высокой геометрической точности по прямолинейности и максимальной однородности размеров по длине и сечению в поперечном сечении обеспечивает стабильность снимаемого припуска. При условии правильно выбранной схемы установки такой заготовки исходное равновесное напряженное состояние нарушаться не будет.

Правильно выбранная схема заключается в обеспечении равномерной конструктивной жесткости заготовки вдоль ее оси. Это достигается путем использования различных дополнительных опор. В качестве таких элементов используется самоцентрирующий люнет. Он обеспечивает автоматическую центровку заготовки по оси станка и держит заготовку при ее вращении при воздействии режущего инструмента. Формирование заданного напряженно-деформированного состояния дает возможность управлять геометрической точностью на технологических операциях.

Выводы по разделу

В третьей главе проведен численный эксперимент методом конечных элементов нагружения мало жесткого вала, имеющего исходную кривизну.

Материал принимался не линейным с модулем Юнга в упругой зоне, и модулем упрочнения 1600 МПа в пластической зоне. Образец брался ступенчатым, с фиксацией по одному из утолщений для захвата. Сила растяжения прикладывалась к другому утолщению. Они располагались по краям образца, а между ними находилась деформируемая зона. При этом допускалось только осевое перемещение нагруженного конца заготовки. Сила нагружения превышала предел текучести.

4 Экспериментальное исследование термосиловой обработки

4.1 Контроль геометрических параметров вала

Для управления формирования геометрии вала необходимо определять параметры детали – диаметры, отклонения от прямолинейности. Существует несколько способов измерения геометрии длинного вала.

Контроль диаметров - измерение с помощью микрометра. Этот метод является наиболее простым и доступным, но требует большой точности и опыта со стороны контролера. Недостатком является то, что микрометр может измерять только отдельные точки вала, что не позволяет получить полную картину его геометрии в пространстве.

Измерение с помощью координатно-измерительной машины (КИМ). Этот метод позволяет получить полную пространственную картину геометрии вала, а также провести анализ его формы и размеров. КИМ обладает высокой точностью и скоростью измерений, но требует специальной подготовки и наличия соответствующего оборудования.

Измерение геометрии бесконтактным способом с помощью лазерной технологии (интерферометрия). Этот метод позволяет получить высокоточные и быстрые измерения параметров вала без контакта с ним. Недостатком является то, что лазерный прибор дорогой и требует высокой квалификации оператора.

При использовании КИМ вал устанавливается на столе координатно-измерительной машины, после чего проводятся измерения в нескольких точках вдоль его оси. Полученные данные обрабатываются программным обеспечением, которое позволяет определить отклонение от прямолинейности вала.

При использовании лазерной технологии на вал наводится лазерный луч, который проецируется на экран. При вращении вала лазерный луч будет

перемещаться по экрану, образуя кривую. Анализируя эту кривую, можно определить отклонение от прямолинейности вала.

Оба метода позволяют получить высокоточные и точные результаты. Однако, при использовании лазерной технологии необходимо учитывать возможные ошибки, связанные с погрешностью измерений при проецировании лазерного луча на экран.

Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки, которые необходимо учитывать при выборе способа измерения геометрии длинномерного вала.

Лучше всего для определения отклонения от прямолинейности вала использовать методы измерения комбинированного измерения, сочетающие ручные способы с оптическим контролем. Последний способ заключается в получении высококонтрастных изображений высокой точности поверхности и контуров вала.

4.2 Релаксация остаточных напряжений

Релаксация остаточных напряжений - это процесс уменьшения напряжений в материале после его деформации или обработки. Факторов, которые влияют на релаксацию много. Остаточные напряжения могут возникать в материале из-за различных факторов, таких как термическая обработка, механическая деформация при снятии припуска, сварка и другие процессы.

Факторы, которые влияют на релаксацию остаточных напряжений, включают в себя время. Чем больше времени прошло после деформации материала, тем больше будет релаксация напряжений.

Повышение температуры может ускорить процесс релаксации напряжений за счет повышения пластичности материала. Тип материала сильно влияет на характер протекания релаксации. Различные материалы

могут иметь различную скорость релаксации напряжений которая определяется релаксационной стойкостью материала.

Чем больше деформация, тем больше будет остаточных напряжений, и тем сильнее будет проявляться процесс релаксации. Особенно это заметно для электрошлаковой сварки для толстостенных конструкций типа станин. Окружающая среда может влиять на скорость релаксации напряжений. Те же станины подвергаются старению на открытом воздухе и в зависимости от погодных условий процесс может идти в них по разному.

Релаксация остаточных напряжений является важным фактором при проектировании и изготовлении деталей и конструкций, так как остаточные напряжения могут привести к деформации или разрушению материала со временем при работе изделия. Поэтому, необходимо учитывать релаксацию напряжений при выборе материала, проектировании и обработке деталей и конструкций.

При термосиловой обработке формирование пониженных напряжений снижает вероятность выхода за критический уровень перепада напряжений при их неравномерной релаксации.

Другой способ – формирование не направленных напряжений. За счет разной направленности векторов коробления их произвольное изменение в различных участках вала будет взаимно компенсироваться.

Также релаксация напряжений является важным фактором при выстое. Этап термосиловой обработки, при котором вал находится в напряженном состоянии выше предела текучести. В нем в этот момент идут процессы ползучести, которые способствуют релаксации напряжений.

4.3 Реологическое моделирование

Так как процессы изменения напряженно-деформированного состояния при термосиловой обработке происходят во времени, необходим метод моделирования поведения материала, учитывающий этот процесс.

Реологическое моделирование - это процесс математического описания реологических свойств материалов, таких как вязкость, упругость и пластичность. Реологические модели используются для определения поведения материалов при различных условиях нагрузки и деформации во времени.

Виды реологических моделей различаются откликом поведения материала при его нагружении.

Линейные модели описывают линейное поведение материала при малых деформациях. Примерами линейных моделей являются модели Максвелла и Кельвина-Фойгта.

Нелинейные модели описывают нелинейное поведение материала при больших деформациях. Например модель Прандтля или Херца.

Эмпирические модели описывают поведение материала на основе экспериментальных данных, как в модели Бюргерса.

Модели с распределенными параметрами описывают поведение материала с распределенными параметрами в пространстве (модель Финкеля или Фойгта).

Реологические модели используются в различных областях науки и техники, таких как материаловедение, механика, химия, медицина. Они позволяют предсказывать поведение материалов при различных условиях и оптимизировать процессы производства и использования материалов.

Одной из наиболее распространенных моделей является модель Кельвина. Она описывает поведение материала, который сочетает в себе элементы упругости и вязкости. Она состоит из параллельно соединенных элементов упругости (пружины) и вязкости (демпферы).

Для использования модели необходимо идентифицировать основные параметры модели Кельвина

Коэффициент жесткости пружины k - определяет степень упругости материала. В его качестве обычно берется модуль упругости (Юнга).

Коэффициент демпфирования η - определяет степень вязкости материала. Его получают из опытов на растяжение с различной скоростью нагружения.

Время релаксации τ - время, необходимое для того, чтобы материал достиг равновесного состояния после приложения внешней силы. Он является важным параметром для всех моделей и определяет скорость уменьшения остаточных напряжений в материале. Для его определения также необходимы эксперименты. Его получают из опытов на релаксацию или ползучесть.

Определение параметров модели Кельвина может быть выполнено путем проведения экспериментов, в которых измеряются деформации и напряжения при различных условиях нагрузки. Затем, используя полученные данные, можно определить значения параметров модели Кельвина с помощью математических методов (метод наименьших квадратов).

Модель Кельвина широко используется для описания поведения материалов при динамических нагрузках, а также для моделирования процессов деформации и разрушения материалов. Кроме того, модель Кельвина используется для оптимизации процессов заготовительного производства с использованием методов деформирования.

Модель Ишлинского описывает поведение материала, который сочетает в себе элементы упругости, пластичности и вязкости. Эта модель используется для описания поведения материалов при высоких температурах и длительных временах нагружения.

Для моделирования процесса релаксации остаточных напряжений в длинном валу можно использовать несколько моделей, таких как модель Кельвина-Фойгта, модель Бергстрема-Бойса (для высокоэластичных материалов) и модель Максвелла.

Модель Кельвина-Фойгта основана на предположении, что материал состоит из упругой пружины и вязкого демпфера. Параметры модели - жесткость пружины k и коэффициент вязкости η . Для моделирования процесса релаксации остаточных напряжений в длинном валу необходимо провести

эксперименты для определения начальных остаточных напряжений и скорости их релаксации. Затем, используя полученные данные, можно определить значения параметров модели Кельвина-Фойгта.

Модель Максвелла основана на предположении, что материал состоит из нескольких упругих пружин и вязкого демпфера, расположенных последовательно.

Для учета распределенности параметров необходимо использовать более сложные модели, например, модели с распределенными параметрами. В таких моделях материал представляется как набор связанных элементов, каждый из которых имеет свои параметры. Эти параметры могут быть заданы на основе экспериментальных данных или получены с помощью численных методов.

Для моделирования коробления или пластического деформирования длинного вала можно использовать модели, основанные на теории пластичности. В таких моделях материал представляется как упруго-пластический материал, который может испытывать пластические деформации при достижении определенного уровня напряжений.

Для определения параметров реологической модели пластического деформирования необходимо провести следующие эксперименты с различным направлением сил нагружения.

Эксперимент на растяжение. В этом эксперименте материал подвергается растяжению на силоизмерительной машине или стенде с постепенным увеличением нагрузки до разрушения. Измеряются напряжение и деформация в процессе эксперимента, которые используются для определения параметров модели.

В эксперименте на сжатие материал подвергается сжатию. Нагрузка идет с постепенным увеличением нагрузки до разрушения. В эксперименте на изгиб образец подвергается изгибу с постепенным увеличением нагрузки до разрушения.

Эксперимент на скручивание. В этом эксперименте материал подвергается вращению с постепенным увеличением момента до разрушения.

Для каждого вида эксперимента необходим образец определенной формы.

Для некоторых материалов температура может оказывать существенное влияние на их свойства. Поэтому для определения параметров модели необходимо провести эксперименты по нагружению образцов при различных температурах и использовать полученные данные для определения параметров модели при различных температурах.

4.4 Методика эксперимента

Исследование проводилось по обеспечению равномерности деформации по длине и диаметру малоожесткого вала.

Задача - определить распределение деформаций в зависимости от режимов (величина и скорость деформации, температура нагрева), состояния поверхности (обработанная или необработанная), степени исходной кривизны (коробление исходной заготовки). Для обработанной поверхности рассматривается проточенная поверхность и накатанная с заданной периодичностью.

Технологические задачи следующие. Обеспечить равномерность деформации, то есть точность под последующую обработку. Выровнять и снизить остаточные технологические напряжения с целью снижения коробления заготовки при последующей обработке. Возможны варианты по формированию ненаправленных напряжений. Сформировать остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое для повышения эксплуатационных свойств (износостойкость и усталостную выносливость). Повысить физико-механические свойства – прочность, предел текучести, конструктивную жесткость детали.

Определение остаточных напряжений проводится путем фиксации коробления при последующей обработке с одинаковыми режимами обработки. Из-за перераспределения напряжений происходит ее деформация. Чем больше уровень напряжений, тем выше деформация. Для этого измеряется исходный профиль до и после обработки двумя путями: измерение биения заготовки до и после обработки; фотографирование заготовки до и после обработки. Кроме этого проводится измерение заготовки во время обработки точением (режимы резания постоянные $t = 0,5$ мм, $S=0,3$ мм/об, $V=18,9$ м/мин, $n =430$ об/мин).

Нагрев осуществлялся путем обдувки горячим воздухом из промышленных фенов. Время нагрева менялось. Оно менялось в диапазоне от 3 до 5 мин. Для обеспечения равномерности нагрева использовалось два фена. Температура нагрева контролировалась при помощи пирометров, а также датчика температуры с модулем преобразователя термопары на МАХ6675 с рабочим диапазоном до 600° С.

Нагрузка определялась при помощи тензометрического датчика с диапазоном до 20000 Н.

Контроль деформации проводился при помощи камеры Basler acA1440-73gm через программу Basler Viewer. Время выдержки при съемке 5000 мкс. Расстояние 65 мм до объекта съемки для обеспечения максимальной резкости изображения.

Определение коэффициентов дисторсии проводилось при помощи шахматной доски с точно (до 0,01 мм) определенными размерами клетки. Для исключения бликов и обеспечения равномерности освещения использовался светодиодный источник света мощностью 200 Вт.

Измерение величины деформации проводилось оптическим способом непосредственно при деформировании, а также после путем измерения расстояний между рисок, нанесенных при помощи твердосплавной чертилки на токарной станке с шагом 10 мм. Образец, после обработки центровочным сверлом, устанавливался в патрон и поджимался задним центром. Далее с

шагом 10 мм по всей длине образца наносились поперечные метки – риски, а также одна продольная. Измерение расстояния между рисками проводилось по точкам пересечения продольной и поперечных рисок. Также контролировался диаметр по сечениям до и после обработки измерение штангенциркулем, а также выделением контура заготовки на изображении.

Образцы изготавливались из стали 35 и сплава 12Х18Н10Т. Длина 235 мм. С двух сторон нарезались резьбовые участки по 37 мм. При фиксации на них накручивались по 3 гайки. Фиксация шла через опорные шайбы диаметром 40 мм и толщиной 5 мм.

Нагружение проводилось путем перемещения рычага домкрата с грузоподъемностью 200000 Н. Частота движения рычага определяла скорость деформации. Результаты замеров на рисунке 51 по жесткости.

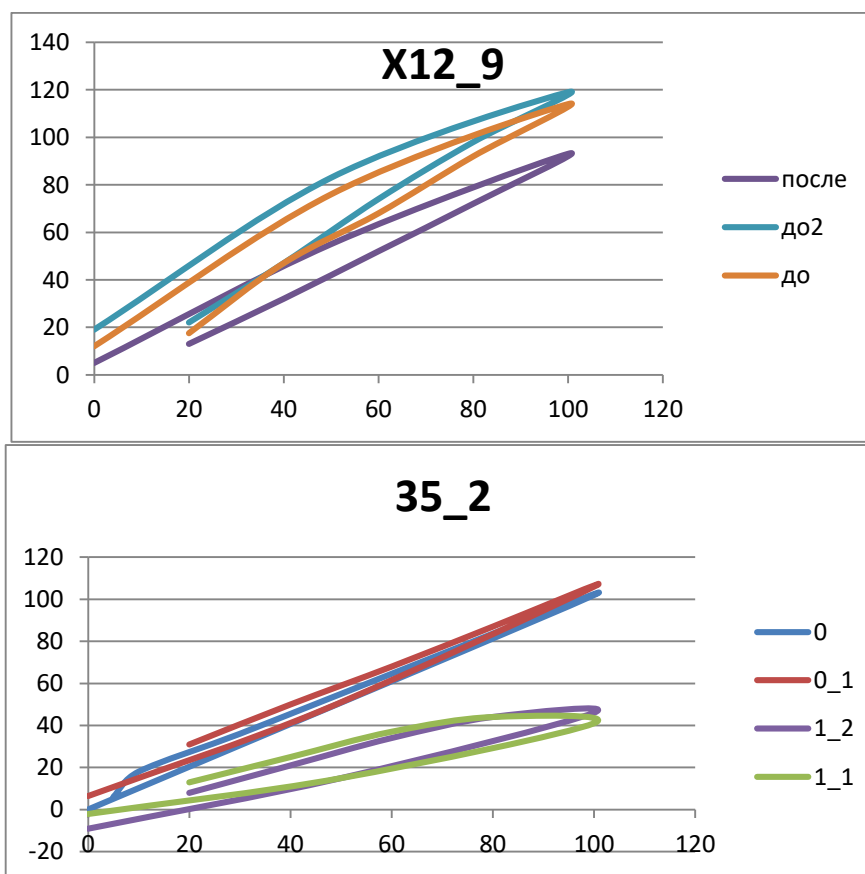


Рисунок 51 - Результаты измерения статической жесткости образцов до и после ТСО (для образца 12Х18Н10Т – X12_9 и стали 35 для образца 35_2)

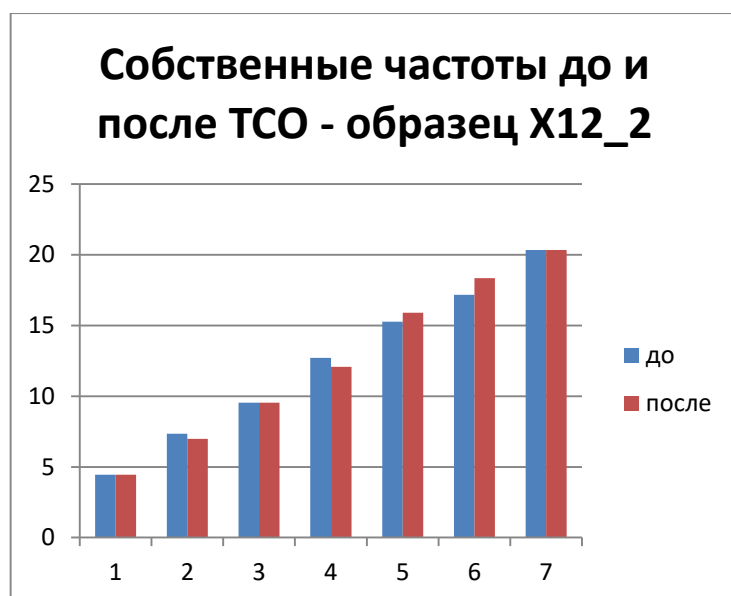


Рисунок 52 - Результаты измерения собственных колебаний образцов до и после ТСО

Результаты показывают влияния (Рисунок 52) проведенной обработки на собственные характеристики заготовок.

Выводы по разделу

В четвертой главе приведены результаты исследования влияния деформационных параметров образцов при термообработке на нее жесткость и спектр частот собственных колебаний.

Результаты свидетельствуют о том, что деформационные процессы приводят к упрочнению материала. При этом, при определенных условиях это может привести к повышению жесткости образца и сдвигу определенных гармоник собственных колебаний в более высокую область. При недостаточном или при значительном деформировании этот процесс или незаметен для малой области деформации.

При большой деформации конструкторские изменения приводят к снижению конструктивной жесткости образца. Главным результатом проведенного исследования является подтверждение эффективности термосиловой обработки по обеспечению прямолинейности оси заготовки, выравниванию остаточных технологических напряжений, а также формирование максимально эффективной геометрии и структуры материала для обеспечения точности заготовки и ее сохранение в ходе изготовления и эксплуатации готовой детали.

Обязательным условием эффективности обработки является выбор параметра деформации для обеспечения выравнивания напряжений.

Результаты исследований опубликованы в научной статье, представленной на рисунках А.1 - А.4 в приложении А. Это подтверждается сертификатом участника, показанном на рисунке Б.1 приложения Б.

Заключение

В результате произведенных исследований было выявлено, что при обработке маложестких деталей главная задача для сохранения точности – обеспечить равномерное распределение остаточных технологических напряжений и в ходе обработке не нарушить исходное равновесное состояние.

Выполнен анализ влияния технологических методов и их особенности по формированию технологических остаточных напряжений. Проанализированы методы как повышающие, так и понижающие остаточные напряжения. К первым отнесены метода правки изгибом и обработка поверхностным пластическим деформированием, а также термомеханическая обработка, закалка, черновые лезвийные методы, а также чистовые отделочные (абразивная обработка), при условии, что последняя выполняется при ограниченных скоростях резания и подачи.

К технологическим методам, снижающим уровень остаточных технологических напряжений, отнесены стабилизирующие виды термообработки (отжиг, нормализация, отпуск), а также вибрационная обработка, вибро-термическая обработка, обработка ультразвуком. Вибропрессование, а также термо-силовая обработка, за счет изменения технологических режимов могут обеспечивать как повышение, так и снижение уровня остаточных напряжений.

В третьей главе проведен численный эксперимент методом конечных элементов нагружения маложесткого вала, имеющего исходную кривизну.

Материал принимался не линейным с модулем Юнга в упругой зоне, и модулем упрочнения 1600 МПа в пластической зоне. Образец брался ступенчатым, с фиксацией по одному из утолщений для захвата. Сила растяжения прикладывалась к другому утолщению. Они располагались по краям образца, а между ними находилась деформируемая зона. При этом допускалось только осевое перемещение нагруженного конца заготовки. Сила нагружения превышала предел текучести. Для маложесткого вала.

В четвертой главе приведены результаты исследования влияния деформационных параметров образцов при термообработке на нее жесткость и спектр частот собственных колебаний.

Результаты свидетельствуют о том, что деформационные процессы приводят к упрочнению материала. При этом, при определенных условиях это может привести к повышению жесткости образца и сдвигу определенных гармоник собственных колебаний в более высокую область. При недостаточном или при значительном деформировании этот процесс или незаметен для малой области деформации.

При большой деформации конструкторские изменения приводят к снижению конструктивной жесткости образца. Главным результатом проведенного исследования является подтверждение эффективности термосиловой обработки по обеспечению прямолинейности оси заготовки, выравниванию остаточных технологических напряжений, а также формирование максимально эффективной геометрии и структуры материала для обеспечения точности заготовки и ее сохранение в ходе изготовления и эксплуатации готовой детали.

В результате задачи, поставленные в работе, выполнены.

Выполнен анализ полученных результатов и разработаны рекомендации по использованию термосиловой обработки для технологических процессов изготовления мало жестких валов (контроль входной кривизны – не более 0,05 на 100 мм).

Рационально выбранные технологические режимы, температурные деформационные воздействия, обеспечат кроме прямолинейности оси заготовки с проработкой всего объема вала повышение его жесткости за счет упрочнения материала. Это положительно скажется на снижении погрешности при обработке резанием от упругих деформаций.

Список используемых источников

1. Авт. св. СССР №1134258 В21D3/12; В21D25/00. Способ правки длинномерных изделий растяжением
2. Авт. св. СССР №831268, В21D25/00. Способ правки металлических изделий растяжением
3. Блурцян Р.Ш., Селихов Г.Ф., Блурцян Д.Р., Залазинский М.Г., Блурцян И.Р. Исследование усталостной прочности торсионных валов, изготовленных с использованием технологии горячего изостатического прессования // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. 2008. № 5. С. 126-128
4. Голи-Оглу Е.А., Алистаев А.Н., Гоношенко И.В., Порошков А.В. Влияние параметров холодной знакопеременной деформации изгибом на свойства низколегированных трубных сталей классов прочности К56 - К65 // Сталь. 2014. № 2. С. 65-70
5. Дьяконов А.А. Технологическая обрабатываемость материалов в процессах абразивной обработки. Часть 1. Понятие и формализованное описание // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2015, том 15, № 1 С. 54 -68
6. Зайдес С.А., Нгуен В.Х. Влияние остаточных напряжений на изгибную жесткость длинномерных валов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 9 (104). С. 45-49
7. Заявка: 94030097/02, 11.08.1994 Способ изготовления насосной штанги: С21D 8/10 (1995.01) Семенов В.В., Вассерман Н.Н., Калугин В.Е
8. Заявка: 94030098/02, 11.08.1994 Способ упрочнения длинномерных цилиндрических изделий: С21D 8/10 (1995.01) Семенов В.В., Вассерман Н.Н., Калугин В.Е
9. Заявка: 96122014/28, 13.11.1996 Способ контроля структуры металла протяженного изделия: G01N 27/82, G01N 27/80 Семенов В.В., Вассерман Н.Н., Калугин В.Е

10. Крюков А. А. Технология упрочнения длинномерных цилиндрических изделий совместным растяжением и реверсивным кручением // *Металлообработка*. № 3 (87)/2015. – С. 11-17

11. Крюков А.А. Исследование поведения цилиндрических тел в условиях совместного растяжения и кручения при непропорциональном нагружении // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. – 2019. – № 1. – С. 64-76. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.1.06

12. Крюков А.А. Моделирование и экспериментальное исследование упрочнения цилиндрических изделий методом совместного упругопластического деформирования растяжением и кручением // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, том 13, №4(4), 2011 С. 970-974

13. Крюков А.А., В.Е. Калугин Повышение коррозионно-усталостной прочности длинномерных цилиндрических изделий в результате упрочнения совместным растяжением и кручением // *Современные технологии в промышленности, строительстве и на транспорте*. Известия Самарского научного центра Российской академии наук, том 14, №4(5), 2012. С.1257-1262

14. Крюков А.А., Вильдеман В.Э. Влияние параметров деформирования цилиндрических тел совместным растяжением и кручением на распределение остаточных напряжений // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. – 2019. – Т. 21, № 3. – С. 51–59.

15. Патент РФ № 2167016 Устройство для правки растяжением штанг глубинных насосов Требин А.Г., Добрынин С.Л., Шариков Г.Н. В21D 3/12 (2000.01) Заявка: 2000120085/02, 27.07.2000. Опубликовано: 20.05.2001 Бюл. № 14

16. Патент РФ №2 189 880, В21D 3/12 (2000.01), В21D 25/04 (2000.01) Устройство для правки изделий растяжением. Дата публикации заявки: 27.12.2001 Бюл. № 36 Сошников В.С., Баранов И.В., Кологойда А.Н

17. Патент РФ №2 238 814 Койрес В.И. (RU), Пылайкин П.А. (RU), Баранов И.В. (RU), Игумнов А.Е. (RU) Устройство для правки изделий растяжением Дата публикации заявки: 27.12.2001 Бюл. № 36 В21D 3/12 (2000.01), В21D 25/04 (2000.01)

18. Патент РФ №2 380 212, В24В 39/04 (2006.01), В21D 3/16 (2006.01) Заявка: 2008122826/02, 05.06.2008. Опубликовано: 27.01.2010 Бюл. № 3, Мураткин Г. В., Котова И. В., Синцов А. С

19. Патент РФ №2 205 083 В21D 3/12 (2000.01) Требин А.Г., Добрынин С.Л., Шариков Г.Н. Устройство для правки растяжением штанг глубинных насосов. Опубликовано: 27.05.2003 Бюл. № 15

20. Каратушин С.И. Моделирование процесса упрочнения заготовки кручением / С.И. Каратушин, Д.А. Храмова, Ю.А. Плешанова // Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова Известия высших учебных заведений. Машиностроение №2(707) 2019. С. 34-39

21. Сабиров А.А., Д.Ю. Ренев, С.Н. Сучок Определение прочностных характеристик насосных штанг, эксплуатируемых в ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» // Территория нефтегаз. № 3 \ март \ 2010. С. 70-72

22. Салмин А.Н., Файрушин А.М., Ибрагимов И.Г. Исследование влияния вибрационных колебаний в процессе сварки на технологическую прочность и механические свойства сварных соединений из стали 11Х11Н2В2МФ // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. 2010. № 2. С. 68

23. Шевчук Р.Э., Михайлов А.А. Выбор модели пластичности при конечноэлементном моделировании задачи о вытяжке листового металла // Труды СПбГТУ. 2012. № 514. С. 35-38

24. Шимов Г.В., Серебряков А.В., Серебряков А.В., Розенбаум М.А. Исследование полей остаточных напряжений в особотонкостенных трубах из нержавеющей стали после волочения // Вестник южно-уральского государственного университета. Серия: Metallurgy. - Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет). - Том: №16 Номер:№2 Год: 2016. – С. 127-132
25. Atxaga, G. & Irisarri, A.. (2010). Failure analysis of the end of a shaft of an engine. *Engineering Failure Analysis - ENG FAIL ANAL.* 17. 714-721. 10.1016/j.engfailanal.2009.08.010.
26. 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.
27. Deng, Xuwen & Hui, Songxiao & Ye, Wenjun & Liu, Rui & Huang, Liang. (2022). Numerical simulation research on hot stretch straightening of thin-walled T-shaped profile of titanium alloy assisted by resistance heating. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 121. 10.1007/s00170-022-09714-y.
28. 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.
29. Groen, Manso & Zijlstra, Gerrit & San Martín, David & Post, J. & De Hosson, J.Th.M.. (2018). Product shape change by internal stresses. *Materials and Design.* 157. 492-500. 10.1016/j.matdes.2018.08.013.
30. Husson, Rémi & Baudouin, Cyrille & Bigot, Régis & Sura, Edoardo. (2014). Consideration of residual stress and geometry during heat treatment to

decrease shaft bending. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 72. 1455-1463. 10.1007/s00170-014-5688-8.

31. Lee, Sung-Min & Lee, In-Kyu & Lee, Sung-Yun & Park, Dongyong & Jeong, Myeong-Sik & Moon, Young Hoon & Lee, Sang-Kon. (2022). Prediction of strength of drawn bar considering non-uniform strain distribution. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 36. 10.1007/s12206-022-1033-6.

32. Ma, Lidong & Du, Yukang & Liu, Zijian & Ma, Lifeng. (2019). Design of continuous variable curvature roll shape and straightening process research for two-roll straightener of bar. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 105. 10.1007/s00170-019-04533-0.

33. Ma, Wenzhen & Shen, Hongyao & Xu, Guanhua. (2021). Study on cracks and process improvement for case hardened gear shaft straightening. 10.21203/rs.3.rs-231810/v1.

34. Mena Andrade, Ramiro & Aguado, Jose V. & Guinard, Stéphane & Huerta, Antonio. (2020). Reshaping diagrams for bending straightening of forged aeronautical components. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 110. 10.1007/s00170-020-05856-z.

35. Réti, Tamás. (2002). *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*. ASM International. 189-208.

36. Roy, Sanjib & Pal, Arun & Talukder, N.. (2021). A Brief Review on Theoretical Aspects of Bar Straightening with Recent Developments in Its Modelling, Simulation, Control System, and Stabilization. 10.1007/978-3-030-75381-8_180.

37. Zoch, Hans-Werner. (2009). Distortion engineering: Vision or ready to application? distortion engineering: Vision oder schon praxistauglich?. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*. 40. 342 - 348. 10.1002/mawe.200900457.

Приложение А
Научная статья

86

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 621.78

ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАВНОМЕРНОСТИ ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ВАЛОВ

РАСТОРГУЕВ ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

к.т.н., доцент

ПОДГОРНОВ ДМИТРИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

магистрант

ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет»

Аннотация: в работе рассмотрен способ термо-силовой обработки маложестких валов. Он сочетает силовое воздействие в виде растяжения с одновременным нагревом заготовки. Рассмотрены вопросы формирования напряжений и обеспечением прямолинейности оси вала в функции распределения остаточных напряжений и деформаций с учетом исходной кривизны заготовки. На основе моделирования методом конечных элементов для нелинейной задачи статического силового анализа получены распределения остаточных напряжений и деформаций для образца, имеющего исходную кривизну.

Ключевые слова: пластическая деформация, остаточные напряжения, прямолинейность, термо-силовая обработка.

ENSURING THE UNIFORMITY OF RESIDUAL STRESSES IN THE MANUFACTURE OF SHAFTS

Rastorguev Dmitry Alexandrovich,
Podgornov Dmitry Anatolievich

Abstract: The paper considers a method of thermal-force processing of low-rigid shafts. It combines the force effect in the form of tension with simultaneous heating of the workpiece. The issues of stress formation and ensuring the straightness of the shaft axis in the distribution function of residual stresses and strains are considered, taking into account the initial curvature of the workpiece. Based on finite element modeling for a non-linear problem of static force analysis, the distributions of residual stresses and strains for a sample with initial curvature are obtained.

Key words: plastic deformation, residual stresses, straightness, thermal force processing.

Обеспечение точности является основной задачей при изготовлении деталей машин. При этом точность не только надо сформировать, но и сохранить в межоперационный и в эксплуатационные периоды времени [1]. Основной причиной нарушения точности является коробление заготовок или деталей при релаксации остаточных напряжений. Поэтому решение задачи по формированию точности и ее сохранению должно обеспечиваться путем управления уровнем и распределением остаточных технологических напряжений [2].

Любое технологическое воздействие оказывает влияние на напряженно-деформированное состояние заготовки. Наибольший вклад в этот процесс вносят операции, которые в теории технологической наследственности носят названия – операции барьеры. Они разрывают передачу технологических свойств от предыдущих операций к последующим по комплексу физико-механических свойств, включая уровень остаточных технологических напряжений [3].

LXV МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ | МЦНС «НАУКА И ПРОСВЕЩЕНИЕ»

Рисунок А.1 – Первая страница научной статьи

Это операции, связанные с перестройкой структуры материала. В первую очередь, к ним относят термические операции. Также могут быть использованы термомеханические, химико-термические, операции с применением методов поверхностного пластического деформирования или холодной правки. Значительные изменения в структуре материала, степени и глубине упрочнения, приводят к кардинальной перестройке напряженно-деформированного состояния.

В технологических процессах изготовления малогабаритных длинномерных деталей тел вращения (валы, штоки, втулки, трубы) можно использовать комбинированное температурно-силовое воздействие для формирования заданного распределения остаточных напряжений. Технологический способ такой обработки называется термо-силовая обработка [4]. Альтернативное наименование – горячая правка. Для силового воздействия можно использовать осевое растяжение или сжатие, а также кручение.

При нагреве повышается пластичность материала заготовки и происходит снижение нагрузок при выполнении деформирующих воздействий. Степень нагрева определяется характером силового воздействия, необходимой величиной деформации исходя из задачи формирования физико-механических свойств. Также естественно это связано с характером термообработки и параметрами материала заготовки.

Одним из геометрических показателей пространственного положения, на формирование которого направлен данный технологический метод, является отклонение от прямолинейности. Помимо этого, рассматриваемый процесс термо-силовой обработки связан также с обеспечением соосности цилиндрических поверхностей.

При разработке такой операции необходимо правильно назначать технологические параметры (величину и скорость деформации, температуру). Важно обеспечить проработку максимально полно всего объема заготовки, но при этом не выйти в зону деформации, где начинается локализация деформации с формированием шейки утончения. Важным фактором, влияющим на конечный результат, является исходная кривизна заготовки, которая в ходе термо-силовой обработки должна быть исправлена.



Рис. 1. Стапель для нагружения термо-силовой обработкой

В ходе проведенного моделирования методом конечных элементов получено распределение остаточных деформаций и напряжений после цикла нагружения и разгрузки. В качестве образца принимался цилиндрический стержень с утолщениями на конце под захваты стапеля. Образец имел размеры 10 мм диаметр и 250 мм длину деформируемой части. На концах образец имел утолщения под захваты диаметром 16 мм и длиной по 30 мм. Задача решалась в нелинейной постановке. Для свойств материала – углеродистая сталь, была задана характеристика упрочнения в виде секущего модуля

упругости (1600 МПа). Рабочая часть образца, подвергаемая нагружению, имела исходную кривизну 0,5 мм. Для гладкого образца из стали 45 краевые условия были следующие. Одну крайнюю часть образца жестко фиксировали, к другой прикладывали осевую нагрузку за пределом области упругости. При этом подвижную часть образца ограничивали в поперечном направлении при ее свободном продольном движении. При термо-силовой обработке это обеспечивается подвижным захватом, который перемещается по направляющим ступеля (рис. 1). При нагружении силу изменяли до максимума с последующей разгрузкой.

Распределение остаточных деформаций и напряжений для образца после нагружения растяжением до максимума (с выходом за пределы упругой зоны) с последующей разгрузкой приведено на рис. 2, 3 и 4.

Для того, чтобы избежать таких последствий, деформирование должно проходить при более высоких напряжениях. Это приводит к более интенсивной пластической деформации по длине. За счет этого происходит уменьшение перепада напряжений в сечении. Это приводит к снижению коробления заготовки при снятии припуска с последующим перераспределением напряжений при обтачивании.

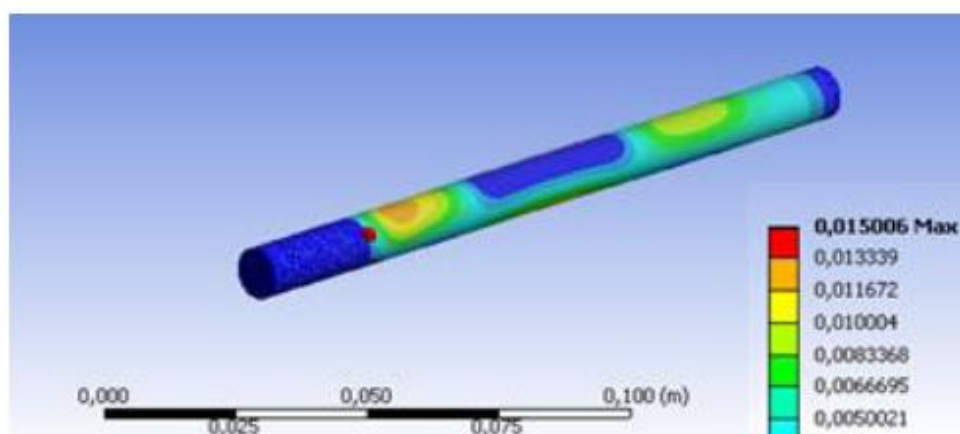


Рис. 2. Распределение остаточных деформаций после растяжения с последующей разгрузкой

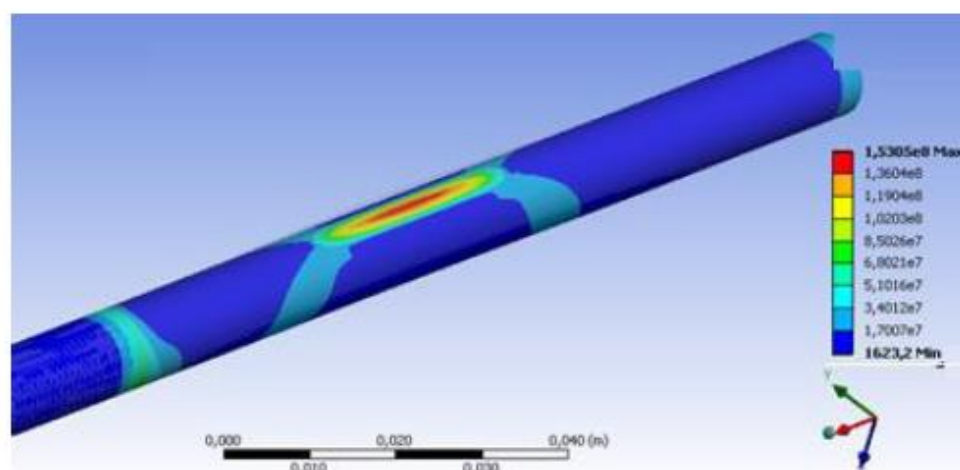


Рис. 3. Распределение напряжений после растяжения с последующей разгрузкой

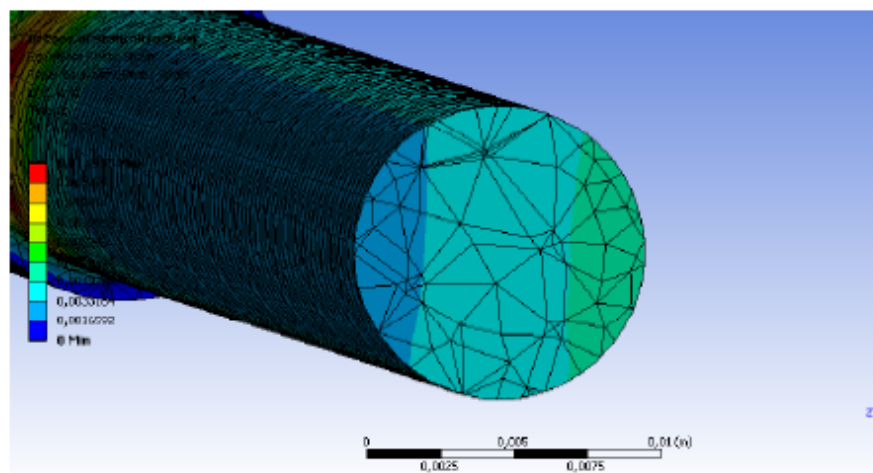


Рис. 4. Распределение остаточных деформаций по сечению вала

Использование термомеханических или термо-силовых методов воздействия на заготовку на начальном этапе технологического процесса позволяет сформировать наиболее благоприятные условия, как для последующей обработки, так и на ее поведение в период эксплуатации.

Список источников

1. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / А. Г. Суслов, В. П. Федоров, О. А. Горленко [и др.] ; под общ. ред. А. Г. Суслова. - Москва : Машиностроение, 2006. - 447 с.
2. Зубарев, Ю. М. Технологическое обеспечение надежности эксплуатации машин : учеб. пособие / Ю. М. Зубарев. - 2-е изд., стер. - Санкт-Петербург : Лань, 2018. - 320 с.
3. Драчев О.И. Технология изготовления маложестких осесимметричных деталей / О.И. Драчев. – М.; Политехника, 2005. - 289 с.
4. Патент 2260628 РФ, МПК С21D9/06. Устройство для термосиловой обработки осесимметричных деталей / Д.А. Расторгуев, О.И. Драчев, Д.Ю. Воронов, В.А. Гуляев; Тольяттинский гос. ун – т. – №2003137556/02; заявл. 25.12.03; опубли. 20.09.05.

Приложение Б
Сертификат участника



Рисунок Б.1 – Сертификат