

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

На правах рукописи

Семенов Кирилл Олегович

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРАВКИ РАСТЯЖЕНИЕМ С
НАГРЕВОМ НА ОСНОВЕ УЧЕТА СТАДИЙ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ

2.5.7. Технологии и машины обработки давлением

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Расторгуев Дмитрий Александрович

Тольятти – 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. БАЗОВЫЕ ПОНЯТИЯ ПРАВКИ РАСТЯЖЕНИЕМ С НАГРЕВОМ И ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ, ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ДЕФОРМАЦИЙ.....	12
1.1 Способы для стабилизации размеров и форм деталей.....	12
1.2 Развитие технологий термомеханических видов обработки.....	18
1.3 Базовые схемы проведения правки растяжением с нагревом.....	29
1.4 Обоснование сущности правки растяжением с нагревом.....	36
1.5 Технологические способы правки растяжением с нагревом.....	38
1.6 Технические трудности проведения правки растяжением с нагревом...	44
1.7 Технические методы и способы контроля деформаций при правке растяжением с нагревом.....	49
Выводы по главе 1.....	63
ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НА ОСНОВЕ РЕОЛОГИЧЕСКОГО ПОДХОДА.....	64
2.1 Базовые формулы для расчета деформаций при правке растяжением с нагревом.....	64
2.2 Реологическое моделирование процесса деформирования для распределенной системы.....	69
Выводы по главе 2.....	83
ГЛАВА 3. СПОСОБ КОНТРОЛЯ ДЕФОРМАЦИИ ОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ ПРИ ПРОЦЕССЕ ПРАВКИ РАСТЯЖЕНИЕМ С НАГРЕВОМ...	85
3.1 Растяжение образцов с контролем деформации оптическим способом.....	85
3.2 Результаты измерений после растяжения.....	90
3.3 Обработка результатов методами цифровой корреляции изображений.....	94
Выводы по главе 3.....	120

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРАВКИ РАСТЯЖЕНИЕМ С НАГРЕВОМ НА ДЕФОРМАЦИЮ ЗАГОТОВОК.....	122
4.1 Технологические факторы влияющие на выбор параметров правки растяжением с нагревом.....	122
4.2 Обоснование выбора режимов правки растяжением с нагревом с точки зрения диагностики.....	124
4.3 Обоснование выбора режимов правки растяжением с нагревом с точки зрения мезомеханики.....	126
4.4 Методика эксперимента.....	131
4.5 Результаты испытаний материала.....	134
4.6 Результаты исследований правки растяжением с нагревом.....	138
4.7 Оценка деформаций и остаточных напряжений.....	150
Выводы по главе 4.....	153
ГЛАВА 5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРАВКИ РАСТЯЖЕНИЕМ С НАГРЕВОМ НА БАЗЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МЕТОДОВ.....	156
5.1 Обзор использования нейросетевых методов в исследовании процессов деформирования. Задачи нейросетевого моделирования.....	156
5.2 Построение нечеткой нейросетевой модели.....	159
5.3 Моделирование процесса деформирования при правке растяжением с нагревом при помощи нейронных сетей.....	169
5.4 Кластеризация деформационных параметров при правке растяжением с нагревом.....	177
Выводы по главе 5.....	193
ГЛАВА 6. ВЛИЯНИЕ ПРАВКИ РАСТЯЖЕНИЕМ С НАГРЕВОМ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБРАБОТКИ МАЛОЖЕСТКИХ ВАЛОВ.....	194
6.1 Обеспечение прямолинейности правкой растяжением с нагревом.....	194
6.2 Влияние правки растяжением с нагревом на конструкторско-технологические параметры заготовки.....	202

6.3 Технологические рекомендации по использованию правки растяжением с нагревом.....	210
6.4 Технико-экономические показатели и эффективность правки растяжением с нагревом.....	217
Выводы по главе 6.....	219
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	221
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	223
ПРИЛОЖЕНИЕ А Таблицы.....	243

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Требования по эксплуатационным параметрам (мощности, скорости, точности, производительности, надежности) современных машин постоянно возрастают. При этом требования к элементам этих машин – деталям соответствующим образом тоже меняются. Для осесимметричных длинномерных деталей, широко применяемых в различных отраслях, ключевой проблемой является обеспечение прямолинейности. Традиционно для правки используется поперечный изгиб, однако перспективным подходом является правка растяжением с нагревом, требующая формирования равномерной деформации по всему объему заготовки. Технологическая сложность правки растяжением с нагревом обусловлена трудностями контроля в процессе нагрева, нестабильностью процесса из-за неоднородности свойств, геометрии заготовки и неравномерности нагрева, что приводит к неравномерному удлинению и сужению. Одной из причин неравномерности деформации также является автоволновой характер пластического течения. Поэтому необходима методика оценки равномерности деформации при нагружении цилиндрических заготовок, учитывающая нагрев, для проектирования эффективной правки растяжением с нагревом и обеспечения заданной точности размеров, формы.

Степень разработанности темы. Задача повышения точности формы длинномерных маложестких валов является актуальной для машиностроения. Существующие методы правки, в частности, правка растяжением с нагревом, обладают рядом преимуществ, однако их эффективность ограничена неравномерностью распределения деформаций и сложностью контроля самого процесса. В настоящее время исследованию процессов правки растяжением с нагревом, посвящены работы О.И. Драчева, Г.В. Мураткина, В.Г. Подпоркина, И.С. Ротова, В.А. Жаркова, Г.В. Шимова, С.П. Буркина, А.В. Серебрякова, С.А. Типалина, Е.А. Максимова, С.А. Зайдеса, А.Н. Овсеенко, Е.Ю. Кропоткина, Д.А. Расторгуева, Д.Ю. Воронова и другие. Несмотря на значительное количество исследований в области пластического

формоизменения, вопросы учета стадий пластического течения, влияния температурных полей и разработки эффективных методов контроля равномерности деформаций при правке растяжением с нагревом требуют дальнейшего изучения. Недостаточно разработаны методы прогнозирования и управления процессом на основе анализа сигнала нагружения и моделирования с учетом температурно-зависимых свойств материала.

Область исследования соответствует п. 1 «Закономерности деформирования материалов и повышения их качества при различных термомеханических режимах, установление оптимальных режимов обработки», п. 3 «Методы деформирования, формирующие в материалах структуру с комплексом физико-механических свойств, обеспечивающих повышение возможностей пластического формообразования заготовок и последующей эксплуатации изделий» паспорта специальности 2.5.7. Технологии и машины обработки давлением.

Объект исследования: процесс правки растяжением с нагревом длинномерных маложестких валов.

Предмет исследования: взаимосвязь стадий пластического течения, распределения температуры, параметров нагружения и особенностей локализации пластических деформаций при правке растяжением с нагревом, влияющая на эффективность процесса формирования прямолинейности и равномерности деформаций.

Цель работы: повышение точности геометрии маложестких валов с обеспечением равномерного распределения деформаций при правке растяжением с нагревом на основе учета взаимосвязи особенностей локализации пластических деформаций со стадиями пластического течения.

Для достижения поставленной цели в диссертации определены следующие **задачи исследования:**

1. Провести систематизацию технологий, способов, влияющих факторов по формированию прямолинейности оси маложестких деталей.
2. Разработать математическую модель процесса деформирования при

правке растяжением с нагревом с учетом изменения температуры и нагружения.

3. Разработать методику комплексной оценки равномерности деформаций по длине осесимметричного вала на основе оптического метода контроля распределения деформаций в процессе нагружения, разработать критерии оценки степени локализации и оценки равномерности распределения деформации.

4. Провести исследование особенностей локализации пластической деформации с учетом стадий пластического течения на основе статистического анализа равномерности удлинений, полученных методом оптического контроля.

5. Разработать алгоритм контроля стадий пластического течения по особенностям сигнала силового нагружения путем обучения и применения нейросетевой модели с целью выхода на стадию нагружения, обеспечивающую максимально равномерную и полную проработку материала заготовки при правке растяжением с нагревом.

6. Разработать и научно обосновать технологические режимы правки растяжением с нагревом мало жестких цилиндрических заготовок, обеспечивающие однородность распределения деформаций, устранение исходной кривизны и повышение жесткости заготовки за счет оптимизации параметров процесса на различных стадиях пластического течения.

Научная новизна работы:

1. Разработана распределенная модель процесса деформирования, отличающаяся от известных моделей тем, что применяется реологическая модель материала на основе модели Ишлинского с упрочнением с температурно-зависимыми коэффициентами для анализа особенностей распределения деформаций по длине заготовки, а учет распределения температуры и свойств по длине заготовки обеспечивается последовательным соединением модулей-ячеек с индивидуальным вводом параметров.

2. Разработана методика моделирования технологических параметров,

коэффициента локальности деформирования на основе нейро-нечеткой сети ANFIS с формированием системы лингвистического вывода для получения алгоритмов обеспечения равномерности деформирования в функции технологических параметров.

3. Разработана методика прогнозирования стадии пластического течения по сигналу нагружения на основе сети типа LSTM для обеспечения при правке растяжением с нагревом максимально равномерной деформации.

4. Разработан и апробирован оптический способ контроля распределения деформаций по длине образцов на основе метода цифровой корреляции изображения, отличающийся от известных оптических способов контроля использованием в условиях нагрева заготовок в рамках технологического эксперимента на образцах длиной до 350 мм в рабочей зоне.

5. Экспериментально подтверждены зависимости степени однородности деформации от стадии пластического течения материала при правке растяжением с нагревом на основе фиксации полей смещений методом цифровой корреляции изображений.

6. Установлены закономерности формирования однородного деформационного поля при правке растяжением с нагревом, основанные на управлении переходами между стадиями пластического течения. Научно обоснована возможность целенаправленного повышения жесткости и исправления геометрии заготовок за счет выбора режимов, соответствующих первой и второй стадиям упрочнения, что обеспечивает устойчивость процесса деформирования.

Теоретическая значимость работы:

1. Разработана математическая модель материала учитывающая температурно-зависимые свойства материала и стадии пластического течения, расширяющее представление о динамике поведения деформирования маложестких деталей.

2. Предложена методика моделирования и прогнозирования стадий

пластического течения вносят вклад в развитие интеллектуальных систем управления технологическими процессами.

3. Результаты экспериментальных исследований, расширяющие знания о закономерностях протекания стадий пластического течения при растяжении с нагревом, которые позволяют установить связь между стадиями упрочнения и устойчивостью процесса правки растяжением.

Практическая значимость работы:

1. Разработанная новая методика позволяет оценивать распределение деформаций по длине для длинномерных осесимметричных заготовок при правке растяжением с нагревом в режиме реального времени с заданной дискретностью.

2. Обоснование диапазона технологических режимов, в котором обеспечивается заданная геометрия заготовки, на основе учетов стадий пластического течения и с возможностью использования косвенного контроля по параметрам силового нагружения.

3. Практическое внедрение разработанных рекомендаций в заготовительное производство позволяет повысить качество правки мало жестких валов, снизить уровень исходных погрешностей и увеличить жесткость деталей перед последующей механической обработкой. Это обеспечивает повышение точности точения на 10-17% за счет минимизации упругих отжатый, приводит к снижению процента брака и сокращению затрат на доводочные операции.

Положения, выносимые на защиту:

1. Распределенная математическая модель процесса правки растяжением с нагревом, отличающаяся от известных моделей тем, что основана на реологической модели Ишлинского с температурно-зависимыми коэффициентами, учитывающая распределение температуры и свойств по длине заготовки.

2. Методика моделирования технологических параметров и коэффициента локальности деформирования на основе нейро-нечеткой сети

ANFIS, обеспечивающая формирование системы лингвистического вывода для оптимизации параметров процесса и достижения равномерности деформирования.

3. Методика прогнозирования стадии пластического течения по сигналу нагружения с использованием нейронной сети рекуррентного типа LSTM, позволяющая в режиме реального времени определять оптимальный момент прекращения нагружения для обеспечения максимальной равномерности деформации.

4. Оптический способ контроля распределения деформаций для цилиндрических образцов до 350 мм в рабочей зоне на основе метода цифровой корреляции изображений в условиях нагрева, обеспечивающий высокую точность измерений и возможность анализа полей смещений.

5. Зависимость между стадией пластического течения материала и степенью однородности деформации при правке растяжением с нагревом, подтвержденная результатами оптического контроля полей смещений.

6. Закономерности формирования однородного деформационного поля при правке растяжением с нагревом посредством управления переходами между стадиями пластического течения, а также научное обоснование целенаправленного повышения жесткости и исправления геометрии заготовок за счёт выбора режимов, соответствующих стадиям упрочнения, обеспечивающих устойчивость процесса деформирования.

Методы исследования. Математическое моделирование на основе методов механики сплошных сред и теории пластичности. Численное решение систем дифференциальных уравнений, описывающих упрочняемую упругопластическую среду. Экспериментальные методы с использованием оптического метода контроля. Для обработки результатов использовались методы статистической обработки результатов измерений. Методы машинного обучения для нейросетевого моделирования.

Достоверность исследования. Для анализа деформаций использовались комплексные способы контроля (прямые механические

измерения поверенными средствами контроля, оптические средства контроля с тарировкой и калибровкой при статических и динамических измерениях). Использовалась цифровая камера для оценки точности определения деформации (камера Basler acA1440-73gc на основе сенсора Sony Pregius IMX273 1/2.9", обеспечивающая разрешение 1,6 МП (1440 x 1080), площадь 29 x 29 мм, глубина 8 или 12 бит).

Апробация работы. Основные результаты исследований, проведенных в работе, докладывались и обсуждались на всероссийских и международных конференциях, среди которых можно выделить следующие: Международная научная конференция «Приоритетные направления инновационной деятельности промышленности», г. Казань, 2021 г.; Международная научная конференция «Инновационные технологии, экономика и менеджмент в промышленности», г. Волгоград, 2021 г.; Всероссийская научно-техническая конференция «Высокие технологии в машиностроении», г. Самара, 2021 г.; Международная научно-практическая конференция «Инновации в машиностроении (ИнМаш - 2024)», г. Новосибирск, 2024 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, в том числе 5 статей опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России; 3 статьи – в изданиях, индексируемых базой Scopus/ Web of Science; 4 статьи – в сборниках научных конференций; получены 3 патента на изобретение.

Связь с государственными программами и НИР. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90148 Аспиранты – «Исследование особенностей локализации деформации по длине осесимметричных образцов с использованием методов машинного обучения».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и одного приложения. Работа изложена на 249 страницах, включает в себя 147 рисунков, 32 таблицы, список литературы из 175 наименований.

ГЛАВА 1. БАЗОВЫЕ ПОНЯТИЯ ПРАВКИ РАСТЯЖЕНИЕМ С НАГРЕВОМ И ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ, ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ДЕФОРМАЦИЙ

1.1 Способы для стабилизации размеров и форм деталей

Распространенные способы снижения остаточных напряжений показаны на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 – Методы снижения остаточных напряжений

Вибрационный метод применяется для снятия остаточных напряжений в заготовках, полученных методами пластической деформации, вызванных механической обработкой – строганием, фрезерованием, протягиванием, сверлением шлифованием и т.д.

Термообработка назначается для снятия остаточных напряжений, с целью стабилизации размеров деталей и внутренних напряжений. Этот процесс дает достаточно высокое качество стабилизации и резко снижает уровень остаточных напряжений.

Построение традиционного технологического процесса термической обработки требует применение нескольких промежуточных отпусков, что может привести к увеличению стоимости обработки и не обеспечивает высокой производительности. При отпуске, для снятия остаточных напряжений главным механизмом изменения остаточных напряжений является их релаксация, которая протекает более интенсивно при увеличении температуры.

В других случаях помимо снижения и стабилизации остаточных напряжений, должна обеспечиваться прямолинейность и устраняться скрученность вала относительно продольной оси.

Устранение столь разнообразных дефектов требует применения различных способов правки: изгибом, сжатием, кручением, растяжением с нагревом. В свою очередь, правка изгибом и сжатием может подразделяться на продольную, поперечную и винтовую. Классификация известных способов, применяемых при правке представлена на рисунке 1.2.

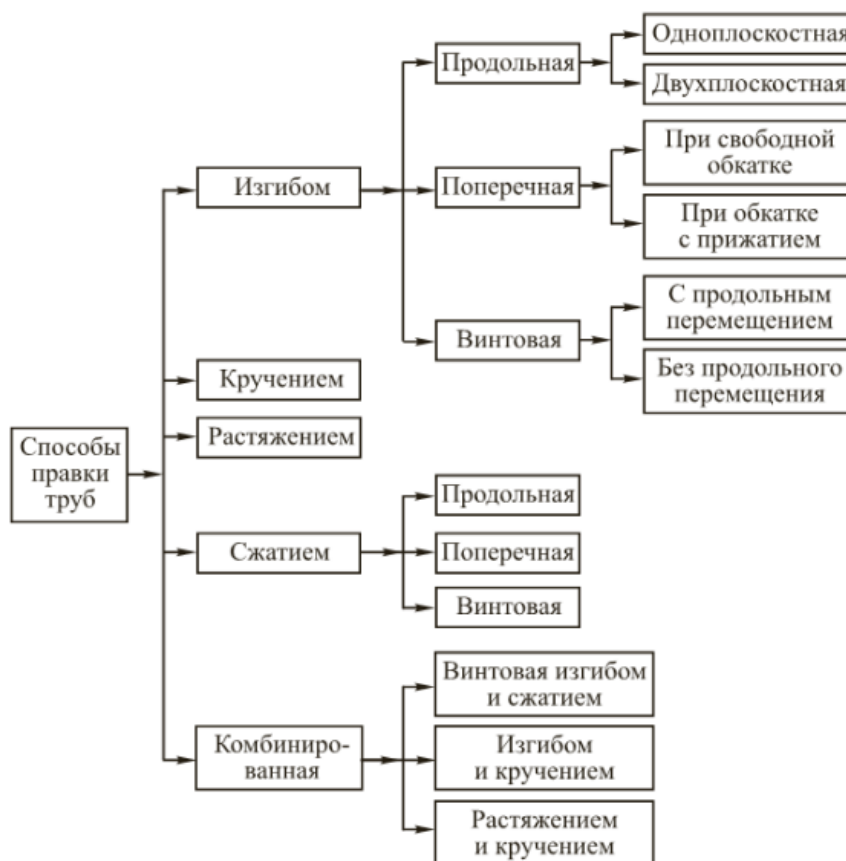


Рисунок 1.2 – Классификация способов правки

При продольной правке изгибом точки приложения равнодействующих перемещаются вдоль образующей поверхности проката. Силы, изгибающие изделие, могут располагаться либо в одной плоскости, либо последовательно в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. На основании этого продольную правку изгибом можно разделить на одно- и двухплоскостную.

В случае поперечной правки изгибом деформирующие силы перемещаются по винтовой траектории относительно поверхности заготовки в плоскости, перпендикулярной к ее продольной оси, без продольного смещения. Поперечная правка изгибом наиболее характерна для процесса охлаждения нагретого проката.

Изгиб нагретого проката может осуществляться во время его вращения под действием силы тяжести. При использовании этого явления поперечную правку изгибом называют свободной обкаткой.

Если правится холодная заготовка, то изгиб должен происходить под действием внешних сил, относительно которых изделие обкатывается. Такой способ может быть назван поперечной правкой изгибом при обкатке с прижатием.

Винтовая правка изгибом заключается в том, что силы, изгибающие заготовку, поворачиваются относительно нее и точки их приложения одновременно перемещаются продольно. Винтовая правка изгибом может осуществляться как с продольным перемещением проката, так и без него.

Правка кручением предусматривает относительный поворот поперечных сечений, ограничивающих участок фасонной трубы с устраняемой скрученностью, в направлении, противоположном исходной скрученности. При этом равнодействующие силы действуют тангенциально в плоскостях, перпендикулярных к оси изделия, создавая крутящий момент на подвергаемом обработке участке трубы.

При правке растяжением с нагревом равнодействующие силы, осуществляющие упругопластическую деформацию растяжения, прикладываются вдоль оси изделия. Правка сжатием характеризуется тем,

что равнодействующие деформирующие силы расположены в одной плоскости, перпендикулярной к оси трубы, и направлены к ее центру. По аналогии с правкой изгибом правку сжатием можно подразделить на продольную, поперечную и винтовую.

Комбинированная правка заключается в одновременном сочетании указанных выше основных способов. Для фасонных профилей обычно применяют либо правку изгибом с одновременным сжатием или кручением, либо правку растяжением с нагревом с одновременным кручением.

Правка круглых или профильных труб осуществляется на трубоправильных машинах. В зависимости от конструктивного исполнения, назначения и технологических особенностей такие машины можно подразделить на следующие основные группы: цепные, с параллельными роликами, прессы, роликовые сортоправильные, раскруточные, растяжные, косовалковые, роторные, с качающимися обоймами, конусно-фильерные



Рисунок 1.3 – Классификация машин для правки валов

Горячая поперечная правка изгибом при свободной обкатке. Этот способ преимущественно применяют в качестве предварительной правки после горячей прокатки, термообработки и других операций, связанных с нагревом металла. Предварительная горячая правка проводится в процессе остывания заготовки и дает возможность избежать ее нежелательного искривления. Необходимый для правки изгиб происходит под действием веса самой трубы. Вращение способствует равномерному охлаждению трубы, что положительно сказывается на ее прямолинейности.

К недостаткам следует отнести относительно низкую точность исправления кривизны охлаждаемого изделия, а также невозможность устранения этого дефекта для деталей, имеющих температуру ниже 600 °С.

Поперечная правка изгибом с приложением внешней силы. Холодная поперечная правка изгибом требует приложения к изделию внешних сил. Дискретный процесс правки этим способом осуществляется на прессах. Подобные прессы находят применение преимущественно в автомобильной промышленности. Широкое распространение прессов объясняется их универсальностью, возможностью правки изделий с различными размерами и конфигурацией.

Процесс с использованием ручного труда имеет низкую производительность. При этом качество и стабильность результатов правки в значительной мере зависят от квалификации оператора.

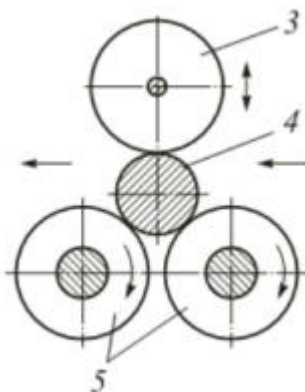


Рисунок 1.4 – Сечение для поперечной правки изгибом на роликах при обкатке с прижатием заготовки

Правка кручением. Правка кручением осуществляется на специальных правильно-раскруточных машинах. Правильно-раскруточные машины предназначены для правки кручением в холодном и нагретом состоянии различных некруглых труб, имеющих исходную скрученность, которую требуется устранить. Дискретность процесса правки кручением на этих машинах позволяет обрабатывать трубы переменного по длине сечения.

При разработке технологии правки и конструировании правильно-раскруточных машин следует учитывать возможную потерю устойчивости поперечного сечения профиля в зонах, прилегающих к зажимам крутильных головок.

Правка растяжением. При обработке труб применяют также правку растяжением, которая осуществляется на правильно-растяжных машинах. Для изделий из малопластичных и высокопрочных материалов с пределом текучести в холодном состоянии, близким к пределу прочности, применяют машины для правки растяжением с нагревом.

Выправляемое изделие может быть нагрето электрическим током методом сопротивления. В этом случае ток подводится через зажимные устройства, вкладыши которых изготовляют из высокопрочной бронзы, обладающей хорошей электрической проводимостью.

Их использование рационально в тех случаях, когда ввиду сложной конфигурации поперечного сечения обрабатываемых изделий нельзя использовать многороликовые сортоправильные машины, а также при необходимости правки этих изделий в теплом или горячем состоянии.

Продольная правка изгибом. Продольная правка изгибом осуществляется на широко распространенных роликовых правильных машинах. Для получения более высокой точности по прямолинейности труб применяют двухплоскостную продольную правку изгибом на машинах, имеющих горизонтальную и вертикальную рабочие клетки.

К недостаткам этих машин помимо невысокой точности правки и возможной овализации тонкостенных труб следует отнести также то, что

правильные ролики должны быть спрофилированы в соответствии с формой поперечного сечения выправляемого изделия. В связи с этим при широком сортаменте проката, обрабатываемого на одной машине, требуется большой парк сменных правильных роликов, что связано с необходимостью проведения перевалок, которые ведут к снижению производительности.

1.2 Развитие технологий термомеханических видов обработки

В теоретических исследованиях показано, что для минимизации технологической наследственности, передаваемой от операции, необходимо создать равномерное напряженное состояние по всей длине заготовки и снизить уровень деформаций, что, естественно, приведет к равномерной релаксации напряжений и минимальному короблению готовых изделий при их эксплуатации.

Для этой цели была введена в технологический процесс операция – правка растяжением с нагревом. Трудность управления этим процессом состоит в том, что физико-механические свойства материала, из которого изготавливаются детали, настолько разнообразны, а их поведение зависит от внешних условий, что найти единый закон управления просто невозможно.

Более подробное описание и анализ термомеханических видов обработки представлен в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Патентная литература

№	Автор, страна, дата публикации, название	Страна выдачи, номер охранного документа, рубрика МКИ (УДК)	Сущность технического решения и цель его создания
1	2	3	4
1	В.П. Сницарев, В.Ф. Запорожец, И.Е. Блохин, РФ (СССР),	РФ (СССР) Авторское свидетельство № 617484, С21D9/28	Исключение коробления деталей с одновременным дополнительным упрочнением закаливаемой поверхности. Станок снабжен соединенным

Продолжение таблицы 1.1 – Патентная литература

1	2	3	4
	<p>30.07.78г.,</p> <p>Станок для термической обработки деталей</p>		<p>с механизмом прижима, узлом регулирования прижима, состоящим из датчика и регулятора давления, электрически связанных между собой.</p>
2	<p>О.И. Драчев, Г.Г. Палагнюк, В.К. Мазур, Т.Т. Ахмедьянов,</p> <p>РФ (СССР), 07.03.87г.,</p> <p>Способ механической обработки нежестких деталей</p>	<p>РФ (СССР), Авторское свидетельство № 1294482</p>	<p>Повышение точности обработки и улучшение эксплуатационных характеристик обработанных деталей, стабилизации остаточных напряжений исключаящее влияние технологич. наследственности от предыдущих операций. Базирование детали осуществляют по длине деталей в самоцентрирующихся опорах.</p>
3	<p>М.И. Оленин, Ю.П. Григорьев, А.А. Разгуляев, И.Я. Пухонто, И.Р. Цимбал,</p> <p>РФ (СССР), 23.05.83г.,</p> <p>Устройство для термической правки изделий</p>	<p>РФ (СССР) Авторское свидетельство № 1018984</p>	<p>Повышение качества правки. Устройство, содержит оправку с фиксаторами, при этом коэффициент термического расширения материалов оправки и фиксаторов соответственно больше или меньше коэффициента термического расширения материала заготовки, оправка выполнена секционной, при этом каждая секция в зоне фиксатора имеет выступ, а на фиксаторе выполнена соответствующая ему проточка.</p>
4	<p>О.И. Драчев, В.К. Мазур, А.В. Клементьев, В.В. Акимов,</p> <p>РФ (СССР), 15.10.87г.,</p>	<p>РФ (СССР), Авторское свидетельство № 1344455</p>	<p>Повышение эффективности процесса стабилизации формы осесимметричных деталей. К закрепленной одним концом детали к свободному концу прикладывают переменное по направлению силовое</p>

Продолжение таблицы 1.1 – Патентная литература

1	2	3	4
	Способ стабилизации формы осесимметричных деталей		воздействие в виде крутящего момента, частота изменения направления которого равна собственной частоте крутильных колебаний детали, создается равномерное по длине напряженное состояние.
5	В.К. Мазур, О.И. Драчев, РФ (СССР), 07.07.88г., Устройство для закалки валов малой жесткости	РФ (СССР), Авторское свидетельство № 1407969	Уменьшение коробления изделий. Устройство содержит трубу с равномерно расположенными по ее поверхности отверстиями, которая выполнена из материала, не претерпевающего мартенситного превращения и имеющего коэффициент термического расширения, меньший коэффициента термического расширения материала изделия. Соотношение длины и наружного диаметра трубы не менее 8. На концах трубы расположены захваты, при этом один из захватов выполнен в виде разрезной резьбовой втулки с гайкой
6	О.И. Драчев, Э.Н. Хенкин, О.И. Иванов, РФ (СССР), 30.01.92г., Способ термической обработки осесимметричных длинномерных деталей	РФ (СССР), Авторское свидетельство № 1708884	Повышение качества обработки деталей путем предотвращения коробления детали. Стапель в сборе с деталью нагревают и держат на постоянной температуре. В период нагрева происходит пластическая осевая деформация за счет разности коэффициентов линейного расширения стапеля и детали. Стапель выполняют многослойным с дополнительным объемом,

Продолжение таблицы 1.1 – Патентная литература

1	2	3	4
			заполненным материалом с низким коэффициентом теплопроводности, при этом время охлаждения стапеля в несколько раз больше времени охлаждения детали.
7	В.К. Мазур, РФ (СССР), 15.01.93г., Устройство для термической обработки маложестких валов	РФ (СССР), Авторское свидетельство № 1788978	Повышение качества обработки путем уменьшения коробления маложестких валов. Труба выполнена сплошной из металла или сплава с коэффициентом термического расширения материала большим коэффициента термического расширения материала вала, а захваты выполнены в виде колец с коническими отверстиями с расположенными в них вкладышами, при этом один из захватов закреплен на торце станины посредством резьбы.
8	О.И. Драчев, РФ (СССР), 07.01.93г., Способ термической обработки осесимметричных деталей	РФ (СССР), Авторское свидетельство № 1786138	Повышение качества готовых изделий. Способ включает нагрев в многослойном стапеле с заданной пластической деформацией и равномерными растягивающими напряжениями по каждой ступени детали и равномерное охлаждение за счет подбора площади охлаждения радиаторов по периметру и с учетом разности поверхности охлаждения детали. Равное напряжение по ступеням обеспечивается за счет постоянства отношений площадей поперечных

Продолжение таблицы 1.1 – Патентная литература

1	2	3	4
			сечений секций стапеля и ступеней детали.
9	В.П. Степанов, А.В. Ушаков, М.В. Шкотова, РФ (СССР), 30.01.93г., Способ термо-механической обработки деталей	РФ (СССР), Патент № 1792436	Улучшение качества детали., Включает нагрев под закалку и охлаждение в штампе, при охлаждении фиксируют в штампе только центральную зону детали, а наружную незафиксированную часть охлаждают со скоростью, обеспечивающей образование мартенсита.
10	В.Б. Дементьев, А.А. Сухих, РФ, 10.03.96г., Способ термо-механической обработки сталей	РФ, Патент № 2055911	Повышение характеристик прочности, ударной вязкости, пластичности и снижение анизотропии упрочнения. Включает нагрев до температуры аустенизации, пластическую деформацию, осуществляемую радиальным обжатием, растяжением и кручением, после деформированную выдержку, охлаждение и отпуск. Пластическую деформацию кручением проводят с суммарной степенью 19-25% при отношении степеней деформации кручением в двух взаимоположенных направлениях равных 1,9-2,1.
11	О.И. Драчев, Д.А. Расторгуев, Д.Ю. Воронов РФ, Устройство для термосиловой обработки	РФ, Патент № 2232198	Повышение надежности и эффективности термосиловой обработки (ТСО) с достижением следующих технических результатов: упрощение конструкции устройства для ТСО путем использования его внутренних ресурсов; повышение стабильности остаточных

Продолжение таблицы 1.1 – Патентная литература

1	2	3	4
			<p>напряжений и структуры материала по длине детали за счет управления величиной прикладываемого при ТСО усилия. В устройстве для ТСО осесимметричных нежестких валов, содержащим стапель с неподвижным и подвижным захватами, силовой узел и печь, последний выполнен в виде вертикально размещенных телескопически соединенных между собой труб, полости которых заполнены рабочей средой. Донные части труб выполнены с отверстиями. Внутренние трубы подвижные и снабжены обратными клапанами для открывания отверстий при выдвигании труб вверх. Внешние трубы выполнены неподвижными и снабжены выпускными клапанами для открывания отверстий при обратном движении внутренних труб вниз. Рабочая среда – сыпучий материал.</p>
12	<p>Д.В. Хван, А.Д. Хван, А.А. Воропаев, С.В. Пустовалов, А.А. Горячев, РФ, 27.11.2003г., Способ улучшения технологических свойств металлов</p>	<p>РФ, Патент № 2217508</p>	<p>Улучшение технологических свойств металлов. Сущность изобретения: удлиняемую трубчатую заготовку подвергают немонотонному деформированию в цикле нагружения «растяжение - кручение – растяжение...». При этом немонотонность деформирования обеспечивают кручением заготовки после каждого этапа ее растяжения в осевом</p>

Продолжение таблицы 1.1 – Патентная литература

1	2	3	4
			<p>направлении. Использование изобретения в машиностроении позволит получать изделия высокого качества.</p>
13	<p>О.И. Драчев, Д.А. Расторгуев, Д.Ю. Воронов, РФ, 20.06.2005г., Способ термосиловой обработки длинномерных осесимметричных деталей и устройство для его осуществления</p>	<p>РФ, Патент № 2254383</p>	<p>Повышение стабильности размеров и формы длинномерных осесимметричных малогабаритных деталей путем устранения направленности осевых остаточных напряжений и направленной текстуры материала заготовки по ее длине. Это достигается за счет использования силового воздействия на заготовку в процессе полного цикла термообработки, причем цикл обработки разделяется на подциклы, в течение каждого из которых силовое воздействие производят в пределах выбранного участка заготовки путем последовательного деформирования в различных направлениях, причем управление пределом производят путем регулирования температурного воздействия на участок заготовки, а длину участка выбирают с учетом гармоник колебаний детали. Устройство для осуществления способа ТСО осесимметричных деталей содержит ступень с фиксаторами заготовки и нагревательный элемент, каждый из фиксаторов</p>

Продолжение таблицы 1.1 – Патентная литература

1	2	3	4
			<p>выполнен с отверстием для размещения в нем заготовки и содержит клинья, выполненные с возможностью контакта со штоками, снабженными на своих концах гидроцилиндрами, направляющее кольцо, установленное с возможностью свободного вращения в отверстии фиксатора, пневмосистему, а нагревательный элемент разделен на секции теплоизолирующими кольцами.</p>
14	<p>О.И. Драчев, Д.А. Расторгуев, В.А. Гуляев, Д.Ю. Воронов, РФ, 20.09.2005г., Устройство для термосиловой обработки осесимметричных деталей</p>	<p>РФ, Патент № 2260628</p>	<p>Усовершенствование конструкции устройства для термосиловой обработки, обеспечивающее повышение качества термосиловой обработки. Стапель выполнен из двух полых труб. Крышки механизма фиксации имеют коробчатую форму и выполнены с возможностью неразъемного соединения с трубами стапеля с использованием тяги с резьбой на внутренней и наружной поверхности, причем по внутренней резьбе фиксируют заготовку, а по наружной – гайку для силового замыкания.</p>
15	<p>О.И. Драчев, Д.А. Расторгуев, А.О. Драчев, РФ, 10.02.2010г.,</p>	<p>РФ, Патент № 2381281</p>	<p>Повышение качества обработки деталей, устройство содержит вертикально установленный стапель, выполненный из материала с коэффициентом линейного расширения большим, чем у</p>

Продолжение таблицы 1.1 – Патентная литература

1	2	3	4
	<p>Устройство для термосиловой обработки осесимметричных деталей</p>		<p>детали в виде цилиндрической трубы с фланцами на обоих концах, неразъемно соединенный со стапелем резьбовой механизм фиксации детали с обоих концов в виде двух опорных крышек с отверстиями в центре, в которых установлены цилиндрические тяги с резьбой на внутренней и наружной поверхностях для фиксации по внутренней резьбе детали, а по наружной - гайки для силового замыкания.</p>
Технологии правки			
16	<p>С.П. Буркин, В.В. Трескин, А.В. Серебряков, А.В. Серебряков, С.Г. Чикалов, С.А. Ладыгин, С.Б. Прилуков, В.В. Мальцев, В.С. Прибытков</p> <p>РФ, 27.01.2011г.,</p> <p>Электро- контактная установка термической обработки и правки растяжением труб, прутков и профилей</p>	<p>РФ, Патент № 2453613</p>	<p>Установка для электроконтактного нагрева содержит трансформатор, станину с продольными направляющими, закрепленные на станине неподвижные токоподводящие контакты, подвижные контакты, установленные на суппорте продольного перемещения, гидроцилиндр перемещения подвижных контактов и управляемый гидропривод. Между суппортом подвижных контактов и гидроцилиндром соосно с последним закреплен на платформе пневмоцилиндр плунжерного типа, плунжер которого жестко соединен со штоком гидроцилиндра и имеет длину рабочего хода не менее величины теплового удлинения нагреваемых заготовок.</p>

Продолжение таблицы 1.1 – Патентная литература

1	2	3	4
17	<p>Дэвид, Дж. Брайан,</p> <p>РФ, US, 14.07.2011г.,</p> <p>Горячая правка растяжением высокопрочного титанового сплава, обработанного в области альфа/бета-фаз</p>	<p>РФ, US, Патент № 2538467</p>	<p>Способ правки подвергнутой дисперсионному твердению металлической заготовки, выбранной из одного из металла и сплава металла, включает нагрев подвергнутой дисперсионному твердению металлической заготовки до температуры правки. В определенных вариантах воплощения температура правки находится в диапазоне температур правки от 0,3 температуры плавления в градусах Кельвина подвергнутой дисперсионному твердению металлической заготовки до температуры на по меньшей мере 25°F (13,9°C) ниже температуры старения, использованной для упрочнения (твердения) подвергнутой дисперсионному твердению металлической заготовки. К подвергнутой дисперсионному твердению металлической заготовке прикладывают растягивающее напряжение при растяжении в течение времени, достаточного для растяжения и правки подвергнутой дисперсионному твердению металлической заготовки, с получением выправленной, подвергнутой дисперсионному твердению металлической заготовки.</p>

Таблица 1.2 – Оценка преимуществ и недостатков аналогов

№	Показатели положитель. эффекта	Аналоги														
		А.с. № 617484	А.с. № 1018984	А.с. № 1294482	А.с. № 1344455	А.с. № 1407969	А.с. № 1708884	А.с. № 1788978	А.с. № 1786138	Патент № 2055911	Патент № 1792436	Патент № 2232198	Патент № 2217508	Патент № 2260628	Патент № 2254383	Патент № 2381281
		Обеспечивающее достижение цели предполагаемым путем														
1	Повышение стабильности размеров и форм	+1	+1	+2	+4	+1	+3	+2	+2	0	+1	+4	0	+5	+4	+5
2	Повышение качества после обработки путем изменения конструкции установки	+4	+4	+3	+4	+2	0	+5	+5	0	+3	+4	0	+5	+4	+5
3	Повышение качества после обработки путем предотвращения коробления	+5	+3	+2	+3	+5	+5	+3	+2	+3	+4	+3	+1	+5	+4	+5
		Улучшающие, полезные свойства объекта														
1	Долговечность	+2	+3	+3	+4	+3	+3	+3	+2	+4	+5	+4	+4	+4	+4	+5
2	Технологичность	+3	+2	+3	+3	+3	+2	+3	+4	+4	+4	+4	+4	+4	+4	+5
		Ослабляющие, вредные свойства														
1	Сложность конструкции	-2	-3	-1	0	-2	-3	-3	-2	-1	-2	-1	-1	0	-3	0
Суммарный положительный эффект		13	10	12	18	12	10	13	13	10	15	18	8	23	17	25

1.3 Базовые схемы проведения правки растяжением с нагревом

Правка растяжением с нагревом является эффективным технологическим способом формирования геометрии и физико-механических свойств мало жестких осесимметричных деталей.

Применительно к технологии обработки мало жестких деталей осесимметричной формы, заготовка для которых представляет стержень одного диаметра. Основными технологическими задачами при правке растяжением с нагревом являются обеспечение отклонения от прямолинейности заготовки вала при условии нахождения разности диаметральных размеров по всей длине вала в заданных границах. Данная разница диаметров будет определять в дальнейшем рассеивание снимаемого припуска на черновой обработке. Это, в свою очередь, будет задавать колебания силы резания, которая, в свою очередь, будет определять нестабильность упругой деформации заготовки.

Отклонение от прямолинейности заготовки определяет значение упругих деформаций при закреплении заготовки вала в системе самоцентрирующихся люнетов, установленных по технологической оси с заданной погрешностью. При раскреплении заготовки будет потеря геометрической формы на величину этих деформаций.

Кроме задач по обеспечению геометрических параметров необходимо решить задачу по заданному формированию физико-механических свойств материала заготовки по всему объему. Величина и неравномерность деформации в различных направлениях заготовки будет определять геометрические параметры в после операционный и в эксплуатационный периоды. Предельный перепад пластических деформаций, при котором сохраняются геометрические параметры заготовки, зависит от размеров – диаметра и длины вала, от их соотношения, от модуля упругости материала.

Данные соображения позволяют задавать предельные допустимые перепады деформаций, а также допуск на диаметр при обеспечении заданной прямолинейности на этапе правки растяжением с нагревом.

Повышение точности и качества заготовок является необходимыми факторами повышения общей эффективности технологических процессов. Одним из технологических способов обеспечения необходимых конструктивных параметров и физико-механических свойств является использование правки растяжением с нагревом заготовки [2, 9], которое характеризуется одновременным приложением силового и температурного воздействий [20]. Нагружение может вестись путем растяжения, сжатия, кручения или при комбинированных нагрузках. Правка растяжением с нагревом может вестись распределено по всей длине одновременно или по отдельным участкам. В качестве источника силы нагружения могут применяться как внешние приводы (гидравлические [18, 19], электромеханические [46]), так и силовые стапели [1, 3, 46] использующие разницу температурных деформаций установки для закрепления заготовки и самой заготовки для создания сил нагружения за счет разницы температурных деформаций стапеля и заготовки [17]. Далее эти моменты рассмотрены детальнее.

Правка растяжением с нагревом, является комплексной операцией, которая формирует и геометрическую точность, и набор физико-механических свойств. На заготовительном этапе формируется прямолинейность оси заготовки, задается уровень и характер распределения остаточных технологических напряжений и деформаций. Данная технология значительно упрощает проведение последующей механической обработки за счет формирования равномерного припуска.

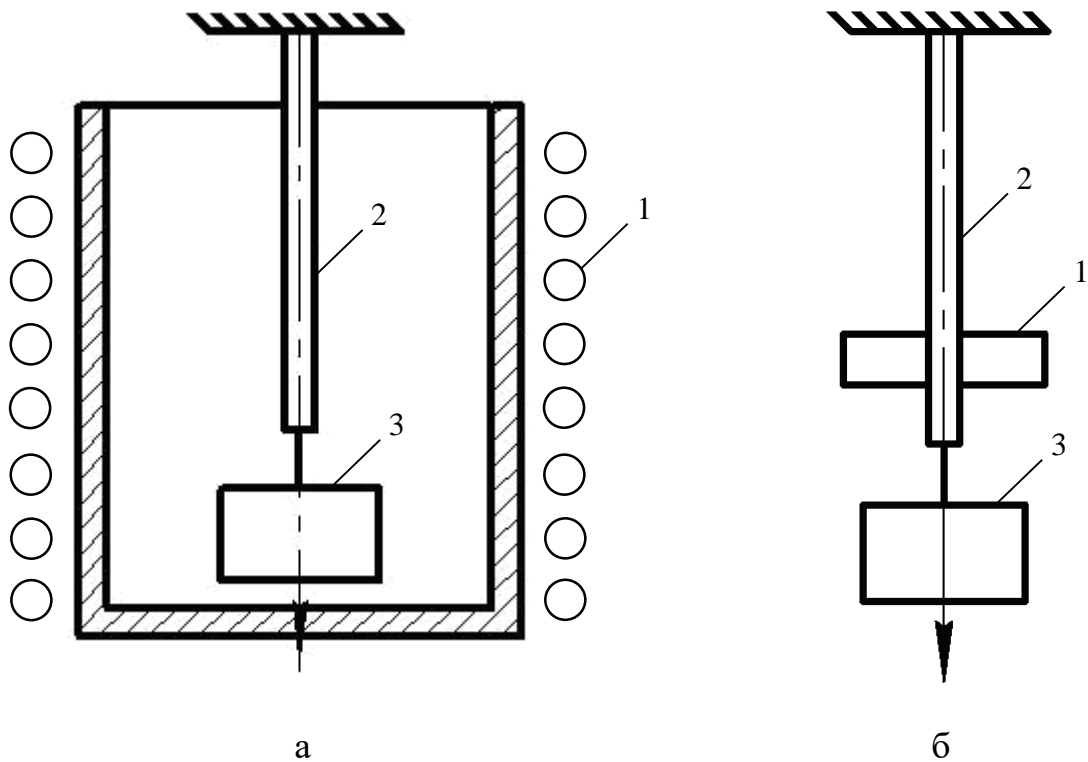
Использование альтернативного варианта – правки изгибом или поверхностным пластическим деформированием [32], с точки зрения обеспечения стабильности свойств, нерационально. После правки обеспечивается прямолинейность, но в поперечном сечении заготовки

остаточные технологические напряжения и деформации будут иметь разные значения по знаку. В дальнейшем, при снятии припуска, равновесное состояние нарушается при перераспределении напряжений и деформации, что ведет к короблению заготовки. Предложенная в [32] структура усовершенствованного технологического процесса включает в себя на начальном этапе термосиловую правку, а правка поверхностным пластическим деформированием является финишной операцией технологии, направленной на обеспечение размерной стабильности.

Изменение пластических деформаций и фиксация прямолинейности обеспечивается при выходе деформации заготовки в зону текучести. Осевые пластические деформации сопровождаются поперечными. При неравномерности осевых пластических деформаций продольный профиль заготовки также будет иметь погрешность, что приводит к неравномерности припуска вдоль оси заготовки.

Система правки в заготовки без внешних приводов нагружения с одновременным нагревом всей заготовки, показано на рисунке 1.5 а. Необходимые силы растяжения создается за счет подвешенного груза.

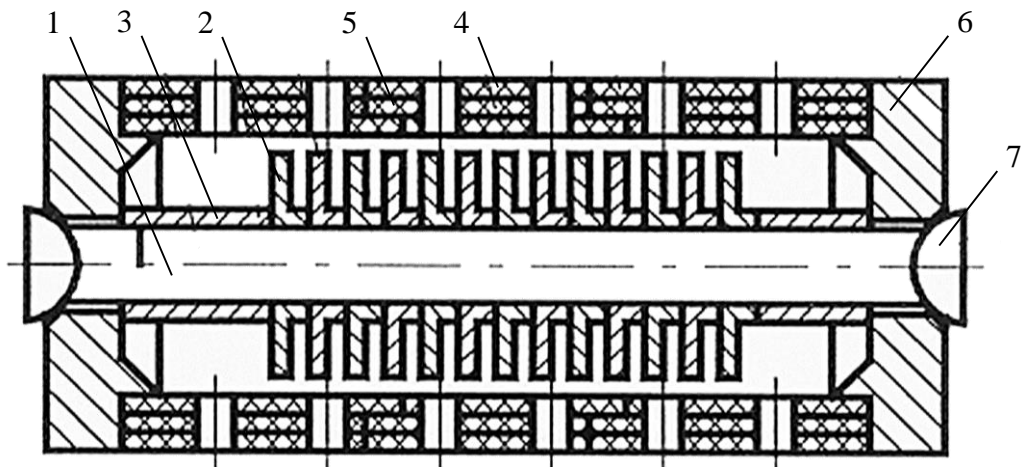
На рисунке 1.5 б, показана схема аналогичной операции, но растяжение выполняется в локальном сечении заготовки с местным нагревом обрабатываемого участка.



1 – нагреватель; 2 – заготовка; 3 – груз

Рисунок 1.5 – Схема правки растяжением с нагревом и массой

Одним из факторов, который влияет на результаты правки растяжением с нагревом, является температура заготовки. Ею можно управлять с помощью конвективного теплообмена, изменяя площадь поглощающих или излучающих тепло поверхностей в виде радиаторных дисков, которые устанавливают на заготовку, рисунок 1.6.



1 – заготовка; 2 – диски; 3 – дистанционные втулки; 4 – стапель;
5 – наполнитель; 6 – опоры; 7 – шайбы

Рисунок 1.6 – Стапель сборный и заготовка с дисками

Механизм нагружения в виде самого стапеля является базовым. За счет разницы температурных удлинений стапеля и заготовки возникает нагружающая сила. Но, могут использоваться и внешние приводы, что расширяет технологические возможности установки за счет выбора более гибких режимов нагружения и охлаждения, но повышает сложность оборудования и снижает надежность его работы. Он может оснащаться пассивными стабилизирующими элементами в виде пружин. Они будут ограничивать величину прикладываемых к заготовке сил и используются на этапе разгрузки.

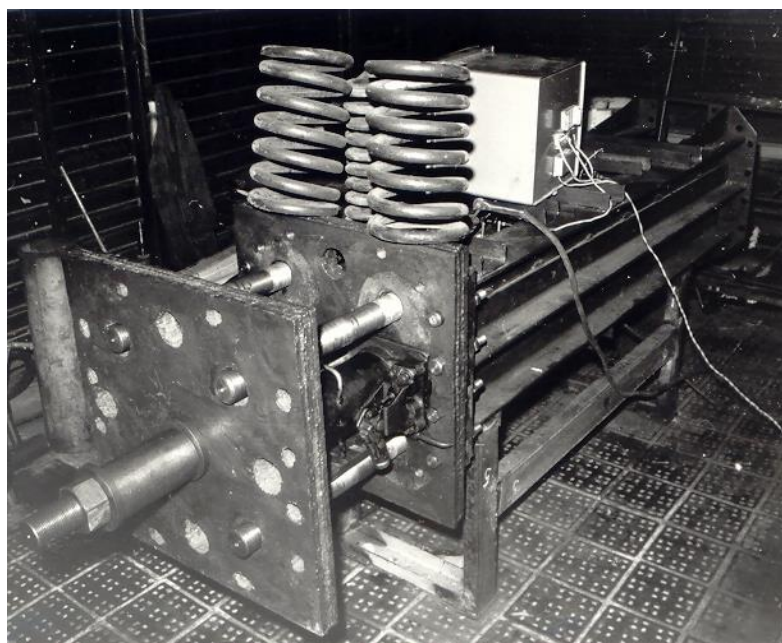
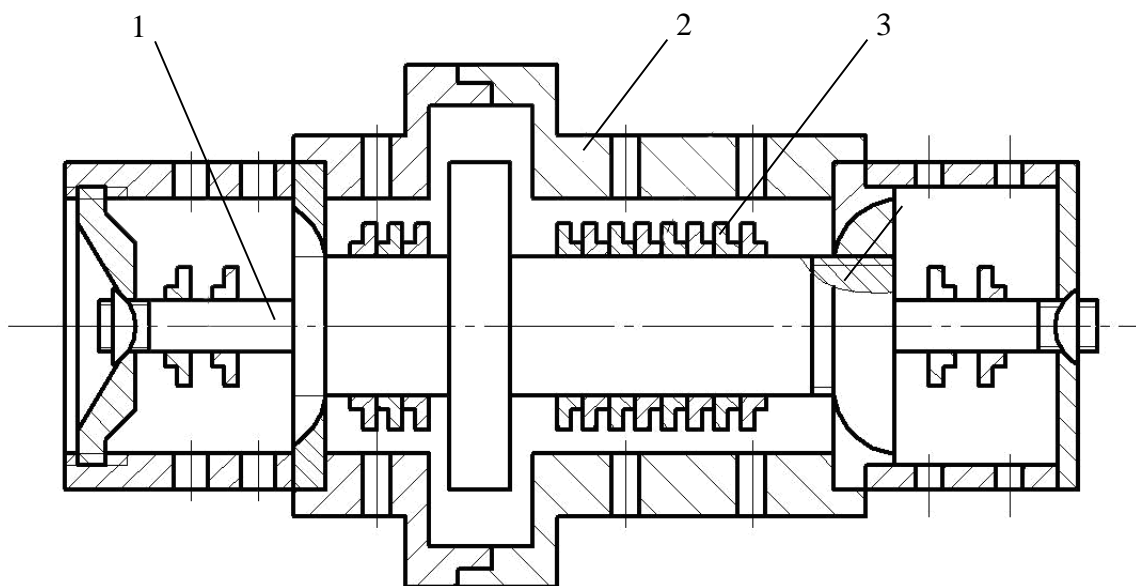


Рисунок 1.7 – Стабилизирующие элементы стапеля

Дополнительные системы нагружения могут работать на основе гидравлических или электромеханических приводов. Проводиться не по всей длине заготовки, а дифференцированно по ее участкам.

Если правка растяжением с нагревом применяется к ступенчатому заготовкам, необходимо выравнивать рабочие напряжения и деформацию по участкам различного сечения, рисунок 1.8. Для этого используют сборный стапель 2 из модулей различного диаметра и длины, которые соответствуют размерам участков заготовки 1. На заготовку устанавливаются также

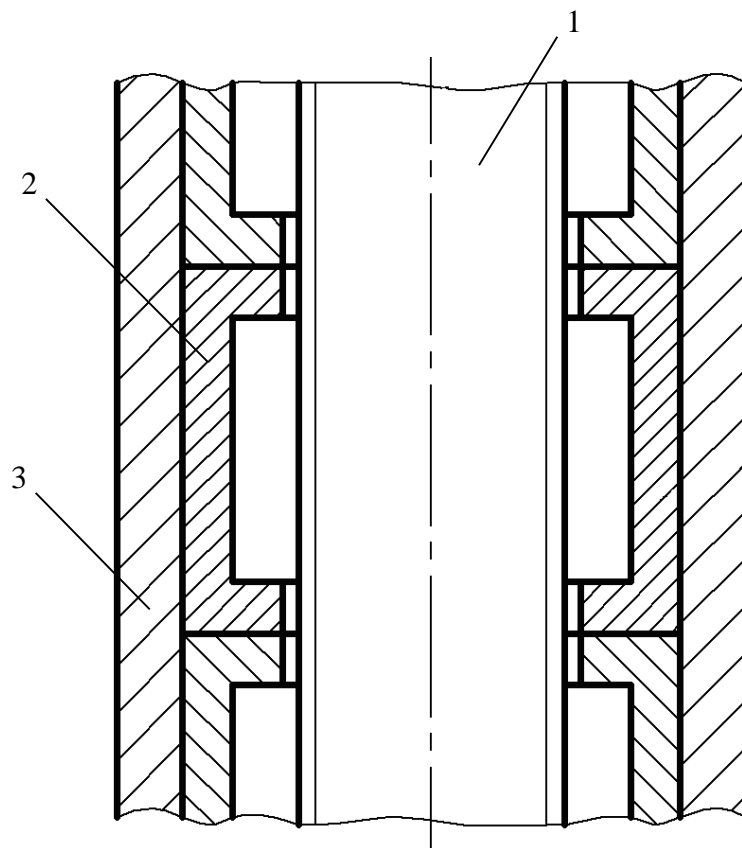
радиаторные диски 3. Эти кольца обеспечивают за счет управления температурным режимом выравнивание уровня напряжения и деформации по различным участкам вала.



1 – заготовка; 2 – стапель; 3 – диски

Рисунок 1.8 – Схема стапеля для обработки ступенчатых валов

При правке растяжением с нагревом можно формировать не только равномерные остаточные напряжения, но и знакопеременные или не направленные напряжения. Это положительно сказывается на стабильности геометрии вала. За счет того, что втулки на рисунке 1.9, которые накручиваются на заготовку, имеют разный коэффициент температурного расширения относительно заготовки, за счет этого создаются противоположные температурные деформации по участкам. Они чередуются по знаку: формируется последовательно напряжения сжатия и растяжения, рисунок 1.10.



1 – заготовка; 2 – втулки; 3 – стапель

Рисунок 1.9 – Схема установки с секционным стапелем

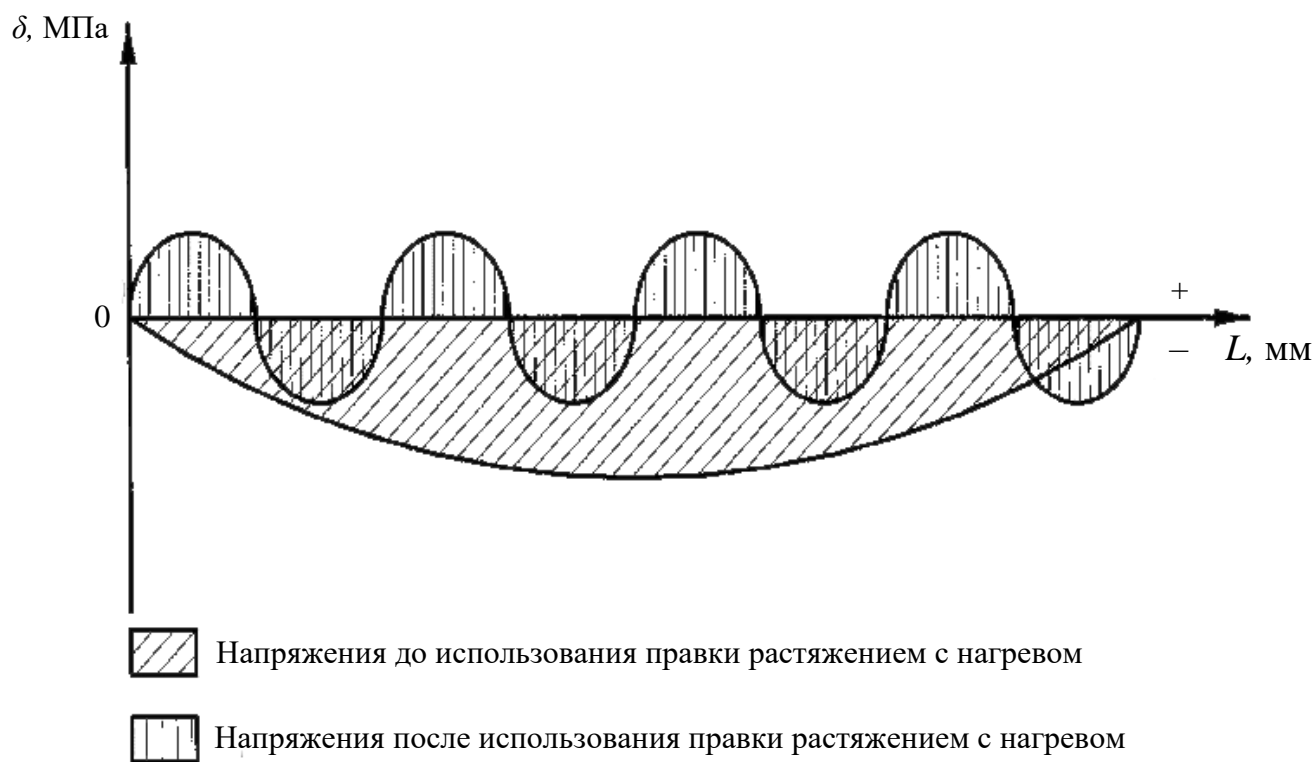


Рисунок 1.10 – Распределение напряжений по длине заготовки

1.4 Обоснование сущности правки растяжением с нагревом

Правка растяжением с нагревом проводится на режимах различных видов: нормализация, закалка, отпуск. Для базового способа данной технологии при формировании осевых деформаций на технологической операции закалке заготовку целесообразно закреплять в стапеле и нагревать совместно. За счет разницы температурных по длине заготовки и стапеля создается деформация, которая должна выйти за предел текучести для перестройки структуры материала и формирования новых остаточных напряжений, выровненных по длине заготовки.

Разница удлинений стапеля и заготовки:

$$\Delta l = \alpha_{cm}(T) \cdot T \cdot L_{cm} - \alpha_{dem}(T) \cdot T \cdot L_{dem}, \quad (1.1)$$

где $\alpha_{cm}(T), \alpha_{dem}(T)$ – коэффициенты температурного расширения, $1/^\circ\text{C}$;

T – рабочая температура, $^\circ\text{C}$;

L_{cm}, L_{dem} – длины стапеля и рабочей части заготовки, м.

Время охлаждения вала:

$$t_{вал} = \frac{F^0 \cdot d \cdot c \cdot \rho}{4\lambda}, \quad (1.2)$$

где F^0 – критерий Фурье;

d – диаметр вала, м;

ρ – плотность материала, $\text{кг}/\text{м}^3$;

c – коэффициент теплоемкости, $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$;

λ – коэффициент теплопроводности материала, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$.

Критерий Фурье:

$$F^0 = \frac{d \cdot t}{\delta^2}, \quad (1.3)$$

где t – время, с;

δ – радиус длинномерного изделия.

Для стапеля относительные температуры:

$$\frac{Q_c}{Q} = \Pi(B, F_o), \quad (1.4)$$

где B – критерий Био.

Он равен:

$$B_i = \frac{\gamma \cdot \delta}{\lambda_{\text{экв}}}, \quad (1.5)$$

где γ – коэффициент теплоотдачи от окружающей среды к поверхности тела стапеля, Вт/(м²·°C);

$\lambda_{\text{экв}}$ – эквивалентная теплопроводность стенки стапеля, Вт/(м·°C).

Базовые уравнения для расчета рабочих напряжений и усилий при правке растяжением с нагревом для создания деформации вала, при которых обеспечивается его пластическая деформация.

$$\sigma = \frac{P}{F} = E \cdot \alpha \cdot \Delta T > \sigma(T)_T, \quad (1.6)$$

$$P = E \cdot F \cdot \alpha \cdot \Delta T, \quad (1.7)$$

где E – модуль упругости, МПа;

α – коэффициент линейного расширения, м/°C;

ΔT – изменение температуры, °C;

F – площадь поперечного сечения, м²;

$\sigma(T)_T$ – температурно-зависимый предел текучести, МПа.

$$\Delta l = \alpha \cdot \Delta T \cdot l_o, \quad (1.8)$$

где Δl – удлинения заготовки, м; l_o – начальная длина заготовки, м.

$$\Delta l = \frac{P \cdot l_o}{EF}, \quad (1.9)$$

где l_o/EF – коэффициент жесткости заготовки, Н/м.

1.5 Технологические способы правки растяжением с нагревом

Основные задачи обработки заключается в комплексном повышении качества заготовок. В первую очередь это связано с обеспечением стабильности размеров и формы длинномерных осесимметричных валов.

Для этого необходимо обеспечивать формирование минимальных и равномерных осевых деформаций. Это связано с определенными механизмами протекания деформации. Они могут быть за счет межзеренного скольжения, а могут быть за счет изменения формы и размера зерен.

Для этого [16] предварительно устанавливают на заготовку фиксаторы, нагревают ее. Одновременно стапель охлаждают. После чего в него устанавливают заготовки с фиксаторами и проводят их совместный нагрев, при котором обеспечивается превышение предела текучести.

Установка заготовок с фиксаторами в стапель обеспечивает силовое замыкание и возможность приложения осевых нагрузок к заготовкам.

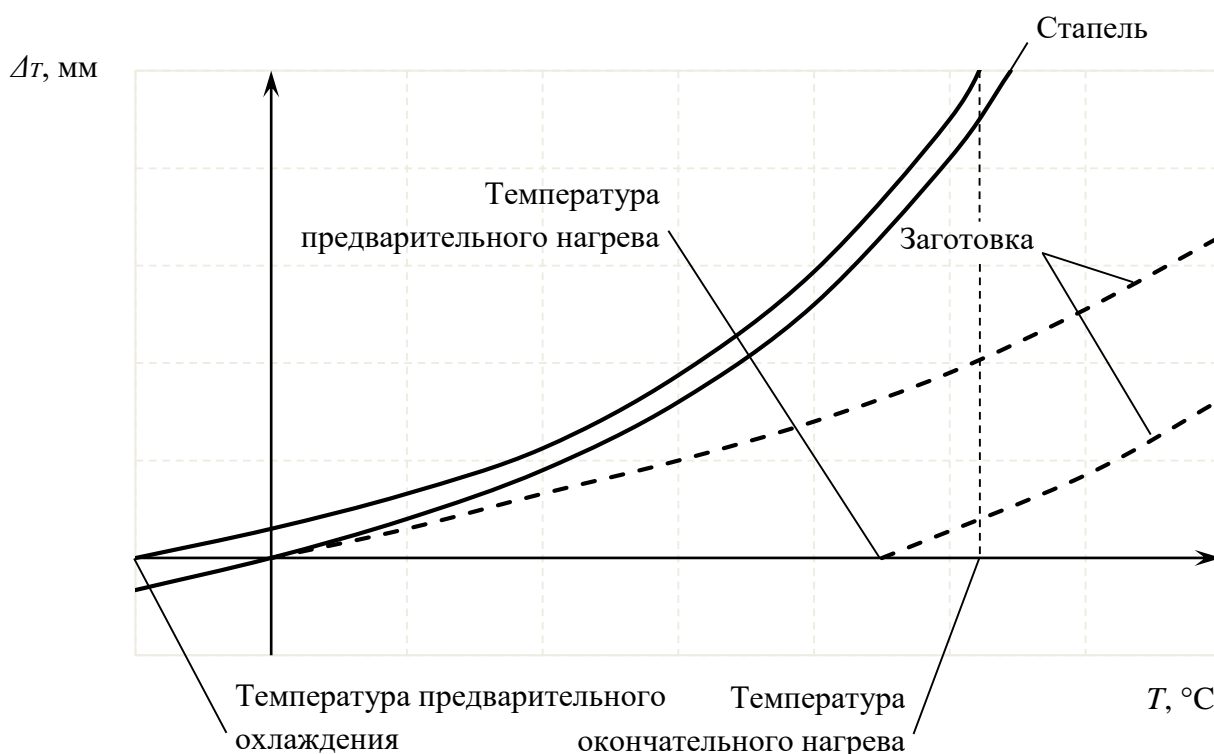


Рисунок 1.11 – Зависимости температурных удлинений заготовки и стапеля

Как видно из рисунка 1.11, предварительная манипуляции с температурным воздействием на стапель (охлаждения), заготовку (нагрев) увеличивают диапазон величины деформации за счет дополнительных температурных составляющих Δ_t .

Нагружение заготовки при правке растяжением с нагревом может вестись и при комплексном нагружении, когда кроме осевой деформации создаются крутящие моменты. Задачей комплексного нагружения является повышение эффективности правки растяжением с нагревом деталей, работающих в условиях действия осевых нагрузок и крутящих моментов [21] на рисунке 1.12.

За счет одновременного растяжения и кручения условие выхода в пластическую зону по сравнению с формулой (1.6) меняется:

$$\sigma_i = \Phi \varepsilon_T \sqrt{\varepsilon^2 + 3\gamma^2} \geq \sigma_T, \quad (1.10)$$

где σ_i – интенсивность напряжений, МПа;

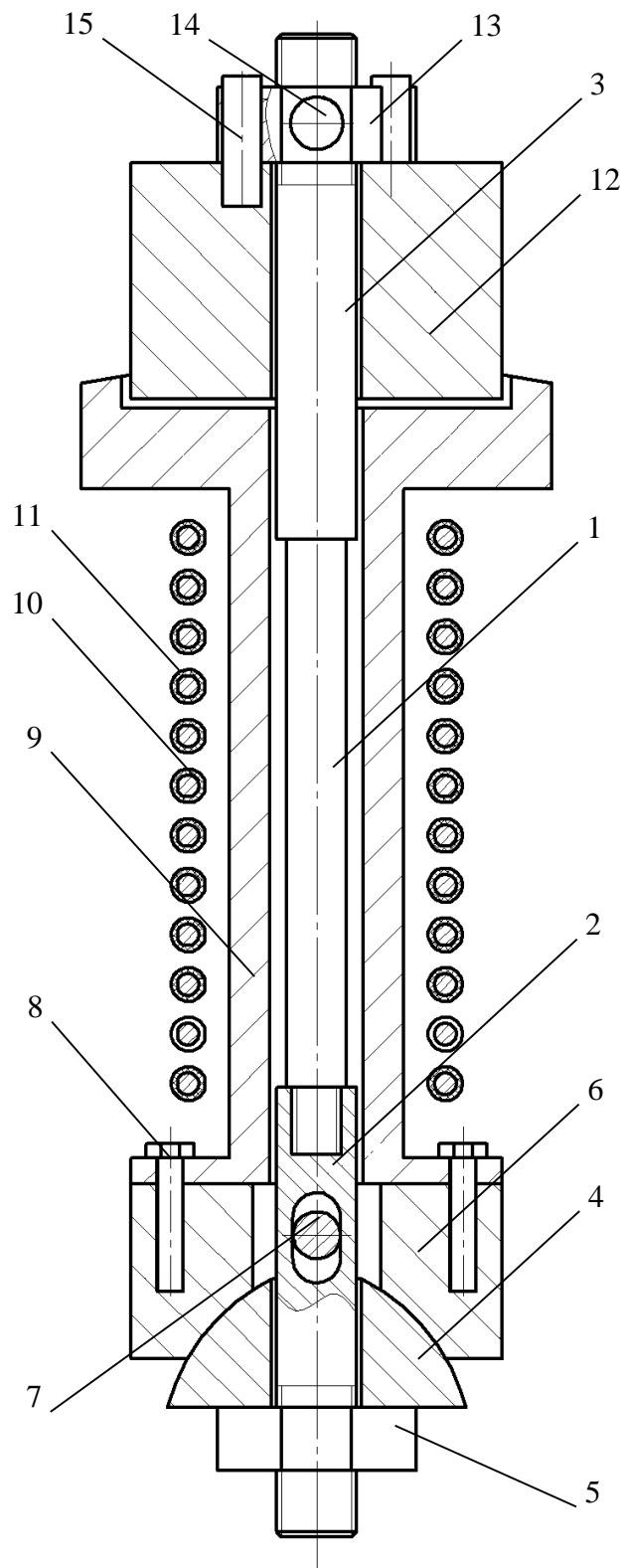
Φ – функция пластичности, МПа;

ε_T – относительная деформация, соответствующая пределу текучести при растяжении, %;

ε – относительная продольная деформация, %;

γ – деформация сдвига.

Составляющие деформации определяются с учетом параметров силовых направляющих элементов.



1 – заготовка; 2, 3 – фиксатор; 4 – шайба; 5, 13 – гайка; 6 – нижняя опора; 7 – поперечный стопор; 8 – винты; 9 – ступень; 10 – нагреватель; 11 – керамическая оболочка; 12 – поворотная опора; 14 – верхний стопор; 15 – фиксатор

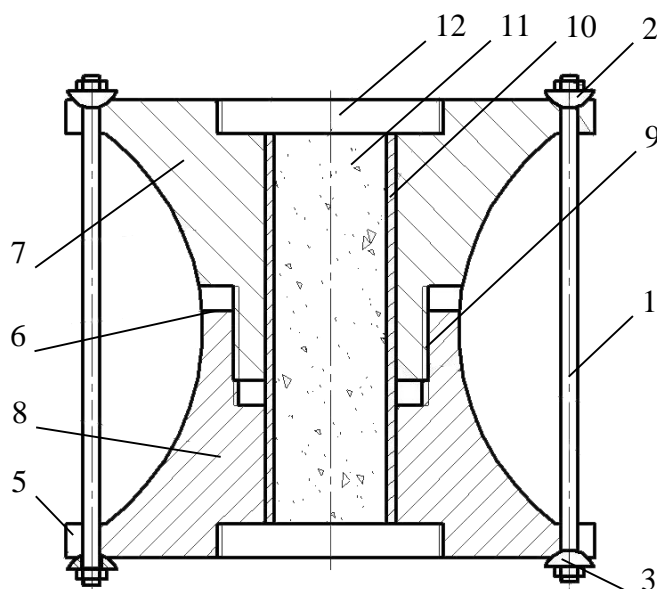
Рисунок 1.12 – Схема стапеля для комплексной обработки

По сравнению с базовым способом в такой установке за счет поворотной головки 12, фиксатора 7, который обеспечивает стопорение заготовки 1 в крутильном направлении, при осевом растяжении создает также скручивание.

Такая же схема обработки по нагружению может выполняться с использованием внешних приводов [44].

Возможно уменьшение силы деформирования за счет использования эффекта Баушингера при изменении знака прикладываемой силы. Такие схемы обработки являются более сложными и дорогостоящими. За счет использования отдельных приводов для осевого деформирования и скручивания можно осуществлять сложные циклы обработки заготовки. Системы нагрева позволяют обеспечивать адаптивный нагрев участков заготовки для выравнивания деформации по участкам вала.

Некоторые технические решения направлены на повышение производительности и снижение энергоемкости операции, а также расширения технологических возможностей при правке растяжением с нагревом [4, 5, 47].

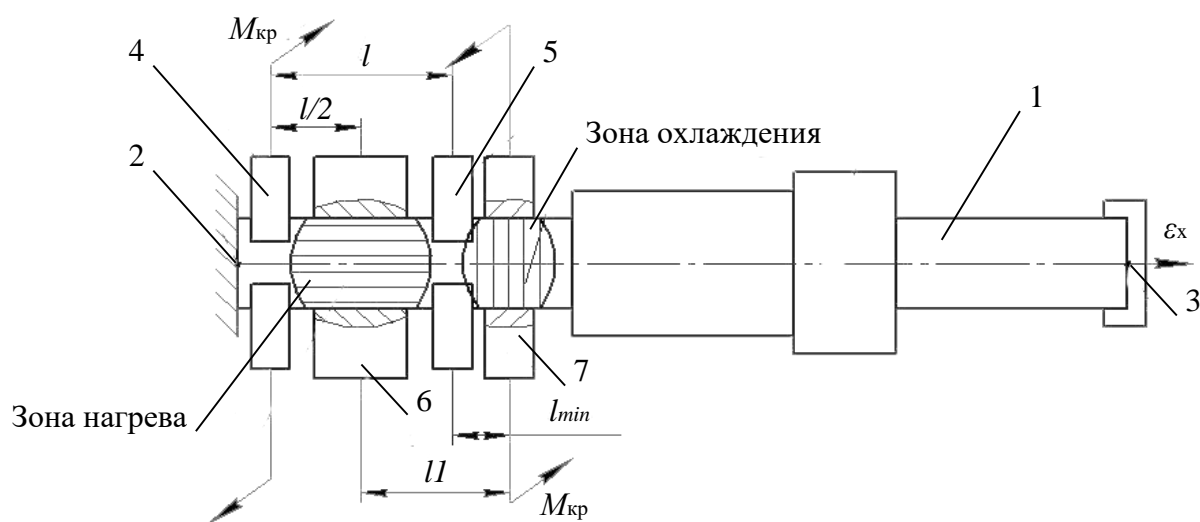


1 – заготовка; 2 – гайка; 3 – шайба; 5 – нижний стапель; 6 – зазор;
7 – верхний стапель; 8 – резьба; 10 – втулка; 11 – наполнитель; 12 – гайка

Рисунок 1.13 – Общий вид устройства для правки растяжением с нагревом

Особенность данного устройства в том, что стапель позволяет обрабатывать сразу большое количество заготовок. Сборная конструкция обеспечивает регулировку по длине для установки разных по габаритам заготовок.

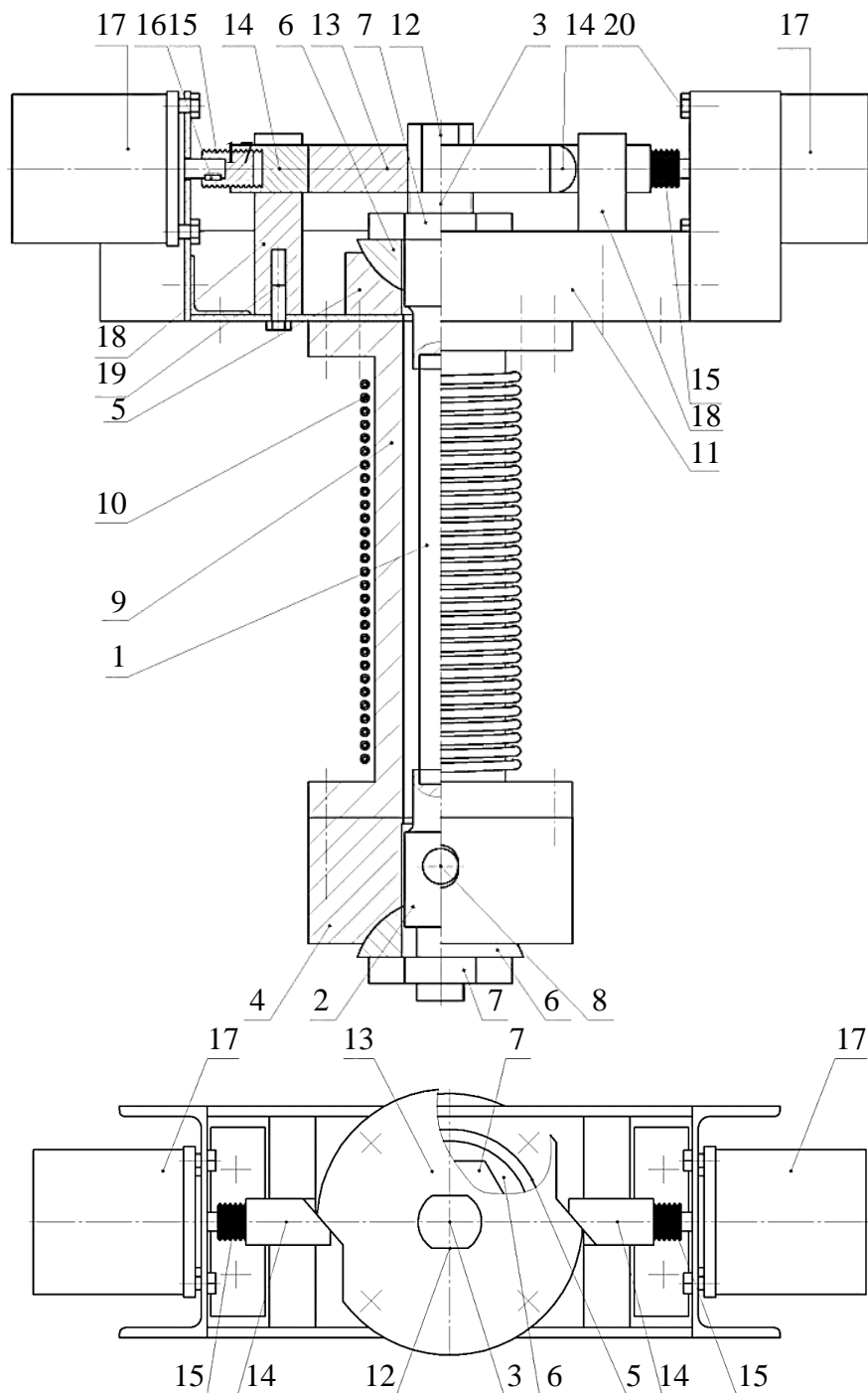
Для длинных ступенчатых заготовок может использоваться правка растяжением с нагревом с локальным местным нагревом, рисунок 1.14. Нагружение производится также по участкам и дополнительно может использоваться охлаждение. За счет скручивающих устройств 4 и 5 и локального нагревателя 6 можно изменять интенсивность напряжения по длине для разных по диаметру ступеней, выходя в зону текучести.



1 – заготовка ступенчатая; 2 – фиксатор неподвижный; 3 – фиксатор подвижный;
4, 5 – скручивающие элементы; 6 – нагреватель; 7 – охладитель

Рисунок 1.14 – Схема правки растяжением с нагревом с локальным деформированием

Небольшая модификация базовой для комплексного нагружения обеспечивает расширения технологических возможностей установки за счет дополнительного привода и механизма скручивания [46].



- 1 – заготовка; 2 – нижняя тяга; 3 – верхняя тяга; 4 – нижняя опорная крышка;
 5 – верхняя опорная крышка; 6 – сферическая шайба; 7 – гайка; 8 – ось;
 9 – стапель; 10 – нагревательный элемент; 11 – рама; 12 – лыски;
 13 – двухсторонний клин; 14 – клиновые призмы; 15 – ходовой винт; 16 – шпонка;
 17 – шаговые двигатели; 18 – направляющие; 19 – винты; 20 – винты

Рисунок 1.15 – Установка для комплексного нагружения с приводами

1.6 Технические трудности проведения правки растяжением с нагревом

Особенностью данной операции является необходимость учета значительных нагрузок, действующих в силовом контуре стапель-фиксаторы-заготовка. Чтобы не потерять работоспособность, необходимо, чтобы элементы установки не испытывали напряжений, превышающих предел текучести. Это также относится к базирующим элементам самой заготовки. Для фиксации могут использоваться резьбовые поверхности или канавки. Для решения задачи обеспечения надежности работы установки необходимо рассчитать напряжения с учетом температурной зависимости предела текучести для элементов силового контура, а также базирующих поверхностей заготовки.

Локализация нагрева на рабочей части вала между захватами обеспечивает необходимый уровень рабочих напряжений, при которых произойдет пластическая деформация с проработкой всего объема заготовки без повреждения несущих элементов установки и фиксаторов. Примеры расчета напряжений для таких деталей установки и заготовки показаны на рисунках 1.16-1.19. Расчеты выполнены методом конечных элементов.

Для обеспечения нормальной работоспособности установки необходимо провести проверочный расчет резьбовых захватов, штифтов на срез и опорных пальцев на изгиб.

Кроме этого проверки надо подвергать несущей стапель на устойчивость. Решением данной задачи линейной статики является единственное положение равновесия деформированной конструкции и относящиеся к нему внутренние усилия.

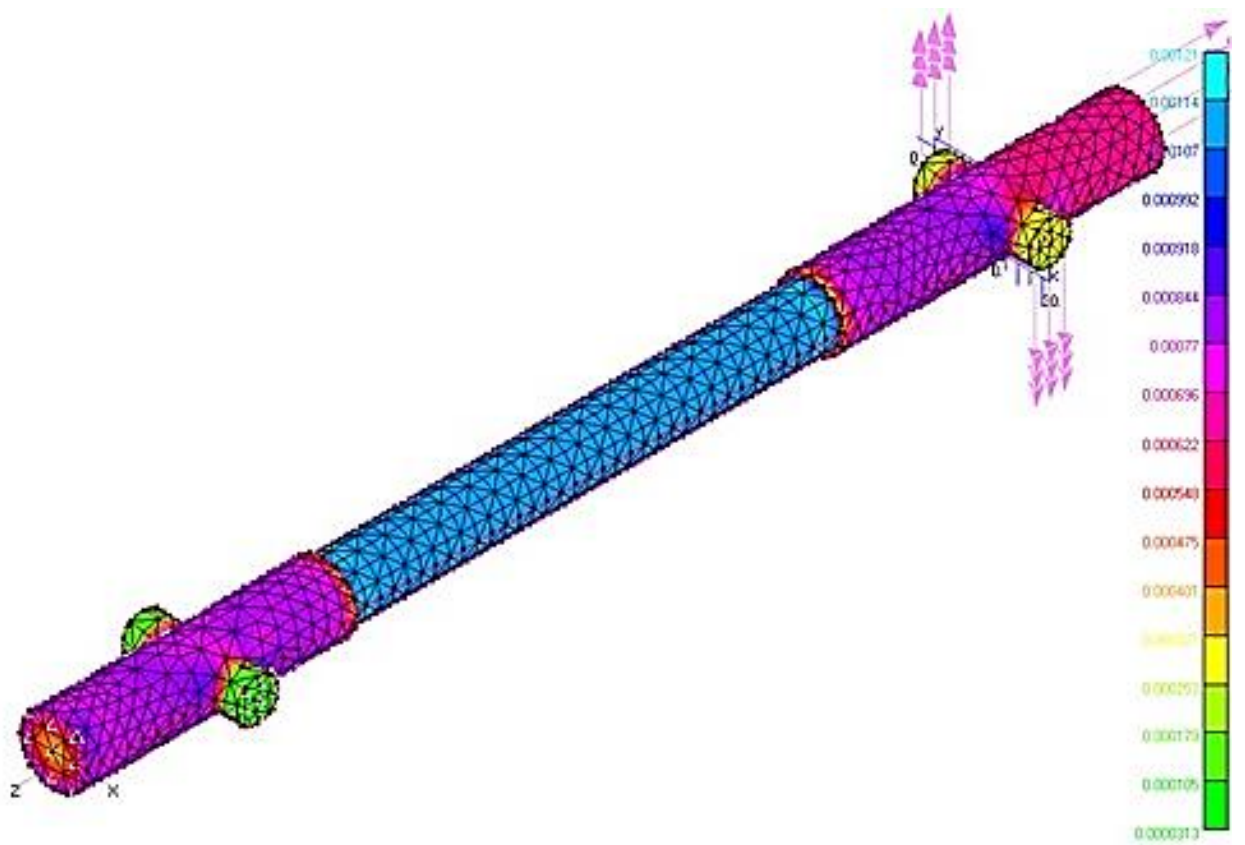


Рисунок 1.16 – Допустимые деформации хватных элементов и заготовки

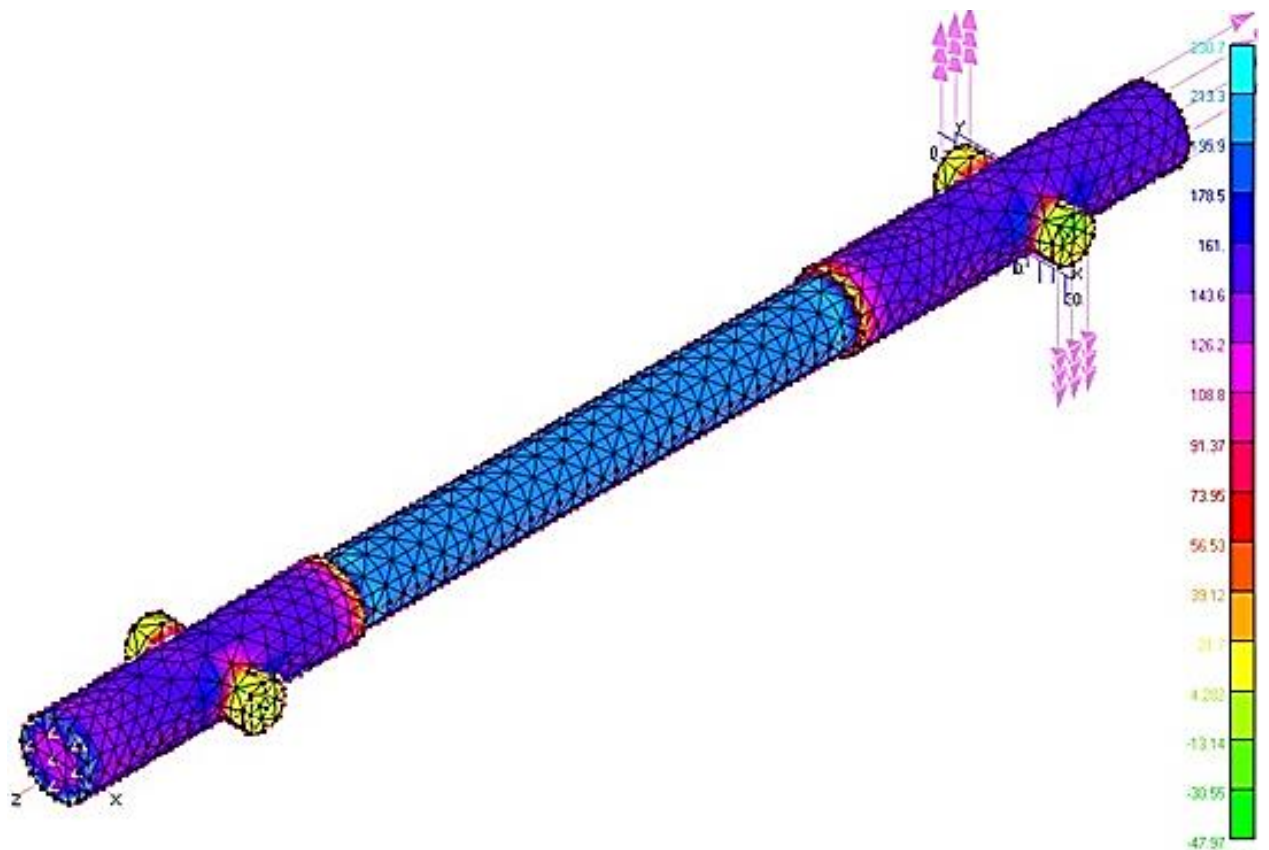


Рисунок 1.17 – Допустимые напряжения хватных элементов и заготовки

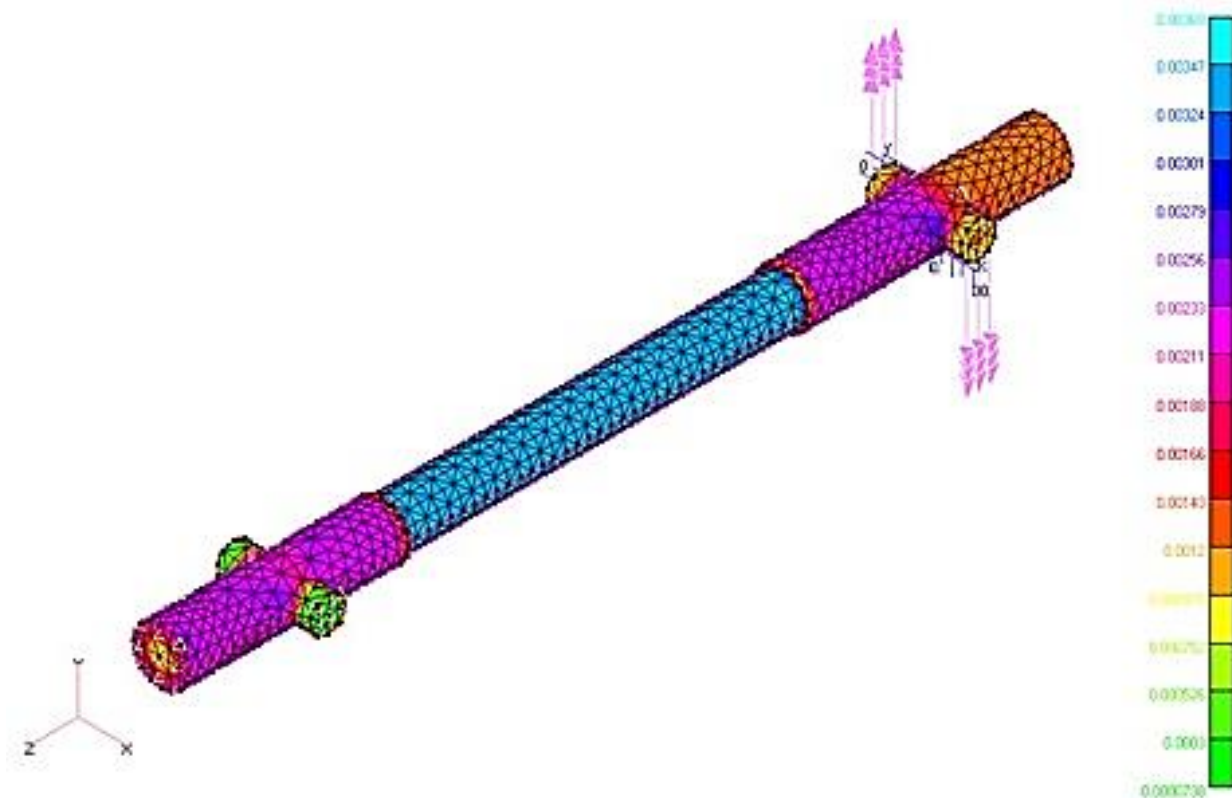


Рисунок 1.18 – Недопустимые деформации захватных элементов и заготовки

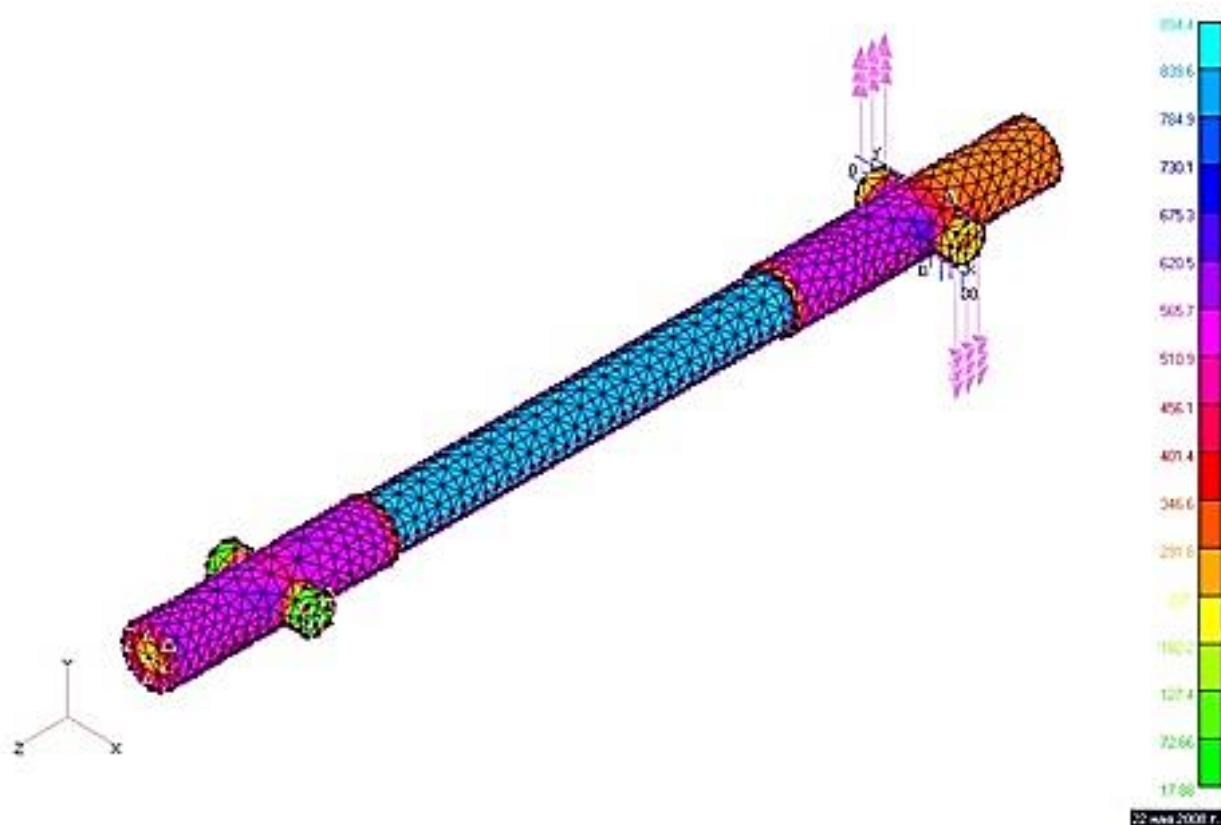


Рисунок 1.19 – Недопустимые напряжения захватных элементов и заготовки

Состояние равновесия упругой системы можно определить двумя параметрами – характерным перемещением f и параметром нагрузки p . В нашем примере f прогиб в центре стапеля, а p – величина сжимающей силы. В линейном анализе устойчивости для отыскания критического состояния используется статический метод. Линейный анализ устойчивости методом конечных элементов проводится в два этапа. На первом этапе решается задача линейной статики для конструкции, нагруженной пробным вектором $\{R_0\}$. Определяется статическая форма равновесия и соответствующее ей распределение внутренних усилий на элементах. На втором этапе вычисляется геометрическая матрица жесткости конструкции, соответствующая этим внутренним усилиям, и затем находятся соответствующие им формы потери устойчивости.

Деформация стапеля для модели из конечных элементов типа solid приведена на рисунке 1.20, где максимальное фактическое смещение от расчетной нагрузки 357000 Н составило 0,367 мм. Если учесть, что фактически нагрузка распределяется по площади, а в модели она прикладывалась к крайней линии, в реальности она будет еще меньше. Относительная величина деформации составляет от 370 мм, 0,00101%, что гораздо меньше уровня деформации, соответствующему пределу текучести. Потеря устойчивости происходит в случае нагружения, силой 1939200 Н, что на порядок больше нагрузок, возникающих при обработке, рисунок 1.21.

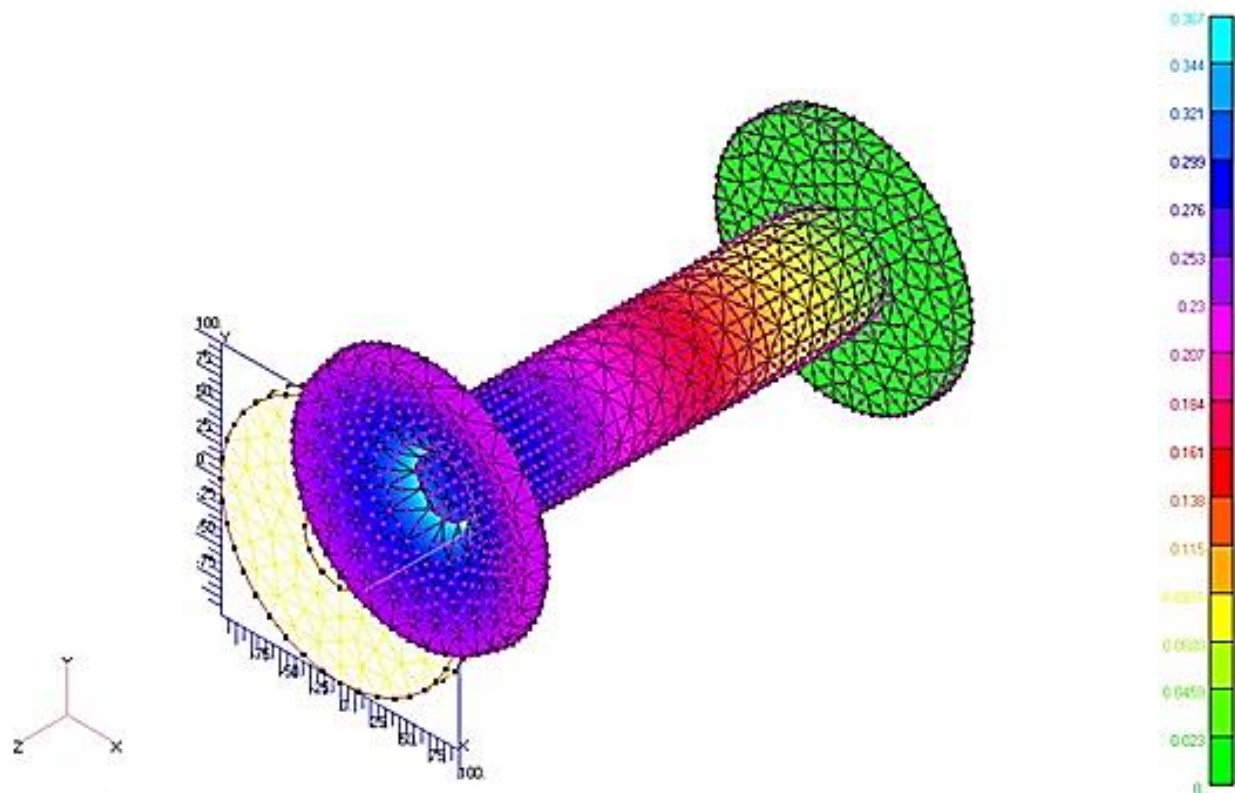


Рисунок 1.20 – Величина деформации ступеля от действия максимальной нагрузки

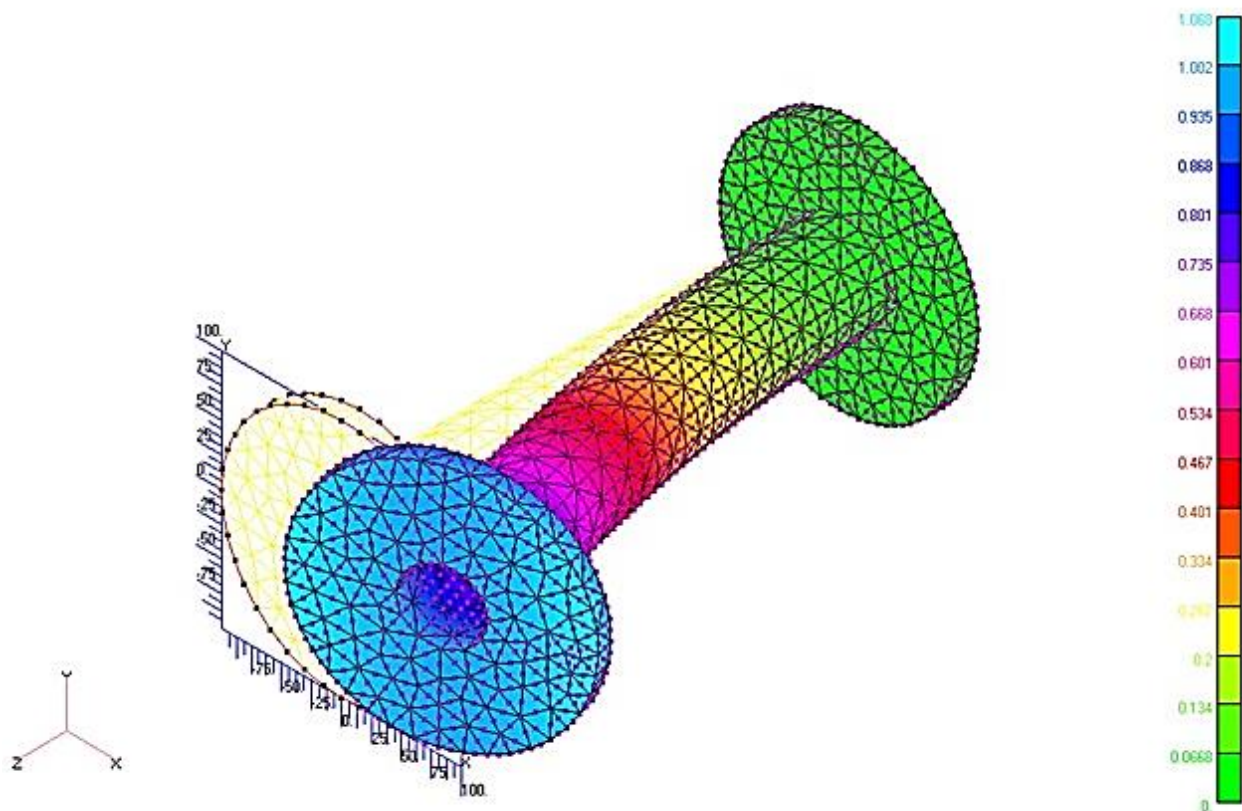


Рисунок 1.21 – Потеря устойчивости ступеля

1.7 Технические методы и способы контроля деформаций при правке растяжением с нагревом

Оптические методы и способы контроля деформаций быстро развивались в течение последних десяти-двадцати лет, что обусловлено высокими требованиями промышленности. Области применения оптических методов измерения включают контроль качества изготовления, проектирование пресс-форм, измерение напряжений/деформаций и т.д.

В этом разделе кратко представлены несколько методов оптического контроля, тесно связанных с техникой, используемой в настоящем проекте, включая компьютерное зрение. Методы, используемые в этом проекте, а именно цифровая корреляция изображений на основе компьютерного зрения (DIC), более подробно представлена в последующих разделах.

Компьютерное зрение представляет собой извлечение 3D-информации из изображений, снятых (часто недорогогими) камерами наиболее удобным способом. По сути, природный объект реконструируется исключительно на основе информации, имеющейся на изображениях его поверхности. Эти изображения могут быть сняты ручной видеокамерой или системой с несколькими камерами. Поскольку объем информации, содержащейся в изображениях, обычно невелик и потенциально неоднозначен, точность восстановления форм системами, основанными на компьютерном зрении, относительно невелика.

Области применения компьютерного зрения включают управление машинами (например, промышленными роботами [87, 91], автономными транспортными средствами [70, 114]), обнаружение событий (например, визуальное наблюдение [95, 134]), моделирование объектов (например, промышленный контроль [59], анализ медицинских изображений [128]), управление человеком, машинное взаимодействие (например, 3D-интерактивные игры [78, 79]) и т.д.

Определение формы по затенению [105, 174] является базовым методом, который использует информацию о распределении интенсивности рассеянного света по наклону поверхности образца. Этот метод очень чувствителен к условиям освещения.

Определение формы по фокусу [119] – это еще один метод, который использует взаимосвязь между расстоянием от объекта до камеры и глубиной резкости. Этот метод обычно используется для измерения шероховатости поверхности.

Стереозрение – самый популярный метод, который иногда называют “компьютерным зрением”. Этот метод использует две камеры для получения изображений 3D-объекта под разными углами обзора. По этим 2D-изображениям 3D-форма восстанавливается с помощью триангуляции [92]. Более точная и надежная триангуляция достигается, если анализируется более двух изображений с использованием более чем двух камер или одной видеокамеры, которая перемещается вокруг объекта [93]. Методы измерения формы при стереозрении были также адаптированы для измерения деформаций в экспериментальной механике, где метод цифровой корреляции изображений (DIC) [74] является примечательным вариантом.

2D-размерный DIC. Ранние версии DIC, начиная с 2D-версий, были созданы в 1980-х годах исследователями из области экспериментальной механики твердого тела [125]. В 2D DIC, [69, 96, 158, 168] на поверхности образца путем распыления, печати или химического процесса создается случайный узор в виде спеклов [139], поле деформации которого затем регистрируется одной цифровой камерой. Сравнивая полученные изображения рисунка до и после деформации с использованием метода корреляции изображений, можно вычислить перемещения в плоскости и их градиенты в интересующей области. Математическое описание метода корреляции изображений проиллюстрировано на рисунке 1.22.

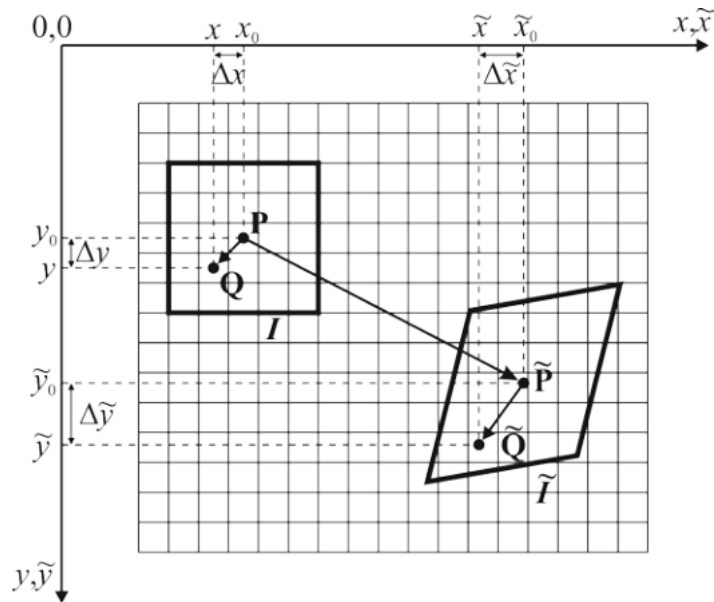


Рисунок 1.22 – Схема процесса деформации на эталонном изображении I и деформированном изображении \tilde{I}

Рассматривая подмножество пикселей изображения, центрированных в интересующей точке $\mathbf{P}(x_0, y_0)$, которая выбрана на эталонном изображении I (т.е. изображении недеформированного спекл-узора). Корреляция изображений – это задача нахождения того подмножества на деформированном изображении \tilde{I} , которое центрировано в соответствующей точке $\tilde{\mathbf{P}}(\tilde{x}_0, \tilde{y}_0)$. Вектор $\tilde{\mathbf{P}}\mathbf{P}$ таким образом, описывает смещение центра подмножества в плоскости, горизонтальное перемещение u и вертикальное перемещение v которого определяются как

$$\begin{aligned} u &= \tilde{x}_0 - x_0, \\ v &= \tilde{y}_0 - y_0, \end{aligned} \tag{1.11}$$

Если деформированное подмножество не изменяется по размеру и форме, смещения всех пикселей внутри подмножества идентичны, и, таким образом, компоненты смещения (u, v) центральной точки достаточны для представления всего подмножества. Однако, как правило, это не так, и термины пространственного градиента, которые описывают локальную

деформацию подмножества, должны быть включены в модель деформации. Теперь проблема сводится к сопоставлению произвольной точки $\mathbf{Q}(x, y)$ в эталонном подмножестве с соответствующей ей точкой $\tilde{\mathbf{Q}}(\tilde{x}, \tilde{y})$ в деформированном подмножестве. Взаимосвязь местоположения этих двух точек может быть выражена разложением в ряд Тейлора

$$\begin{aligned}\tilde{x} &= u + \frac{\partial u}{\partial x}(x - x_0) + \frac{\partial u}{\partial y}(y - y_0) + \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y}(x - x_0)(y - y_0) + \dots, \\ \tilde{y} &= v + \frac{\partial v}{\partial x}(x - x_0) + \frac{\partial v}{\partial y}(y - y_0) + \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y}(x - x_0)(y - y_0) + \dots,\end{aligned}\tag{1.12}$$

где $\frac{\partial u}{\partial x}$ и $\frac{\partial v}{\partial y}$ – условия расширения/сжатия;

$\frac{\partial v}{\partial x}$ и $\frac{\partial u}{\partial y}$ – условия сдвига/вращения;

$\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y}$ и $\frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y}$ – являются перспективными (или сужающимися)

слагаемыми в направлениях x и y .

Большинство моделей деформации для 2D DIC [69, 147, 148] обычно включают только первые 6 членов $\left\{ u, v, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y} \right\}$.

Предполагая, что эталонное подмножество достаточно мало, чтобы его локальная деформация была однородной, все компоненты деформации становятся постоянными в интересующей области, которые необходимо вычислить, чтобы найти точку соответствия $\tilde{\mathbf{Q}}(\tilde{x}, \tilde{y})$.

Сопоставление двух окон выполняется исключительно на основе значений интенсивности соответствующих им пикселей путем максимизации одного из следующих показателей корреляции [147]:

Величина различий в интенсивности:

$$C\left\{u, v, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}\right\} = 1 - \sum_{i=-m}^m \sum_{j=-n}^n |\tilde{I}(\tilde{x}_i, \tilde{y}_j) - I(x_i, y_j)| \quad (1.13)$$

Сумма квадратов разности интенсивностей:

$$C\left\{u, v, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}\right\} = 1 - \sum_{i=-m}^m \sum_{j=-n}^n [\tilde{I}(\tilde{x}_i, \tilde{y}_j) - I(x_i, y_j)]^2 \quad (1.14)$$

Перекрестная корреляция:

$$C\left\{u, v, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}\right\} = \sum_{i=-m}^m \sum_{j=-n}^n \tilde{I}(\tilde{x}_i, \tilde{y}_j) I(x_i, y_j) \quad (1.15)$$

Нормализованная взаимная корреляция:

$$C\left\{u, v, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}\right\} = \frac{\sum_{i=-m}^m \sum_{j=-n}^n \tilde{I}(\tilde{x}_i, \tilde{y}_j) I(x_i, y_j)}{\sqrt{\sum_{i=-m}^m \sum_{j=-n}^n [\tilde{I}(\tilde{x}_i, \tilde{y}_j)]^2} \sqrt{\sum_{i=-m}^m \sum_{j=-n}^n [I(x_i, y_j)]^2}} \quad (1.16)$$

где целые числа m и n определяют $(2m+1) \times (2n+1)$ размер справочного окна. Алгоритм нелинейной оптимизации, такой как Ньютон-Рафсон и Левенберг-Марквардт [127], используется для максимизации одного из этих показателей корреляции, и получаются параметры деформации.

В общем случае уравнение (1.12) приводит к точке (\tilde{x}, \tilde{y}) с нецелыми координатами. Следовательно, значение интенсивности этой точки должно быть рассчитано путем интерполяции по значениям интенсивности окружающих ее точек пикселей. Был использован широкий спектр интерполяционных функций, включая билинейные, бикубические и бикубическо-сплайновые [69, 147, 148].

3D-размерный DIC. Для определения всей деформации в плоскости и вне плоскости была разработана методика 3D DIC [140, 147], в которой для наблюдения за образцом с разных углов обзора используются по меньшей мере две камеры. Таким образом, проблема сопоставления изображений включает в себя корреляцию не только изображений для различных состояний деформации, полученных одной и той же камерой (а именно, временное согласование), но также изображений, полученных разными камерами для одних и тех же состояний деформации (а именно, стереосогласование). Типичная стратегия сопоставления перекрестных изображений показана на рисунке 1.23, при этом в процессе сопоставления изображений необходимо определить два типа деформации. Деформация образца вызвана нагрузками, оказываемыми на образец; в то время как перспективная деформация вызвана на записанных изображениях разницей в углах обзора камеры.

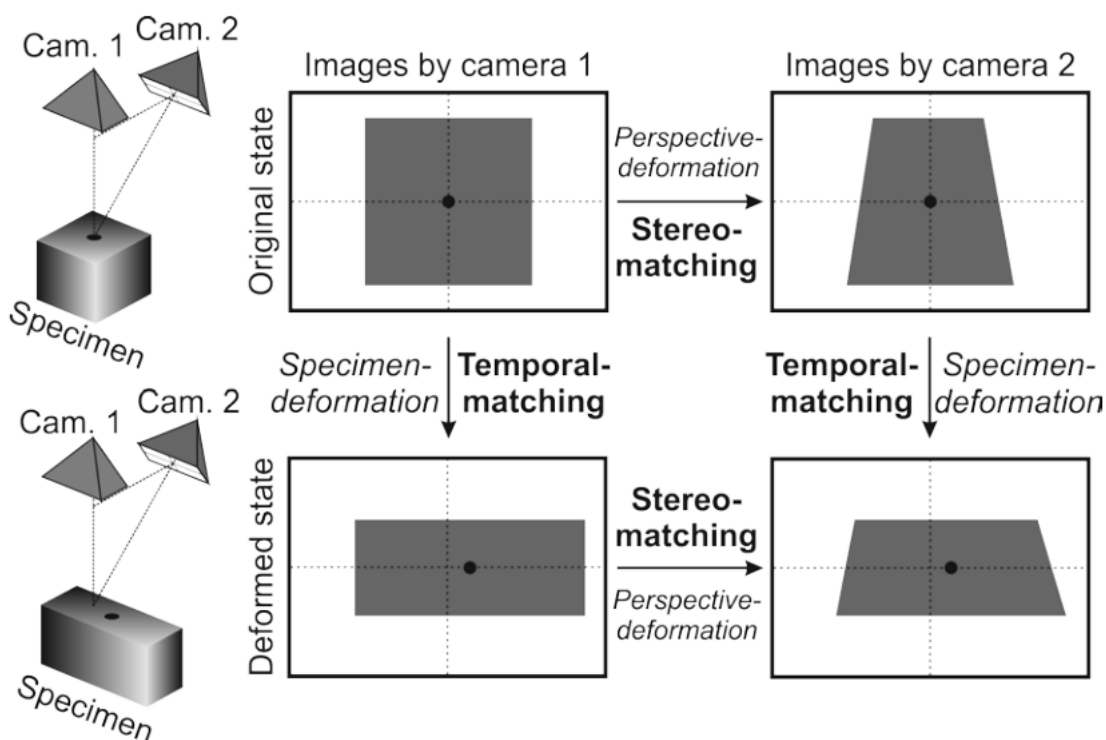


Рисунок 1.23 – Стратегия сопоставления изображений с технологией 3D DIC

Как и в стереозрении, согласование изображений остается большой проблемой для систем 3D DIC, поскольку помимо деформации образца, искажение перспективы приводит к значительному искажению соответствующих окон. Хелм и др. [94] представили метод обратной проекции, который компенсирует эти искажения путем сочетания стереосогласования с реконструкцией в процессе нелинейной оптимизации, аналогичном настройке пучка. Гарсия и др. [84] и Луо и др. [109] использовали методы сопоставления, аналогичные методам компьютерного зрения, в которых сопоставление разделено на более простые задачи. Используя алгоритмы Ньютона-Рафсона для корреляции изображений [69, 158], совпадения можно легко передавать с одного изображения на другое. Краткий обзор современных систем 3D DIC был дан Шрайером и др. [140].

Как только будет достигнуто полное соответствие изображения, для определения 3D-координат любой точки выборки для каждого состояния деформации можно использовать метод триангуляции, аналогичный используемому в стереозрении, при условии, что камеры были предварительно откалиброваны. 3D-смещения – это просто разница между 3D-координатами деформированной точки и точкой отсчета. Математическое описание триангуляции, основанной на модели камеры с точечным отверстием, а также процедура калибровки камеры приведены ниже.

Модель камеры с точечным отверстием. Объектив реальной камеры обычно состоит из группы линз для сбора света, отраженного от объекта. Однако для простоты эффективный объектив обычно моделируется в виде точечного отверстия с компенсацией искажений объектива.

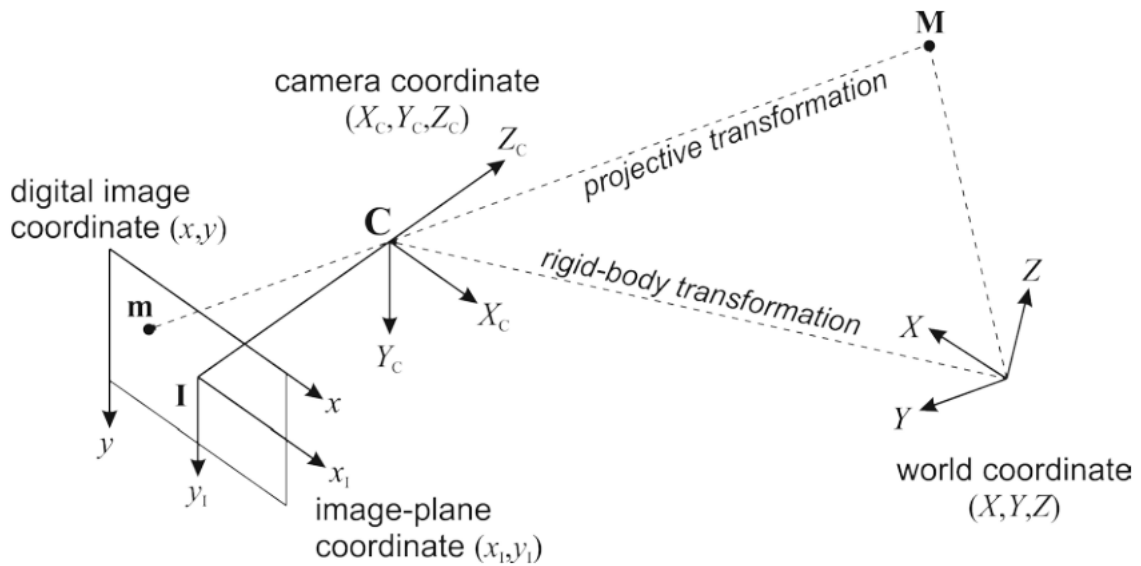


Рисунок 1.24 – Модель камеры с точечным отверстием и системами координат

Что касается рисунка 1.24, рассмотрим точку M на поверхности образца и в мировой координате (X, Y, Z) . Его координата может быть преобразована в координату камеры (X_c, Y_c, Z_c) с помощью преобразования твердого тела,

$$\begin{Bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{Bmatrix} = R \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix} + T \quad (1.17)$$

где R – матрица поворота 3 на 3;

T – вектор перемещения 3 на 1.

Точка M , находящаяся теперь в системе координат камеры, затем может быть спроецирована на точку m в координатах плоскости изображения (x_i, y_i) с помощью проективного преобразования,

$$\begin{Bmatrix} x_{I(ideal)} \\ y_{I(ideal)} \\ 1 \end{Bmatrix} = \frac{1}{Z_c} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{Bmatrix} \quad (1.18)$$

где f – эффективное фокусное расстояние, мм.

Можно видеть, что информация о глубине, относящаяся к Z_C , была потеряна после проективного преобразования. Результирующая координата идеальна при отсутствии искажений объектива. Реальные линзы всегда имеют искривления и несоосность компонентов, которые соответственно приводят к радиальным и тангенциальным искажениям изображений [156, 168]. Для современных объективов для получения точной модели обычно достаточно только первого слагаемого радиального искажения. Настройка координаты захваченного изображения с учетом искажений объектива приведена в [101, 110, 156].

$$\begin{aligned}x_{I(dist)} &= [1 + k(x_{I(ideal)}^2 + y_{I(ideal)}^2)]x_{I(ideal)}, \\y_{I(dist)} &= [1 + k(x_{I(ideal)}^2 + y_{I(ideal)}^2)]y_{I(ideal)},\end{aligned}\tag{1.19}$$

где k – коэффициент искажения объектива;

$(x_{I(dist)}, y_{I(dist)})$ – координата изображения после коррекции искажения объектива.

Поскольку цифровое изображение представляет собой дискретный набор пикселей (или элементов изображения) с опорной координатой в верхнем левом углу, точка изображения m представлена в координате цифрового изображения следующим образом

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/s_x & 0 & c_x \\ 0 & 1/s_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_{I(dist)} \\ y_{I(dist)} \\ 1 \end{Bmatrix}\tag{1.20}$$

где s_x и s_y – физический размер пикселя в направлении x и y соответственно, мм/пиксель;

c_x и c_y – представляют положение главной точки \mathbf{I} относительно верхнего левого угла, пиксель.

Уравнений (1.17)-(1.20) достаточно для отображения точки объекта в мировых координатах в точку в координатах цифрового изображения, используя параметры камеры $\{R, T, f, s_x, s_y, c_x, c_y, k\}$. Первые два параметра известны как внешние параметры, поскольку они непосредственно не участвуют в формировании изображения внутри камеры, а последние шесть параметров называются внутренними параметрами.

Когда коэффициент искажения объектива k в уравнении (1.19) пренебрежимо мал, отображение из реальной точки \mathbf{M} в точку \mathbf{m} изображения становится линейным. Уравнения (1.17)-(1.20), таким образом, могут быть объединены в виде,

$$m = K[R|T]M \quad (1.21)$$

где

$$m = \lambda \{x, y, 1\}^T \quad (1.22)$$

$$M = \{X, Y, Z, 1\}^T \quad (1.23)$$

$$K = \begin{bmatrix} f/s_x & 0 & c_x \\ 0 & f/s_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.24)$$

$$[R|T] = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & T_1 \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & T_2 \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & T_3 \end{bmatrix} \quad (1.25)$$

где λ – является произвольной масштабирующей константой.

Калибровка камеры. Калибровка – это процесс определения всех внутренних и внешних параметров, присутствующих в уравнении (1.21). Чтобы сделать это, необходимо использовать эталонный артефакт, дающий

предварительные знания о 3D-координатах. В ранней работе над 3D DIC исследователи использовали этапы точной трансляции для задания смещения изображения и оценивали параметры камеры как наилучшим образом соответствующие заданным и измеренным смещениям изображения [109, 110]. В последнее время многие авторы использовали калибровочную сетку с точно известным размером, расположенную в различных положениях в полях обзора камер, и определяли параметры камеры как наилучшим образом соответствующие спроецированным и измеренным изображениям сетки [84, 155]. Этот метод очень универсален, поскольку не требуется никаких физических измерений, а настройка камеры не ограничена до тех пор, пока камеры могут наблюдать общую область на образце.

На первом этапе процесса калибровки каждая камера калибруется отдельно. Мировая система координат прикреплена к крайнему углу шахматной доски, как показано на рисунке 1.25.

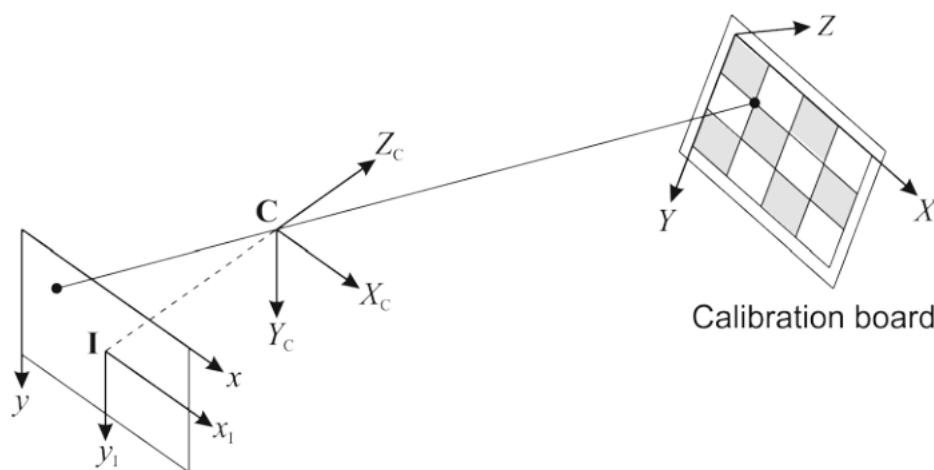


Рисунок 1.25 – Калибровочная шахматная доска, определенная в системе координат камеры

Таким образом, Z -координаты всех углов равны нулю, и уравнение (1.21) можно упростить до:

$$\lambda \begin{Bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{Bmatrix} = K \begin{bmatrix} R_1 & R_2 & T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{Bmatrix} = H \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (1.26)$$

где $R_i = \{R_{1i}, R_{2i}, R_{3i}\}^T$. Исходя из положений углов, обнаруженных на изображениях, матрица отображения H может быть оценена с использованием критерия максимального правдоподобия для минимизации ошибки метрики [156, 175],

$$H = \arg \min \sum_{q=1}^{N_q} \sum_{r=1}^{N_r} \|m^{(q,r)} - \tilde{m}^{(q,r)} H\|^2 \quad (1.27)$$

где $m^{(q,r)}$ – координата цифрового изображения угла r , обнаруженного на захваченном изображении q ;

$\tilde{m}^{(q,r)}$ – координата цифрового изображения соответствующего угла на калибровочной доске, спроецированная обратно на изображение с помощью уравнения (1.21);

N_q – количество изображений;

N_r – количество выбранных углов.

Затем можно использовать матрицу H для расчета всех внутренних и внешних параметров [175]. Эти оценочные параметры вместе с коэффициентом дисторсии объектива затем оптимизируются с использованием алгоритма наискорейшего спуска [127].

На втором этапе два отдельных набора параметров камеры, относящихся к одной и той же калибровочной плате, снова оптимизируются для обеспечения согласованности. Внешние параметры, R и T , теперь определяются как относительное перемещение (т.е. положения) и относительный поворот (т.е. позы) камер соответственно.

Триангуляция. Триангуляция – это обратная задача процесса проецирования, описываемого моделью камеры в уравнении (1.21). При

условии, что (i) камеры были откалиброваны таким образом, что внутренняя матрица K и внешние матрицы R и T известны, и что (ii) соответствие точек изображения m установлено с использованием метода корреляции изображений, точка объекта M может быть определена явно.

Из-за шума 3D-координаты, вычисленные методом линейной триангуляции, могут иметь метрическую ошибку. Эта ошибка может быть сведена к минимуму с помощью нелинейной схемы триангуляции. Задача минимизации формулируется в общей форме как

$$M = \arg \min \left(\|m_{I(1)} - \Phi_{(1)}(M)\|_{(1)} + \|m_{I(2)} - \Phi_{(2)}(M)\|_{(2)} \right) \quad (1.28)$$

где M – 3D-координата, которую необходимо найти;

$m_{I(1)}$ – координата точки на изображении с камеры 1;

$m_{I(2)}$ – координата соответствующей точки на изображении с камеры 2;

Φ – оператор, представляющий все уравнения модели камеры (т.е., уравнения (1.17)-(1.20)).

Алгоритм Левенберга-Марквардта обычно используется для решения этой задачи нелинейной оптимизации, где в качестве начального предположения используется трехмерная координата, предсказанная линейной триангуляцией из уравнения (1.21).

Применение 3D DIC. 3D-форма DIC имеет очень широкий спектр применений, включая тестирование материалов, оценку прочности, проверку повреждений и т.д. Она, по сути, охватывает все области применения 2D DIC. Луо и др. [110] применили свой метод для измерения поля деформации образца с трещинами при нагружении по режиму II. Гарсия и др. [84] применили свой метод к обработке металлов давлением, при которой деформация является большой и сильно нелинейной. Петерс и др. [126] измерили деформацию композитного цилиндра, находящегося под

внутренним давлением. Аналогичным образом, Мэн и др. [116] исследовали деформацию сосуда из волокнистого композита, используя свой так называемый метод цифровой спекл-корреляции.

За последние десять-двадцать лет многие методы 3D DIC были коммерциализированы. Системы способны к автоматической калибровке с использованием метода компьютерного зрения, представленного выше, и имеют удобные для пользователя интерфейсы. Некоторые коммерческие системы оснащены высокоскоростными камерами для динамических измерений. Наиболее популярными продуктами могут быть VIC-3D от Correlated Solutions Inc. (с заявленной точностью деформации до 0,05%), ARAMIS [86] от GOM GmbH (с заявленной точностью деформации до 0,01%) и Q-400 [75] от Dantec Ettemeyer GmbH (с заявленной точностью деформации до 0,01% и точностью смещения до 0,01 пикселя).

Точность методов 3D DIC часто указывается по-разному и, соответственно, с разными значениями. В то время как некоторые авторы проверяли свои методы с помощью предопределенных перемещений твердого образца в плоскости и вне плоскости [62, 84, 101, 149], другие проводили простые эксперименты по изгибу пластины или оболочки и сравнивали свои измерения с теоретическими предсказаниями [109] или с точечными измерениями [115, 116]. Согласно Кан-Джеттеру и Чу [101], их перемещения в плоскости имеют средний процент погрешности -0,67% при стандартном отклонении 2,91% (для перемещений от 4,4 мм до 10,8 мм), а их перемещения вне плоскости имеют средний процент погрешности -0,79% при стандартном отклонении 2,91%. 4,53% (при смещениях от 3,4 мм до 9,2 мм). Синнергрэн и Съедаль [149] сообщили о стандартных отклонениях небольших смещений (менее 0,50 мм) всего в 0,01 пикселя для компонентов в плоскости и 0,06 пикселя для компонентов вне плоскости. Беккер и др. [62] провели тест на перемещение в плоскости (с предписанными перемещениями до 50 мм) и сообщили об ошибках смещения менее 0,02 пикселя. Гарсия и др. [84] заявили о точности в 0,01 пикселя (кроме того, точность измерения

формы составляла 1 часть на 50000 размера объекта). Турнас и др. [155] сообщили о точности порядка 0,1 мкм при размере объекта 30 см и расстоянии объект-камера 30 см.

По сравнению с методом электронной спекл-интерферометрии (ESPI) [129], который является зрелым и популярным при структурном тестировании, 3D DIC обычно обладает гораздо более низкой чувствительностью измерений. Это было показано экспериментальным сравнением, проведенным в Dantec Dynamics GmbH [75].

Выводы по главе 1

Рассмотрена сущность и особенности одного из ключевых этапов изготовления мало жестких осесимметричных деталей типа «вал» - заготовительного и необходимость применения методов правки.

Выполнен патентно-литературный обзор существующих к данному моменту технологий правки, правку изгибом, накаткой, растяжением с нагревом и без, изделий круглого профиля, включая валы, трубы, в рамках научных изысканий ученых. Рассматриваются устройства с простым и сложным – комбинированным нагружением вала, схемы правок, реализуемых разными типами правильных машин.

На основе проведенного анализа обоснована схема правки растяжением с нагревом. Даны теоретические основы обеспечения эффективности данного технологического метода, который направлен на формирование геометрии заготовки и заданное напряженно-деформированное состояние с целью обеспечения стабильности размеров и формы в последующие этапы изготовления.

ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НА ОСНОВЕ РЕОЛОГИЧЕСКОГО ПОДХОДА

2.1 Базовые формулы для расчета деформаций при правке растяжением с нагревом

Базовая формула расчета напряжений и деформаций:

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (2.1)$$

где E – модуль упругости, МПа;

ε – относительная деформация, %.

Если при правке растяжением с нагревом используется нагрев, удлинение вала:

$$\Delta l_{\Sigma} = \Delta l_{\text{нк}} + \Delta l_{\text{T}} + \Delta l_{\varepsilon}, \quad (2.2)$$

где $\Delta l_{\text{нк}}$ – удлинение заготовки, необходимое для компенсации исходного коробления вала, мм;

Δl_{T} – удлинение из-за температурного расширения, мм;

Δl_{ε} – удлинение силовое для формирования структуры материала, мм.

Разница температурных коэффициентов расширения стапеля и заготовки, а также разница их объемов, условий теплообмена между собой, а также с окружающей средой, приводит к разнице температурные удлинения и, соответственно, возникновению нагружающей силы из-за этой разницы. На рисунке 2.1 показаны скорости охлаждения стапеля и заготовки и возникающие из-за этого напряжения [6, 8].

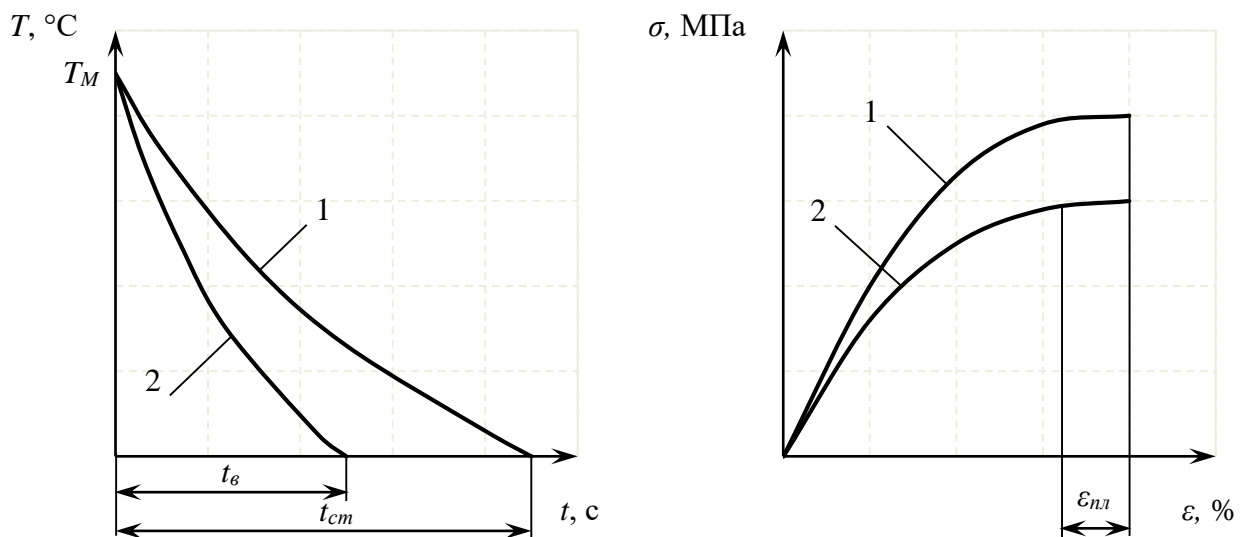


Рисунок 2.1 – Температура на этапе охлаждения при правке растяжением с нагревом для стапеля 1 и заготовки 2

При растяжении:

$$\sigma_p = (l_{CT} \alpha_{CT} \Delta T_{CT} - l_B \alpha_B \Delta T_B) Ek / (l_B F_B), \quad (2.3)$$

где α_{CT}, α_B – коэф. термического расширения стапеля и вала, K^{-1} ;

$\Delta T_{CT}, \Delta T_B$ – разность температур охлаждения стапеля и вала от исходной рабочей температуры термообработки, $^{\circ}C$;

l_{CT}, l_B – длина стапеля и вала, мм;

F_B – площадь сечения вала, mm^2 .

Коэффициент термического расширения стапеля и вала с учетом их температурной зависимости:

$$\alpha_T = \alpha(T^{\circ}) + \Delta T d\alpha / dT, \quad (2.4)$$

где $\alpha(T^{\circ})$ – коэффициент термического расширения при начальной температуре (при охлаждении – температура термообработки);

$d\alpha / dT$ – скорость изменения коэффициента термического расширения от температуры.

В целом деформации вала находят как:

$$\varepsilon_{\Sigma} = \varepsilon_y + \varepsilon_{пл} + \varepsilon_T, \quad (2.5)$$

где ε_y – упругая деформация, %;

$\varepsilon_{пл}$ – пластическая деформация, %;

ε_T – температурная деформация, %.

Уровень новых технологических остаточных напряжений определяется на этапе силового контура стапель-заготовка:

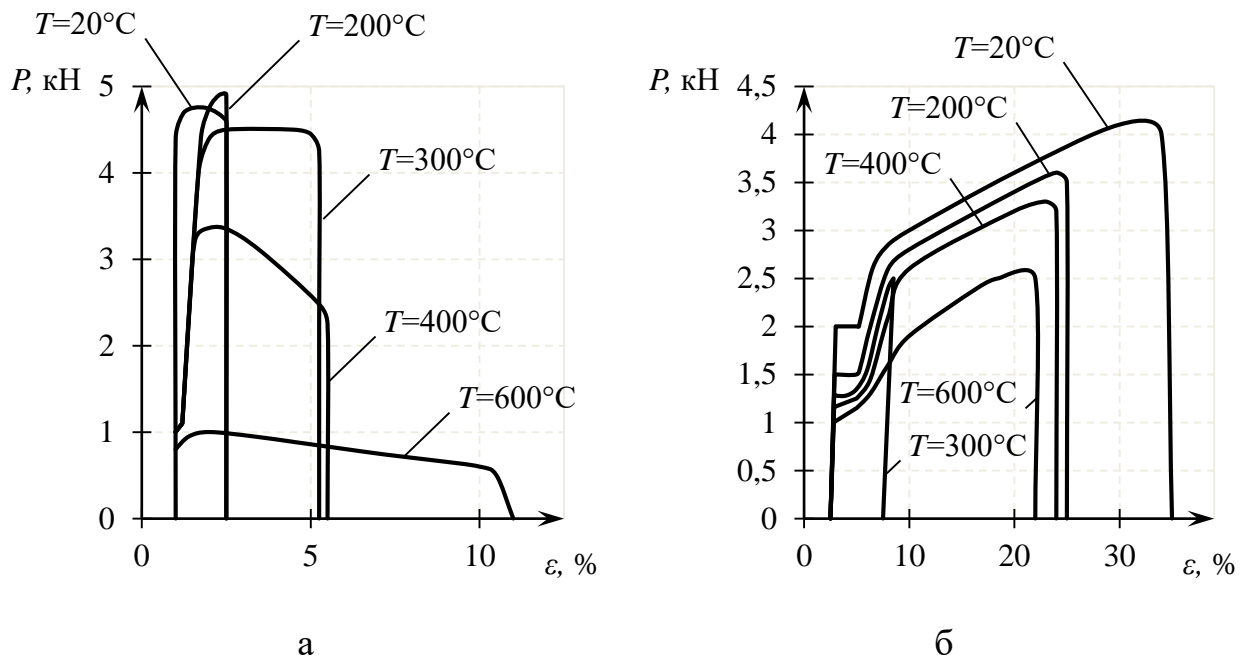
$$\sigma_{ост} = E(T)\varepsilon_{\Sigma}, \quad (2.6)$$

где $E(T)$ – температурно-зависимый модуль упругости.

На рисунке 2.2 показаны экспериментальные зависимости силового нагружения и деформаций при различных температурах.

Как видно из данных графиков, данные зависимости существенно не линейные. Описание свойств материалов по базовым формулам будет иметь большую погрешность. Для повышения точности теоретического расчета описания свойств материалов можно вести на основе реологических модели, которые представляют из себя набор механических элементарных моделей, характеризующих различные свойства материала.

Одной из таких моделей является пружина, которая соответствует модели Гука. Растягивающие или сжимающие силы, действующие на пружину, характеризуют растягивающие или сжимающие напряжения, а смещение представляет собой деформацию. Коэффициент жесткости пружины соответствует модулю упругости E . Запасенная в пружине внутренняя энергия полностью обратима [10, 12].



а – для стали 40; б – для стали 12X18H10T

Рисунок 2.2 – Экспериментальные характеристики

Звено демпфер описывает скоростную зависимость вязкого трения.

Третьим базовым звеном является звено пластичности. Параметром данного звена является предел текучести, при котором начинается пластическая деформации данного.

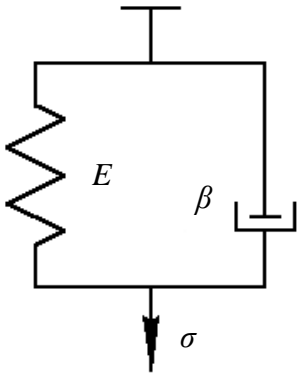
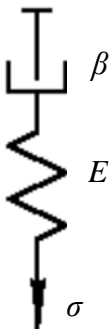
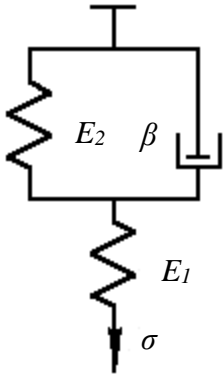
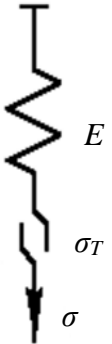
Четвертой базовой моделью является звено удлинения заготовки при действии нагрева или охлаждения. Входным параметром является изменения температуры, выходом – температурные деформации.

Данные звенья описывают простейшие свойства материала. Для более точного моделирования применяют комбинированные реологические модели, составленные из элементарных моделей.

Базовыми составными реологическими моделями являются модели Максвелла, Фойхта, Кельвина и Сен-Венана.

Схемы данных моделей, а также базовые уравнение приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Базовые модели

Модель	Схема	Базовое уравнение
Максвелла		$\sigma = E\varepsilon + \beta\dot{\varepsilon}$
Фойхта		$\dot{\varepsilon} = \sigma / \beta + \dot{\sigma} / E$
Кельвина		$E_2\dot{\varepsilon} + \beta\dot{\varepsilon} = \left(1 + \frac{E_2}{E_1}\right)\sigma + \frac{\beta}{E_1}\dot{\sigma}$
Сен-Венана		$\sigma = \varepsilon E \text{ при } \sigma < \sigma_T$ $\sigma_T = \sigma_{\text{вых}} \text{ при } \sigma \geq \sigma_T$

При конструировании реологических моделей элементы соединяются двумя способами.

Если параллельно, то деформации $\varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_2$, а напряжения $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2$.

Если последовательно: $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$, $\sigma = \sigma_1 = \sigma_2$.

2.2 Реологическое моделирование процесса деформирования для распределенной системы

Если представить поведение материала при нагружении с нагревом в виде элементарной ячейки, как вязкоупругопластической модели Ишлинского, то вне ее необходимо учесть температурную зависимость параметров модели. Например на рисунке 2.3 показаны пределы текучести в зависимости от температуры, где видно, что в пределах температуры отпуска данный параметр может изменяться почти в 2 раза [13, 14, 15].

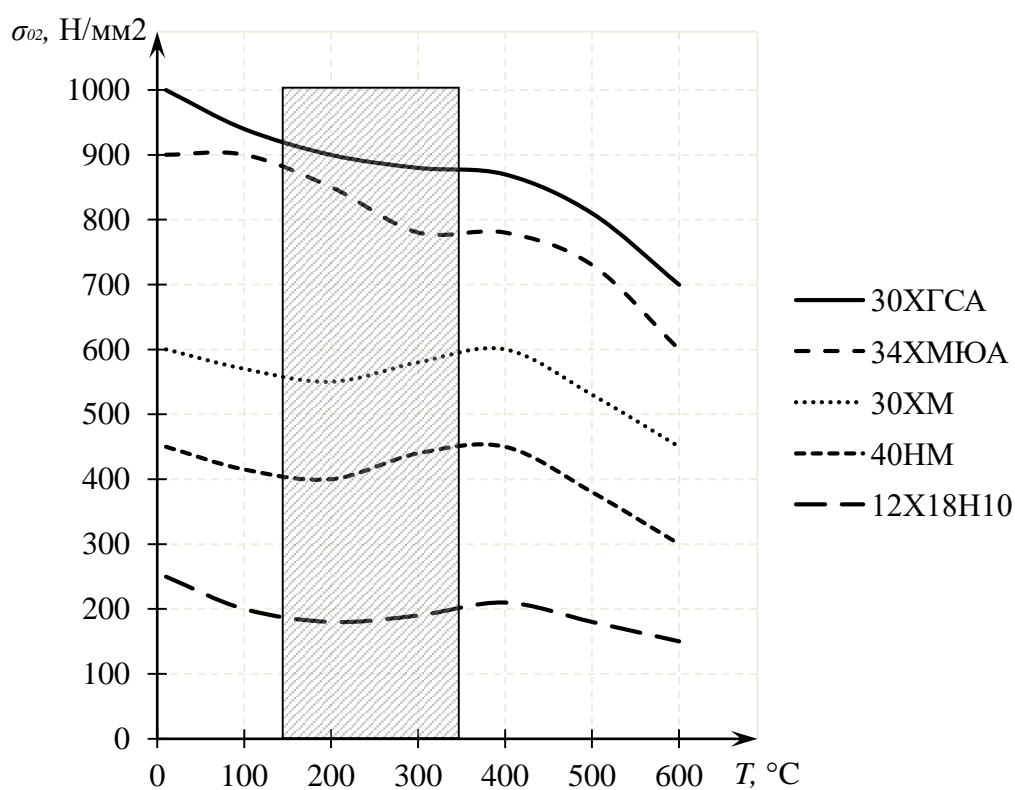


Рисунок 2.3 – Температурные зависимости предела текучести

Для правки растяжением с нагревом весь процесс разделяется на три этапа. В каждом из них процесс деформирования или температурного из них имеет свои особенности.

На первом этапе подход к расчету напряжений и деформаций будет отличаться для установки со стапелем, который создает усиления при их совместном нагреве с заготовкой за счет разницы температурные удлинений, и для установки, которая имеет отдельные приводы нагружения.

Для обработки заготовки в стапеле разница удлинений равна:

$$\Delta y = y_{ст} - y_{заг}, \quad (2.7)$$

За счет этой деформации возникает рабочее усилие:

$$F_{удл} = K \cdot \Delta y, \quad (2.8)$$

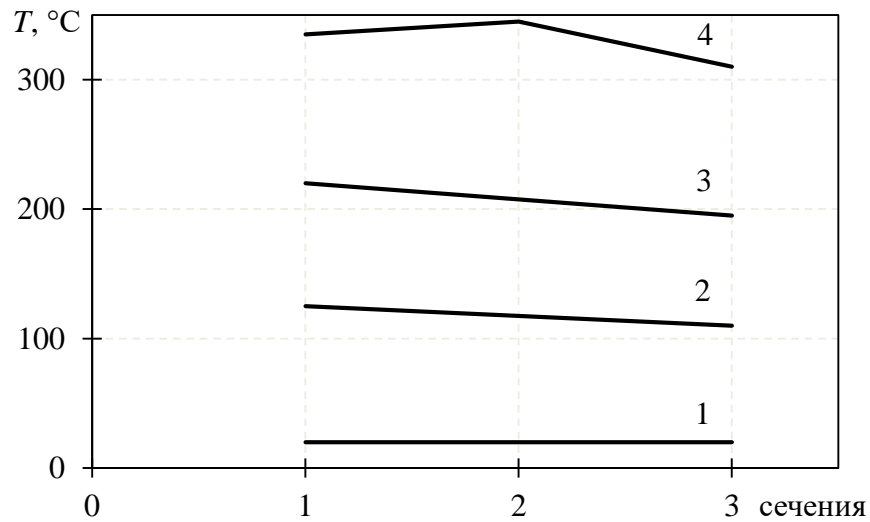
где K – приведенный коэффициент жесткости силового контура стапеля, Н/мм.

Для выхода на рабочую температуру деформирования необходимо предусматривать создание температурного зазора. Этом случае сила будет равна:

$$\begin{aligned} F_{удл} &= K \cdot \Delta y \text{ при } L \cdot \Delta \varepsilon \geq \delta_0, \\ F_{удл} &= 0 \text{ при } L \cdot \Delta \varepsilon < \delta_0, \end{aligned} \quad (2.9)$$

где δ_0 – температурный зазор, мм.

Температурный нагрев ведет к изменению параметров материала из-за неравномерности нагрева, что ведет к неоднородным напряжениям и деформациям, рисунок 2.4 [45].

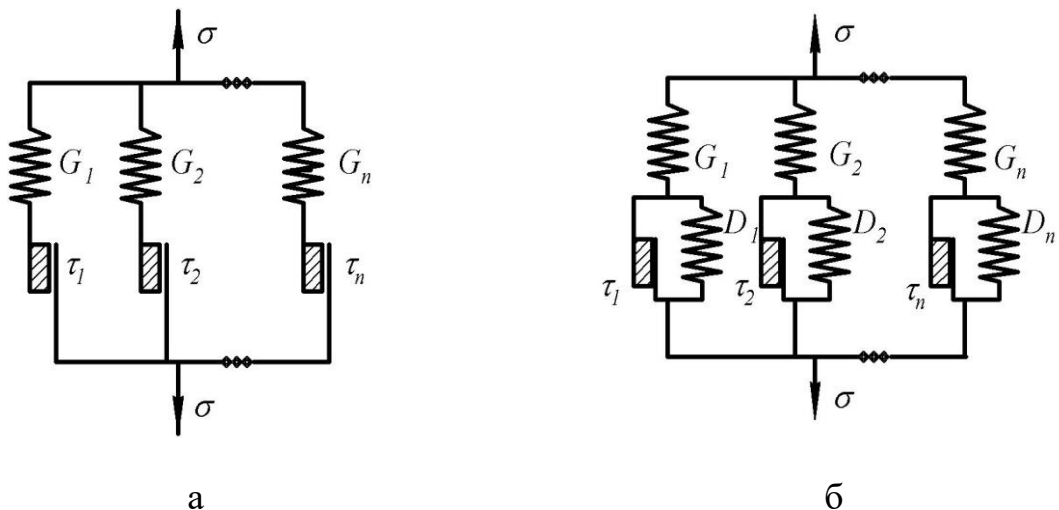


1 – 0 мин.; 2 – 10 мин.; 3 – 30 мин.; 4 – 60 мин.

Рисунок 2.4 – Температурный профиль заготовки по ее длине

Первый этап – этап нагружения и нагрева. На данном этапе заготовка нагревается до рабочей температуры с одновременным приложением силы, или могут затем к ней приложить осевую силу P и, при комплексном нагружении, крутящий момент M , если есть отдельные приводы нагружения.

Реологические модели могут быть двух типов: без упрочнения и с упрочнением.



а – без упрочнения; б – с упрочнением

Рисунок 2.5 – Реологическая модель А. Ю. Ишлинского

Реологическая ячейка материала, которая моделирует процесс упруго-вязкопластичного деформирования, показана на рисунке 2.6. Основой для нее является модель Ишлинского с упрочнением. Входом являются модуль упругости и предел текучести. Эти параметры могут быть представлены отдельными блоками, в которых будет учитываться их температурная зависимость.

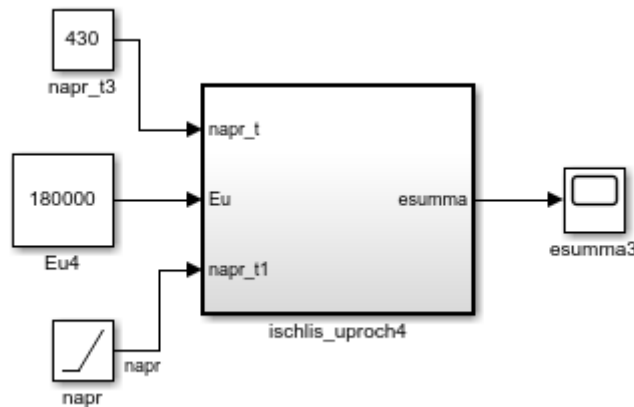


Рисунок 2.6 – Схема моделирования реологической ячейки

Для скоростей нагружения, которые используются при правке растяжением с нагревом, а также на начальной стадии нагрева-нагружения заготовки в стапеле, где скорости нагрева и, соответственно, нагружения малы, напряжения мало зависят от скорости деформации.

Базовое уравнение для напряжений $\sigma(t)$ в функции деформации $\varepsilon(t)$:

$$\sigma(t) = 2 \cdot G \cdot \left[\varepsilon(t) - \int_0^{\infty} \dot{\varepsilon}_{\tau} f(\tau) d\tau \right], \quad (2.10)$$

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_{\tau} = 0 & \text{при } \sqrt{2(\varepsilon - \varepsilon_{\tau}) \cdot (\varepsilon - \varepsilon_{\tau})} < \tau, \\ \dot{\varepsilon}_{\tau} \neq 0 & \text{при } \frac{\tau}{V_{\tau}} \dot{\varepsilon}_{\tau} = \varepsilon - \varepsilon_{\tau}, \end{cases} \quad (2.11)$$

где G – модуль сдвига, МПа; $f(\tau)$ – плотность вероятностного распределения безразмерных пределов текучести; $\dot{\varepsilon}_{\tau}$, ε_{τ} , – скорость и

величина пластической деформации; V_τ – интенсивность скоростей пластической деформации, c^{-1} ; τ – безразмерный предел текучести.

Полная деформация:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_\tau(t) + \varepsilon_y(t), \quad (2.12)$$

где ε_y – упругая деформация.

Интенсивность скоростей пластической деформации при растяжении равна:

$$V_\tau = \frac{2}{3}(1 + \mu)^2 \cdot \dot{\varepsilon}_{r1}, \quad (2.13)$$

где $\dot{\varepsilon}_{r1}$ – скорость пластической деформации в осевом направлении, c^{-1} ;
 μ – коэффициент Пуассона.

При растяжении поперечные деформации:

$$\dot{\varepsilon}_{r2} = \dot{\varepsilon}_{r3} = -\mu \cdot \dot{\varepsilon}_{r1}, \quad (2.14)$$

где $\dot{\varepsilon}_{r2}, \dot{\varepsilon}_{r3}$ – скорость пластической деформации в поперечных направлениях, c^{-1} .

Расчет ведется в относительных, безразмерных параметрах. Поэтому:

$$\tau = \frac{\sigma_T}{E_y} = \frac{\sigma_{Ti}}{2G_i}, \quad (2.15)$$

где τ – безразмерный предел текучести;

σ_{Ti} – предел текучести, МПа;

G – модуль сдвига, МПа;

E_y – модуль упругости, МПа.

С учетом упрочнения q :

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_\tau = 0 & \text{при } \sqrt{2(\varepsilon - (1+q)\varepsilon_\tau) \cdot (\varepsilon - (1+q)\varepsilon_\tau)} < \tau, \\ \dot{\varepsilon}_\tau \neq 0 & \text{при } \frac{\tau}{V_\tau} \dot{\varepsilon}_\tau + (1+q)\varepsilon_\tau = \varepsilon_\tau(t). \end{cases} \quad (2.16)$$

где $\dot{\varepsilon}_\tau$, ε_τ , – скорость и величина пластической деформации;
 V_τ – интенсивность скоростей пластической деформации, c^{-1} ; τ –
 безразмерный предел текучести.

Безразмерность вводится для нормировки уравнений на модуль
 упругости E , чтобы сделать модель универсальной для разных температур и
 материалов.

В нем показатель упрочнения:

$$q = D/G, \quad (2.17)$$

где D – модуль упрочнения, МПа.

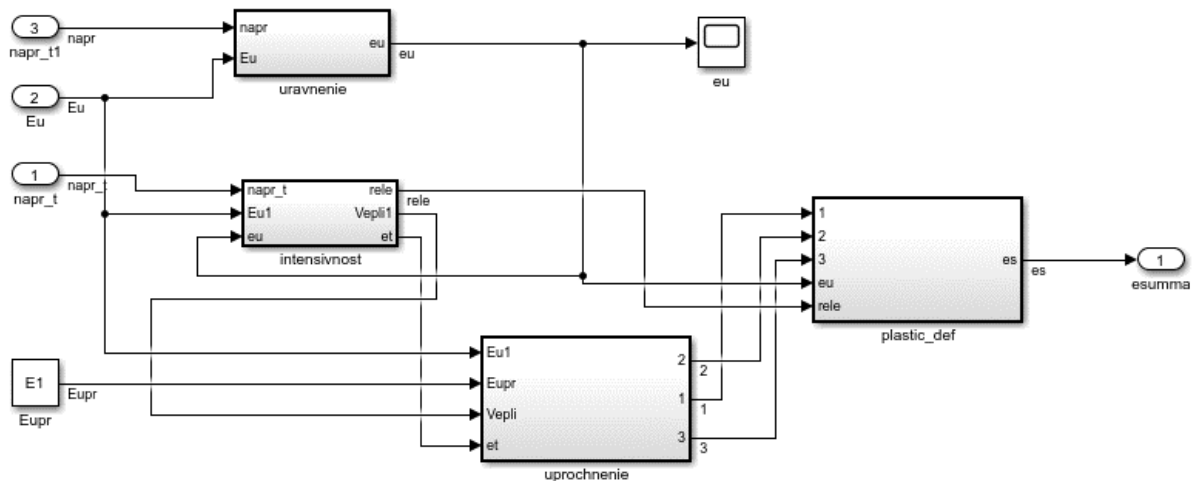


Рисунок 2.7 – Развертка реологической ячейки по функциональным блокам

В формулу (2.10) входит $f(\tau)$ – плотность вероятностного распределения предела текучести. Она аппроксимируется зависимостью $f(\tau) = \alpha H \tau^{\alpha-1}$. Формулу (2.10) можно тогда аналитически записать как:

$$\sigma(t) = 2 \cdot G \cdot \left[\varepsilon - \frac{H}{\alpha + 1} \varepsilon^{\alpha+1} \right], \quad (2.18)$$

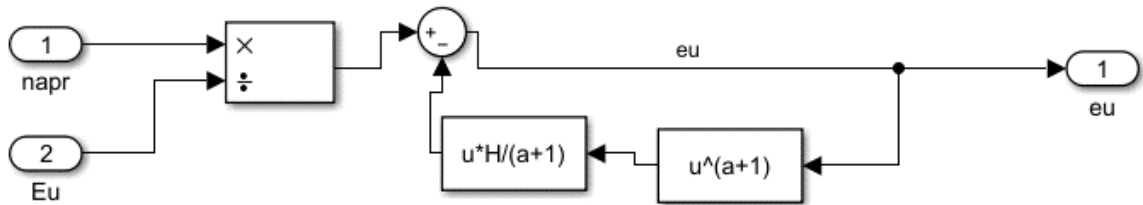


Рисунок 2.8 – Блок моделирования уравнения (45)

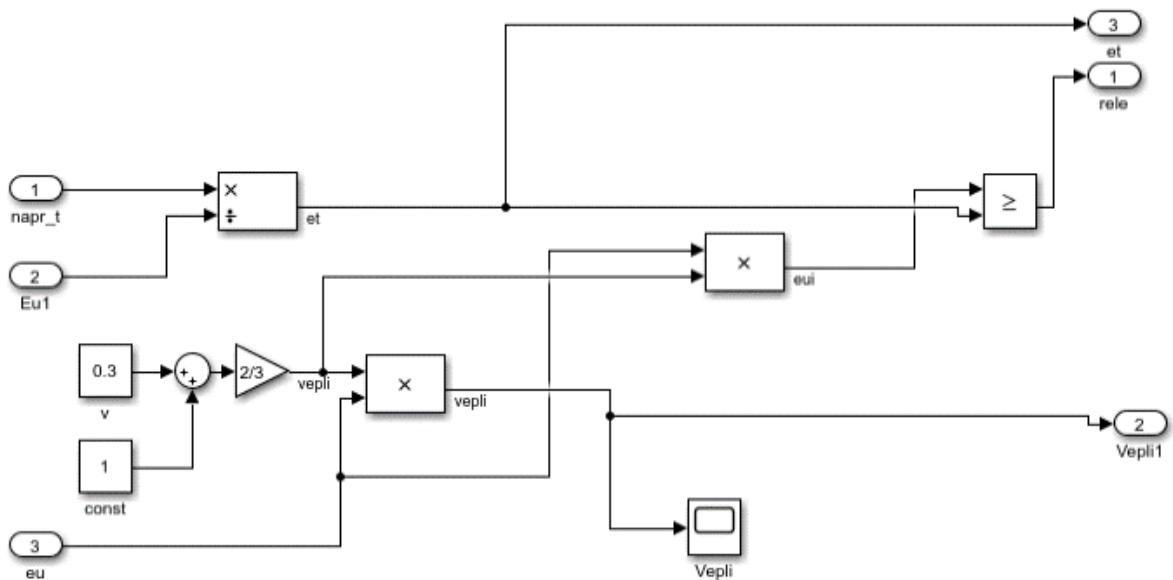


Рисунок 2.9 – Блок моделирования интенсивности пластической деформации

Интенсивность упругой деформации:

$$\varepsilon_u = \sqrt{2(\varepsilon - \varepsilon_\tau) \cdot (\varepsilon - \varepsilon_\tau)}, \quad (2.19)$$

где:

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{6}}{3} (1 + \mu)^2 \varepsilon_1, \quad (2.20)$$

Для интенсивности напряжений:

$$\sigma_u = \frac{\sqrt{6}}{3} (1 + \mu)^2 \sigma_1, \quad (2.21)$$

которая определяется из опытов на растяжение.

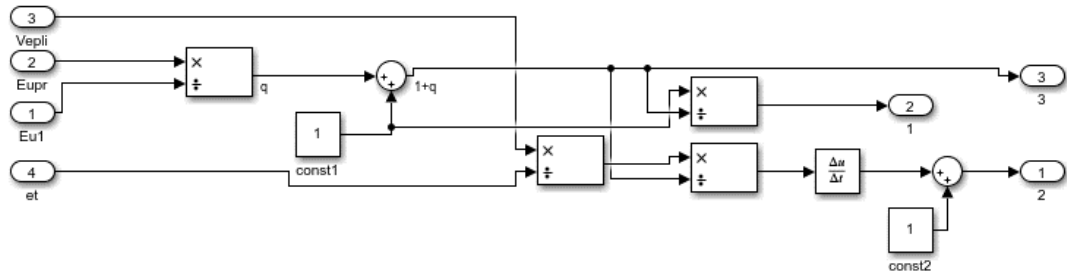


Рисунок 2.10 – Блок моделирования упрочнения

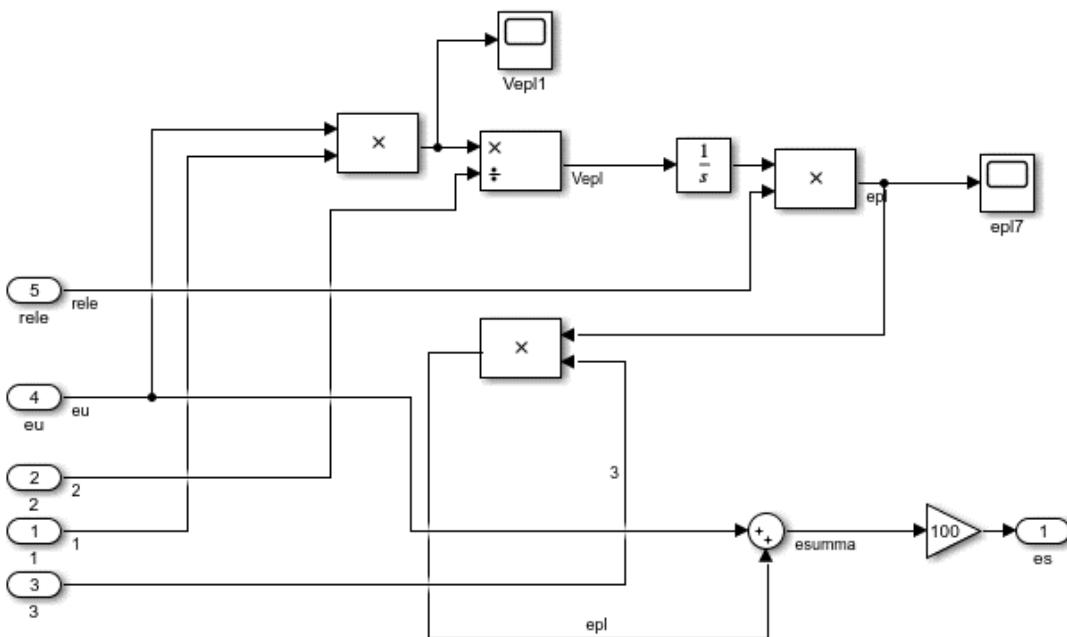


Рисунок 2.11 – Блок моделирования пластической деформации

Модель представлена в виде цепочки взаимодействующих однотипных модулей-блоков, каждый из которых может иметь индивидуальный ввод температуры, задание по определенному закону распределения параметров материала приведено на рисунке 2.12.

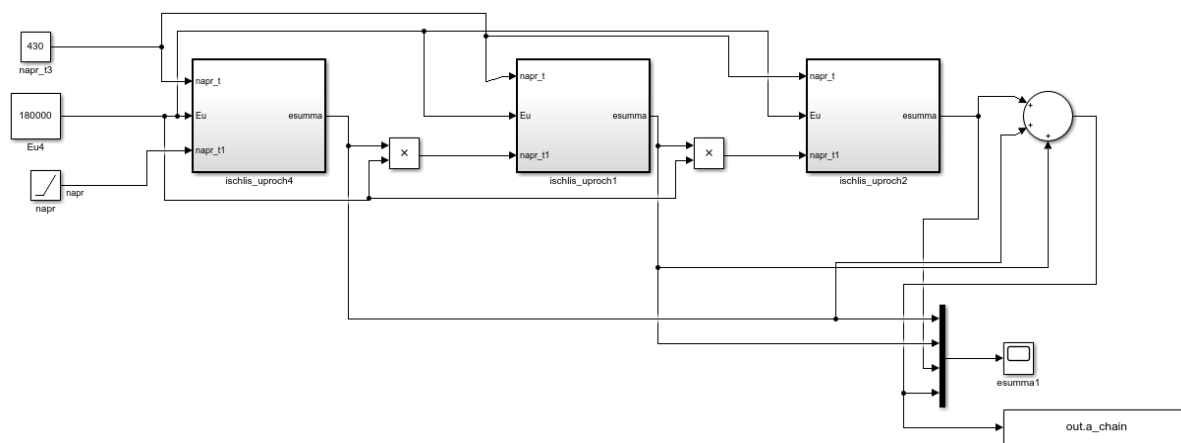


Рисунок 2.12 – Реологическая цепочка моделирования деформации распределенной системы

Распределенная модель дает возможность оценить влияние неравномерности нагрева, неоднородности свойств материала на равномерность деформирования.

Для связи реологических ячеек между собой используется звено Кельвина. Оно обеспечивает учет динамического взаимодействия различных участков заготовки между собой.

Общая передаточная функция в операторной форме будет равна:

$$\sigma(p) = 2G \frac{\lambda \cdot p + q}{1 + q + \lambda \cdot p} \varepsilon(p), \quad (2.22)$$

где λ – время релаксации, с;

p – оператор Лапласа, c^{-1} .

Время релаксации:

$$\lambda = \mu / G, \quad (2.23)$$

где μ – коэффициент вязкости материала, МПа·с.

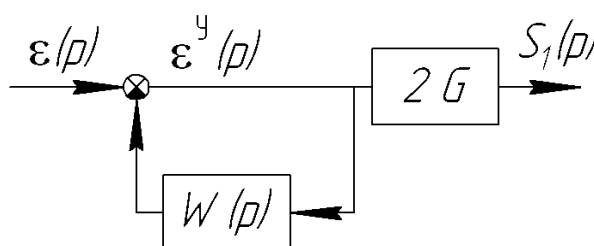


Рисунок 2.13 – Передаточная функция звена Кельвина

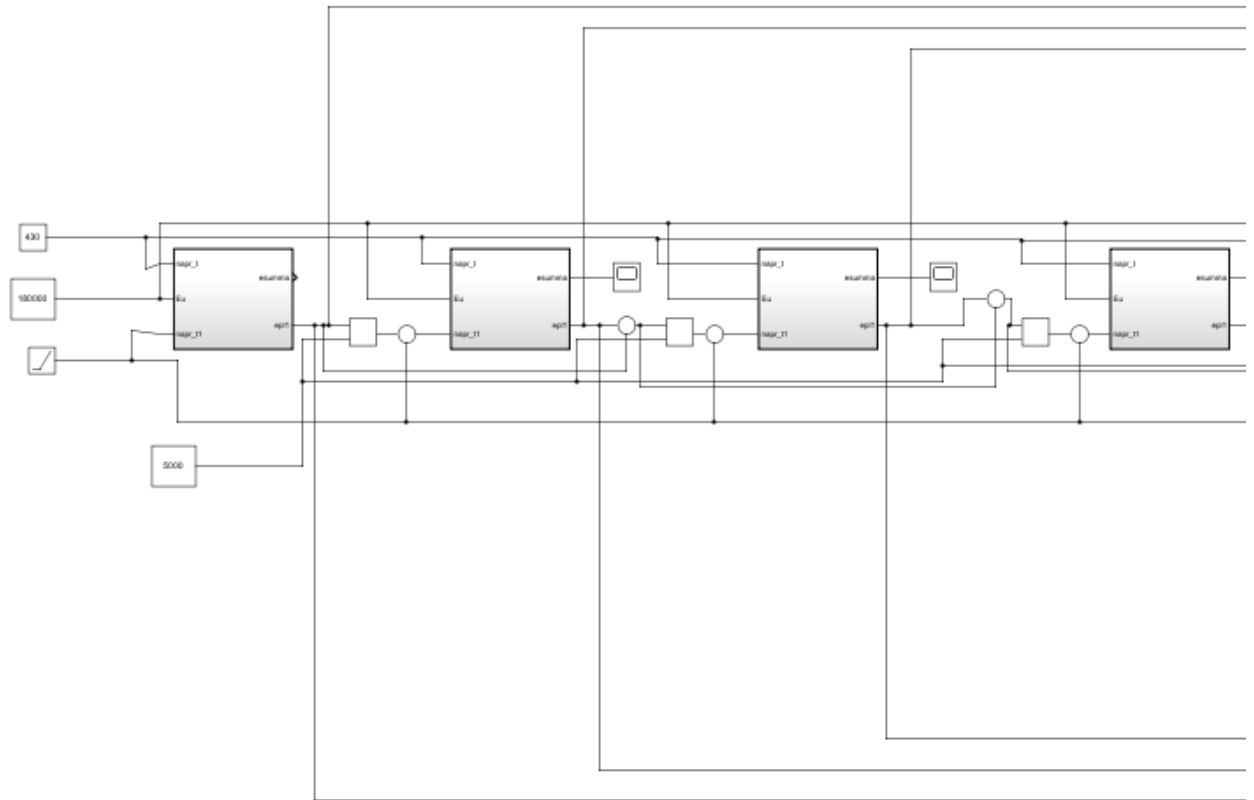


Рисунок 2.14 – Реологическая цепочка связанных блоков через передаточную функцию звена Кельвина (показаны 4 из 8 блоков)

При моделировании использовались следующие параметры, найденные или из результатов тестовых опытов или из литературных источников.

$\varepsilon, \%$

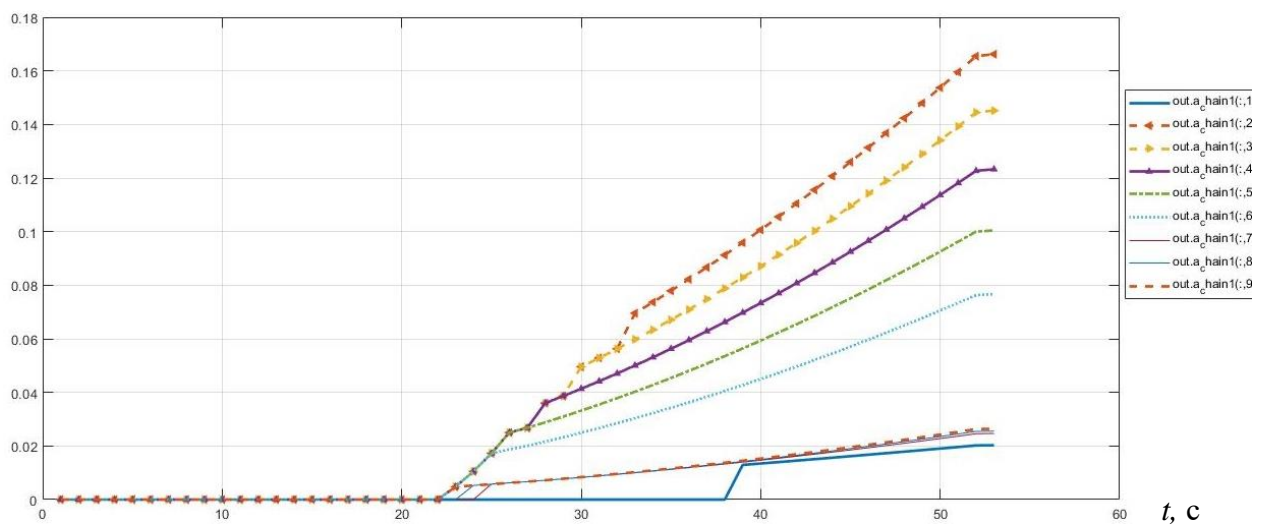


Рисунок 2.15 – Результаты моделирования без учета связывающих звеньев

$\varepsilon, \%$

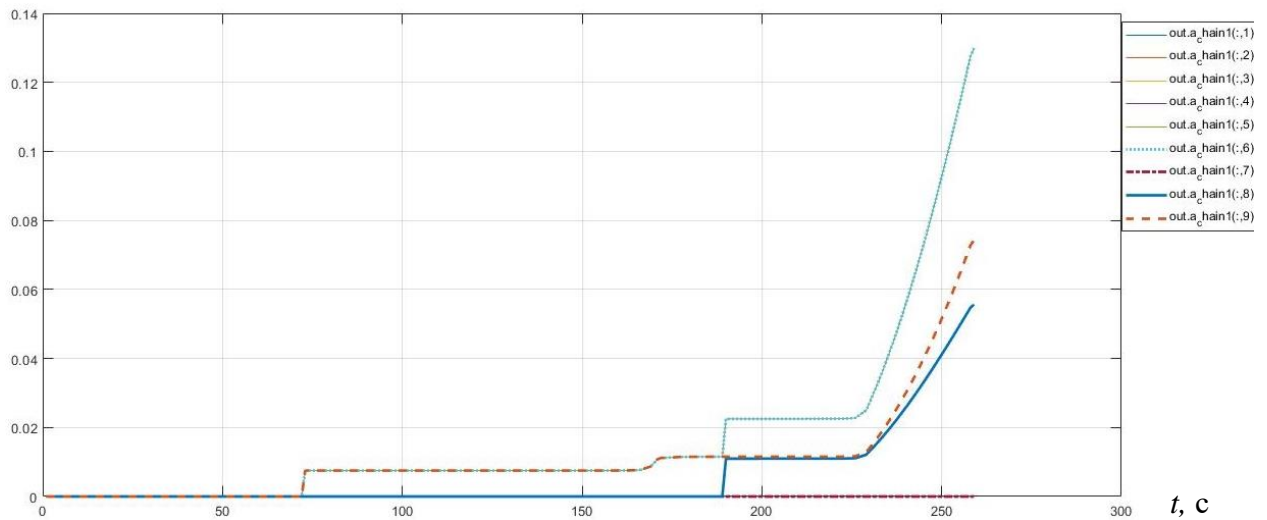


Рисунок 2.16 – Результаты моделирования с учетом связывающих звеньев

Температурно-зависимые параметры – модуль упругости E и предел текучести σ_m определяются по формулам:

$$E(T) = E(0) \cdot \varphi(T), \quad (2.24)$$

$$\varphi(T) = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 < T/T_{\text{пл}} \leq 0,06, \\ 1,03(1 - T/(2T_{\text{пл}})) & \text{при } 0,06 < T/T_{\text{пл}} \leq 0,57, \end{cases} \quad (2.25)$$

где $T_{\text{пл}}$ – температура плавления материала, °С; $E(0)$ – значения модуля упругости при нулевой температуре, МПа; T – рабочая температура, °С.

Модуль нулевого напряжения:

$$E(0) = \frac{E_0}{\varphi(T_0)}, \quad (2.26)$$

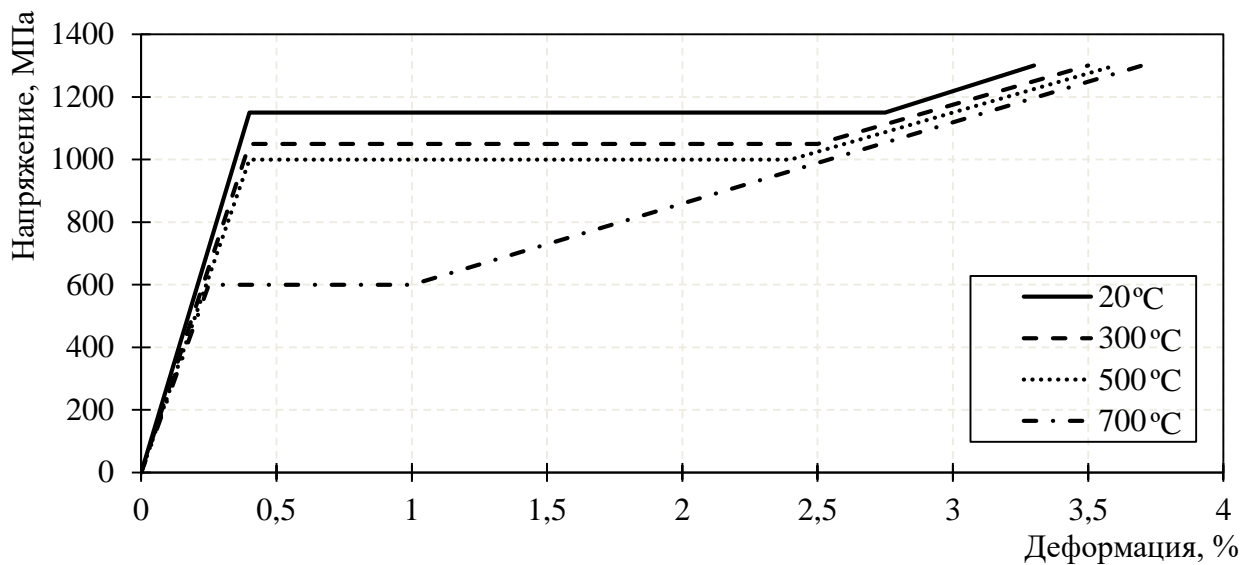
где E_0 – модуль упругости при температуре T_0 .

Зависимость предела текучести от температуры:

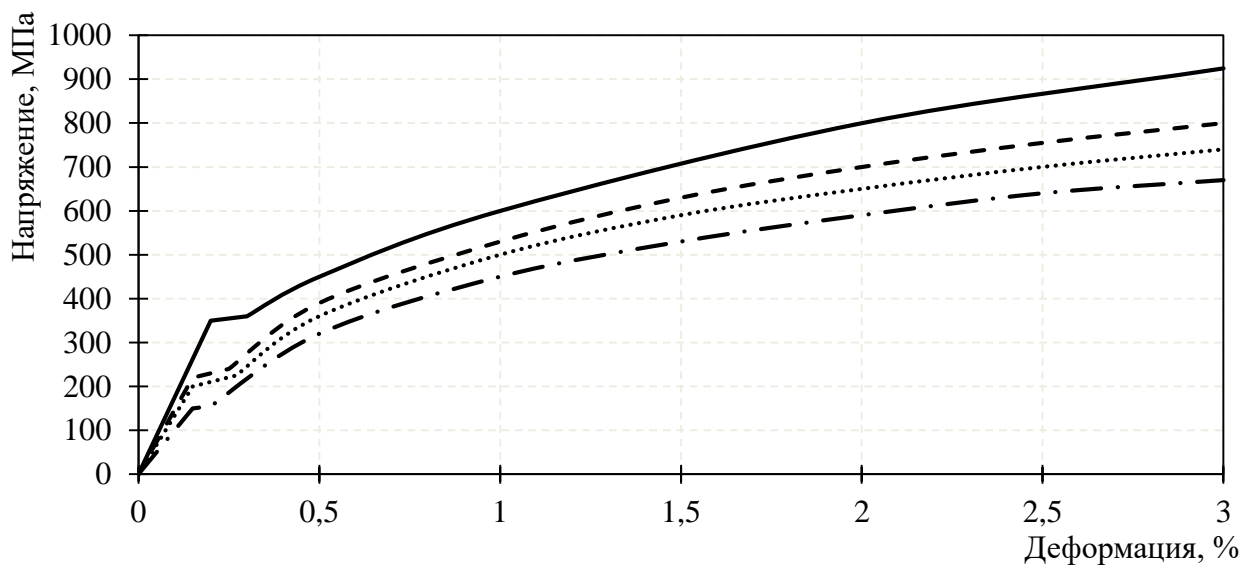
$$\sigma_m(T) = \sigma_{m0} \cdot \exp\left\{\chi\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right\}. \quad (2.27)$$

где $\sigma_m(T)$ – предел текучести при температуре T , МПа; σ_{m0} – предел текучести при температуре T_0 , МПа; χ – температурный коэффициент, характеризующий скорость снижения σ_m с ростом T , К; T_0 – начальная температура, К; T – рабочая температура, К.

Результаты расчета по модели с упрочнением для сталей 40Х и 12Х18Н10Т представлены на рисунках 2.17.



а



б

а – 40Х; б – 12Х18Н10Т

Рисунок 2.17 – Результаты расчета по модели с упрочнением кривой нагружения для сталей с различной температурой нагрева образцов

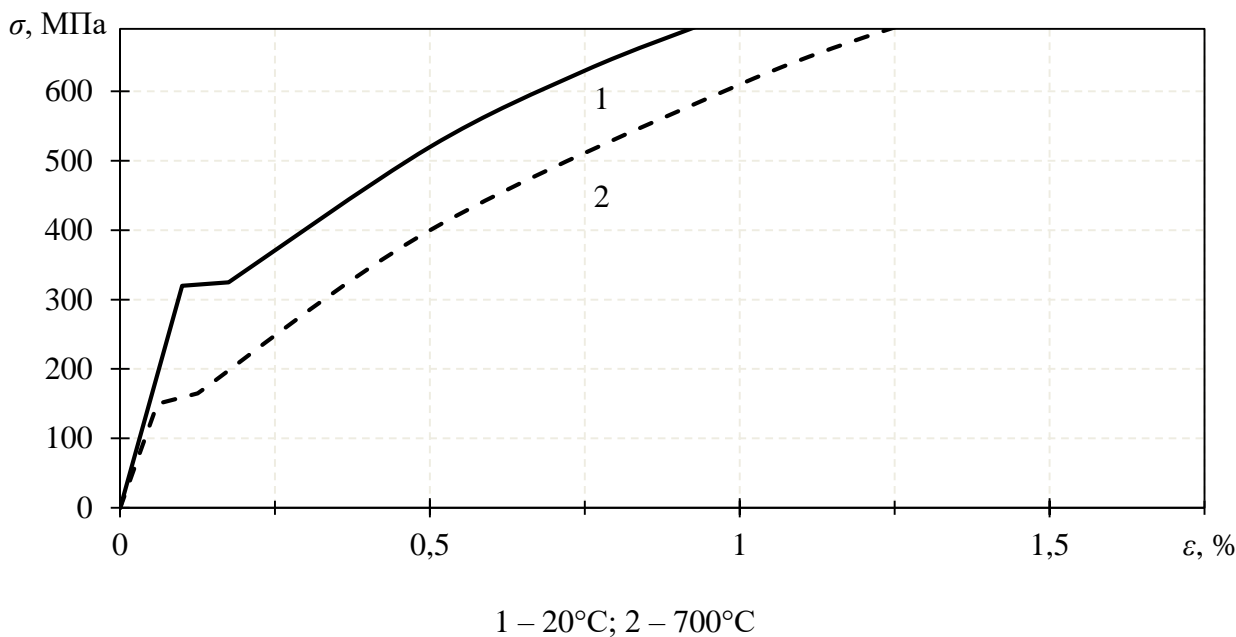


Рисунок 2.18 – Кривые упрочнения (12X18H10T)

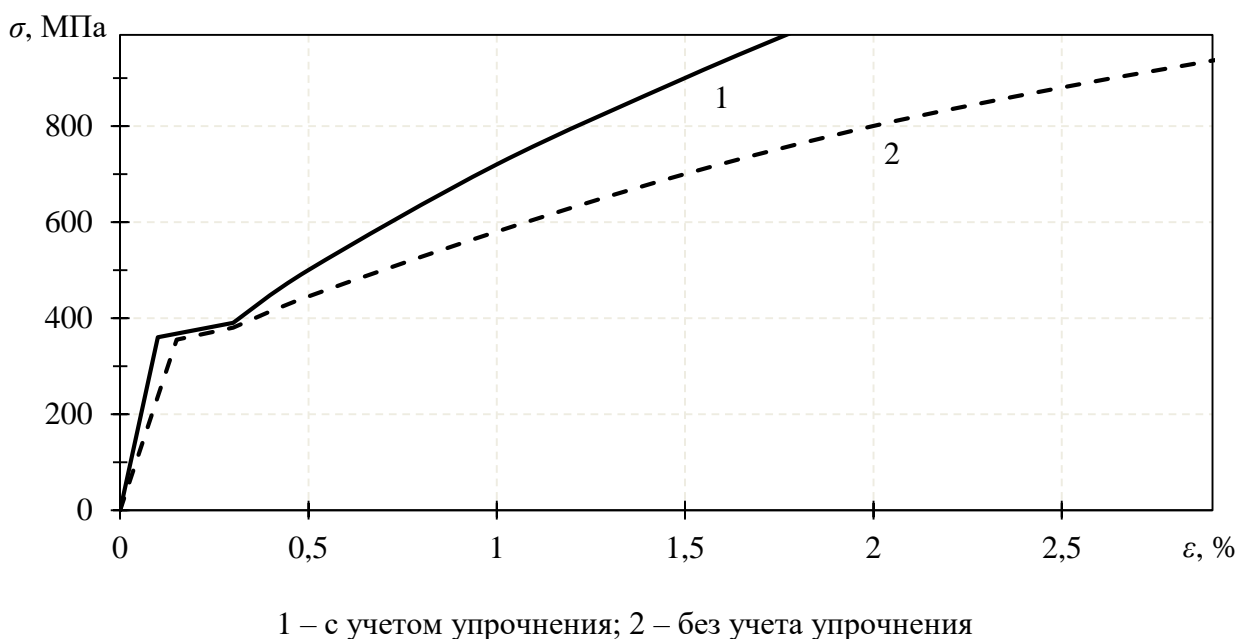


Рисунок 2.19 – Кривые упрочнения при 20⁰ С (12X18H10T):

На этапе выстоя: поскольку процесс выстоя может достигать 1-2 ч., например, при высоком отпуске, необходимо при разработке модели учитывать релаксационные процессы. В сумме $\varepsilon_{\Sigma} = \varepsilon_{упр} + \varepsilon_{пл}$ идет перераспределение упругой деформации в пластическую. Это приводит к снижению напряженного состояния. Температура на данном этапе постоянная, температурные напряжения постоянные [42, 48].

Процесс релаксации:

$$\sigma(t) = E_T \varepsilon_\Sigma \left[1 - \int_0^t T(\tau) d\tau \right], \quad (2.28)$$

где E_T – модуль упругости при температуре выстоя, МПа;

ε_Σ – начальная суммарная деформация в начале второго этапа;

$T(\tau)$ – ядро уравнения Вольтерры.

Последнее можно представить в виде ядра Ржаницина:

$$T(t) = A \cdot e^{-\beta t} \cdot t^{\alpha-1} \quad (2.29)$$

где A – коэффициент;

α , β – показатели степени получены из результатов релаксационных испытаний по методике.

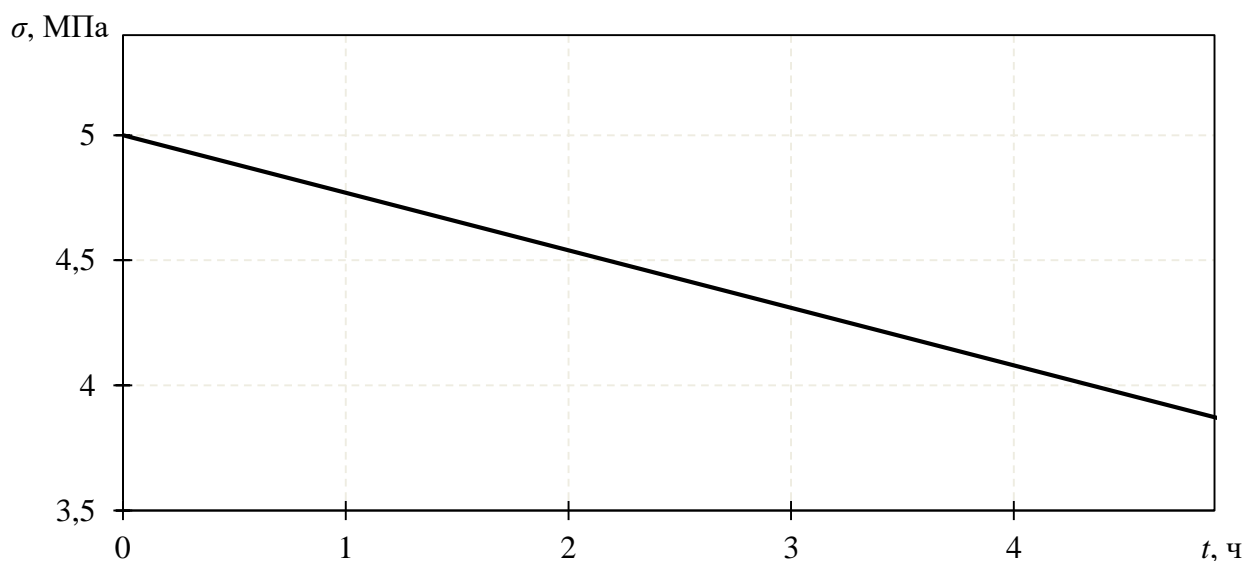


Рисунок 2.20 – Процесс релаксации на выстое

На третьем этапе правки растяжением с нагревом разгрузке – охлаждении могут появиться новые остаточные напряжения за счет несовместности упругих и пластических деформаций.

Математическая модель этапа разгрузки аналогична модели первого. Разница температурных удлинений стапеля и заготовки связаны с разной

скоростью их охлаждения. Результат температурного расчета и изменения деформации на рисунках 2.21 и 2.22.

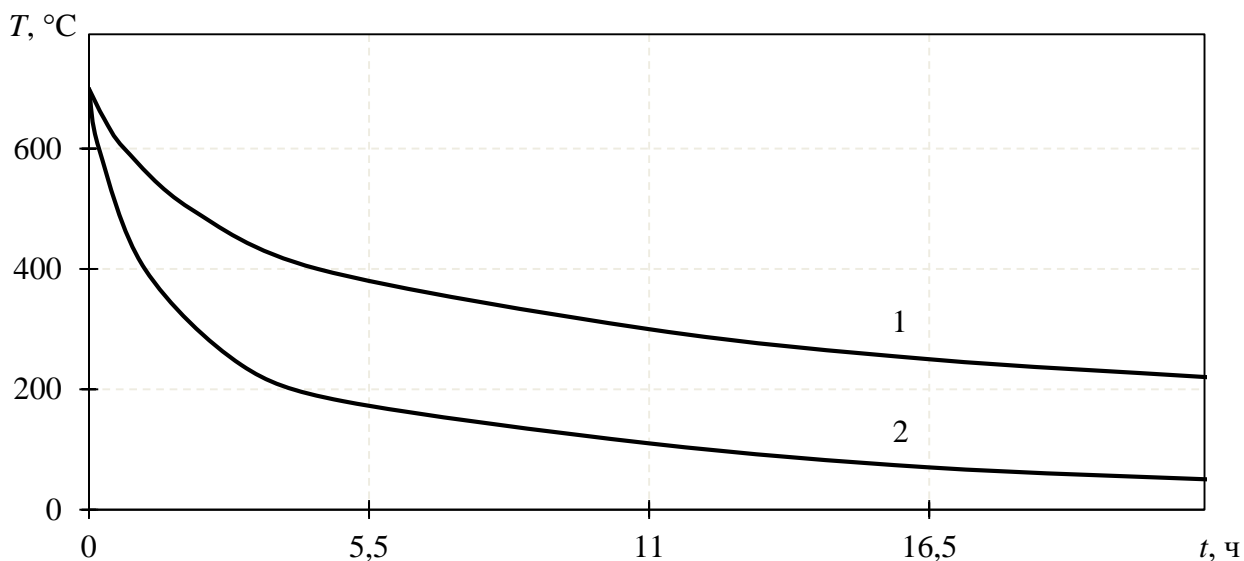


Рисунок 2.21 – Температура стапеля и вала при охлаждении

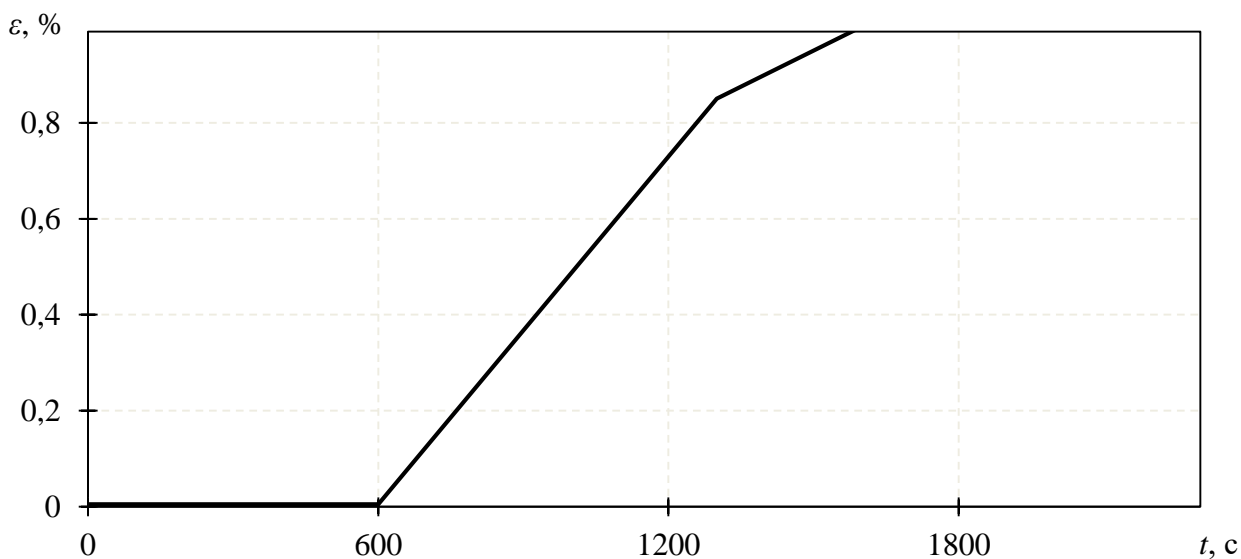


Рисунок 2.22 – Результаты моделирования $\varepsilon-t$ на третьем этапе

Выводы по главе 2

Рассмотрены вопросы моделирования процесса правки растяжением с нагревом на основе реологических моделей.

Разработана распределенная пространственная реологическая модель, которая используется для моделирования процесса правки растяжением с

нагревом, учитывающая влияние величины деформации и скорости деформации на напряжения. Используется реологическая модель Ишлинского с упрочнением, где введен учет температурной зависимости параметров модели, к которым относятся модуль упругости и предел текучести.

Произведен расчет распределенной реологической модели без и с упрочнением проводился для сталей 40X и 12X18H10T в диапазоне от 20 до 700 °С.

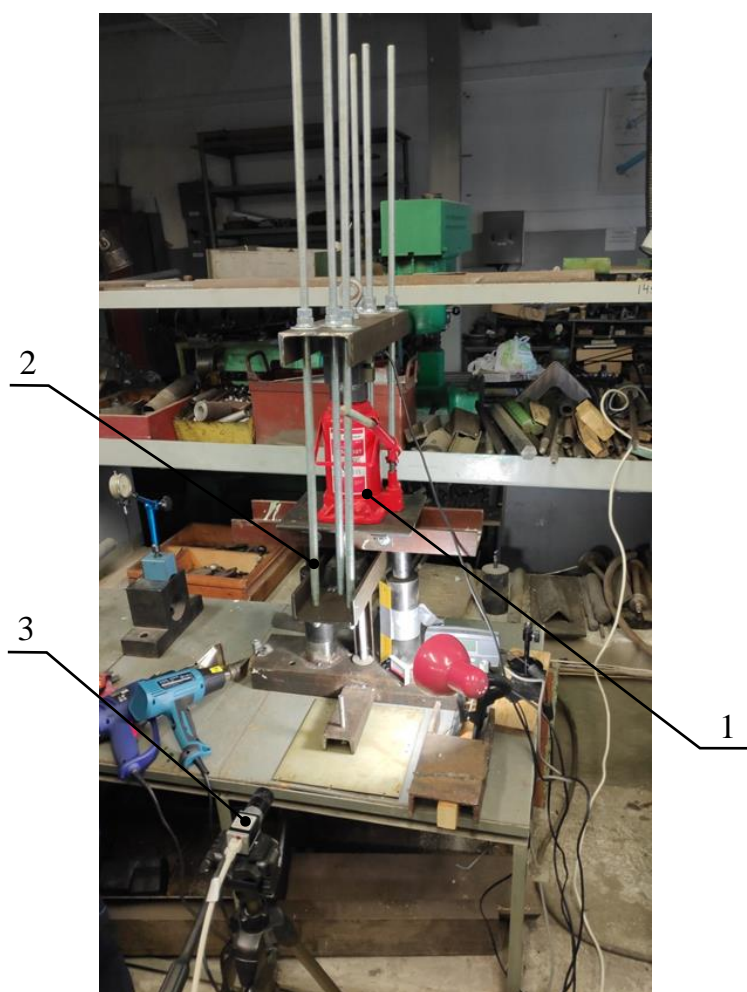
Такой подход дает возможность исследования процесса распределения деформации вдоль оси заготовки при различных технологических параметрах, включая величину и скорость деформации, распределение температуры вдоль оси заготовки.

В дальнейшем, результаты моделирования используются как дополнительные входные данные для обучения нейронной сети совместно с данными, полученными от контроля реального процесса нагрева, что позволяет увеличить объем данных для обучения и повысить точность нейросетевой модели.

ГЛАВА 3. СПОСОБ КОНТРОЛЯ ДЕФОРМАЦИИ ОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ ПРИ ПРОЦЕССЕ ПРАВКИ РАСТЯЖЕНИЕМ С НАГРЕВОМ

3.1 Растяжение образцов с контролем деформации оптическим способом

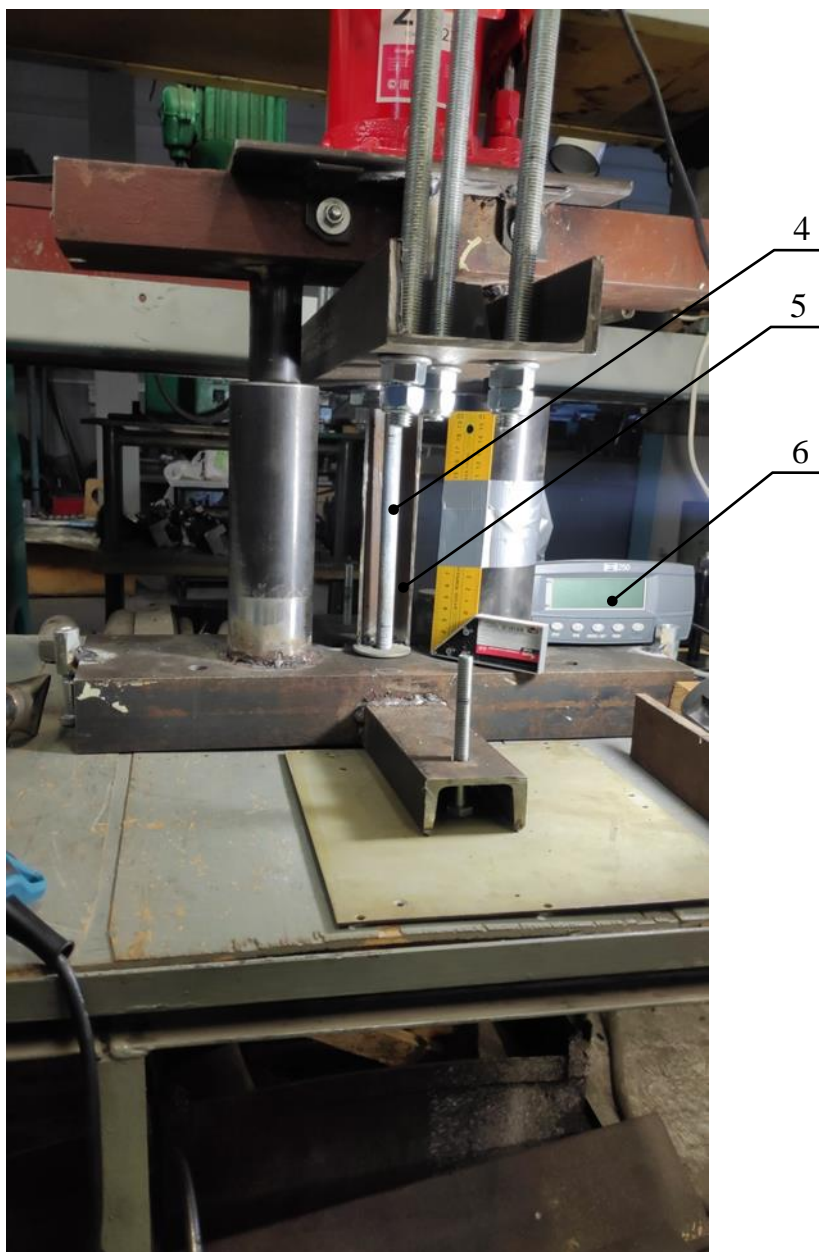
Для апробации предложенного способа оптического контроля деформации цилиндрического образца при растяжении во время правки растяжением с нагревом проведен цикл экспериментов на установке, общий вид которой показан на рисунке 3.1.



1 – домкрат; 2 – подвижная силовая рама; 3 – цифровая камера

Рисунок 3.1 – Общий вид установки

Установка состоит из силового каркаса, на нижнем основании которого крепится один из концов образца, рисунок 3.2.



4 – заготовка (образец); 5 – кожух; 6 – индикатор

Рисунок 3.2 – Общий вид установки для правки растяжением с нагревом (рабочая зона)

На верхней части каркаса установлен домкрат грузоподъемностью 20 кН, который перемещает подвижную силовую раму. Между домкратом и подвижной силовой рамой установлен датчик силы тензометрического типа. Z-образный датчик установлен в направляющих на поперечном каркасе. На него опирается подвижная рама, которая скреплена с ним резьбовым

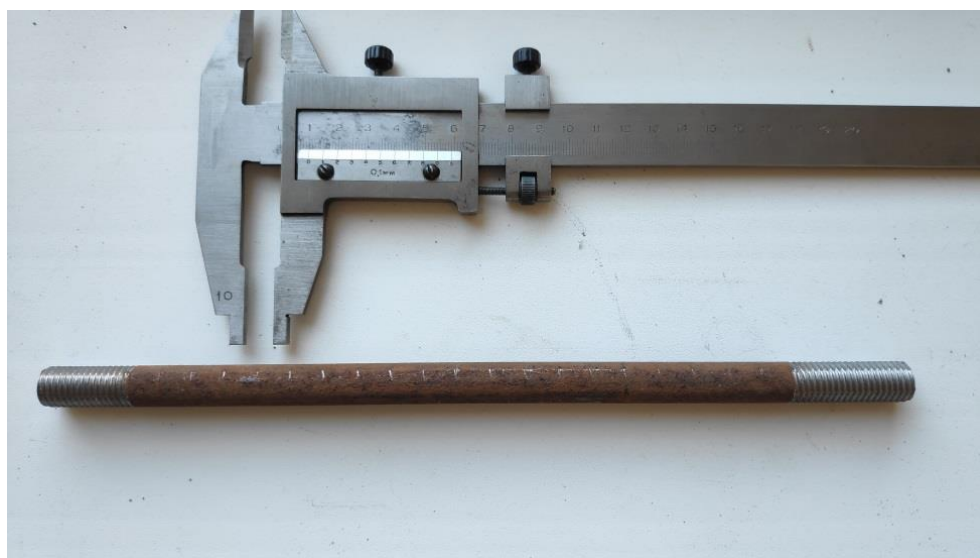
креплением. Вывод сигнала с датчика осуществляется на индикатор и на USB-порт компьютера.

На нижней поперечине подвижной рамы закрепляется верхний конец образца. Образец представляет собой цилиндрический стержень длиной 310-320 мм из материала – сталь 35. На двух концах образца предварительно нарезается резьба метрического типа на длину около 38 мм для фиксации по ним трех гаек с каждого конца.

На образец с одной стороны наносятся риски мерным инструментом с одинаковым шагом 10 мм, рисунок 3.3.



а



б

а – измерение по линейке; б – измерение штангенциркулем

Рисунок 3.3 – Образец №1 после обработки

При съемке масштабирование изображения проводится по мерному инструменту при контроле рисок оптическим способом.

С другой стороны, образец покрывается сначала матовой белой краской, затем по окрашенной белой поверхности наносится точечный рисунок разреженным разбрызгиванием черной краской, формируя спекл, который используется для контроля деформации оптическим способом.



Рисунок 3.4 – Образец №1 после обработки с покрытием спеклом

Для контроля деформации по поверхности образца использовалась цифровая камера Basler acA1440-73gc с CMOS-матрицей Sony IMX273, частотой 1 кадр в секунду, рисунок 3.5.

При съемке задаются параметры по выдержке, для обеспечения контрастного изображения и чистоты для обеспечения необходимого временного промежутка между последовательными кадрами для фиксации смещения точек рисунка, нанесенного на образец.



а



б

а – вид спереди; б – вид сбоку

Рисунок 3.5 – Камера для записи растяжения

Для получения корректной информации проводилась настройка оптической системы с тарировкой и калибровкой данных (коэффициенты радиальной дисторсии 0,013; 3,122; 33,442; коэффициенты тангенциальной дисторсии 0,006; 0,0219; фокусное расстояние 3776,489; 3718,554). До правки растяжением с нагревом, метод предварительно оценивался на точность на трубках с нанесенным спеклом с размерами 0,04-0,15 мм (0,8-3 пикселя) 0,5 мм (10 пикселей). Полученные изображения накладывались друг на друга (исходный и деформированный образец) с измерением смещений контрольных точек в сечении с установленными реперными стержнями толщиной 0,5 мм с точностью до 0,5 пикселей (0,025 мм). Дополнительно контролировалось смещение нижнего фиксатора с индикатором, имеющего погрешность 0,01 мм.

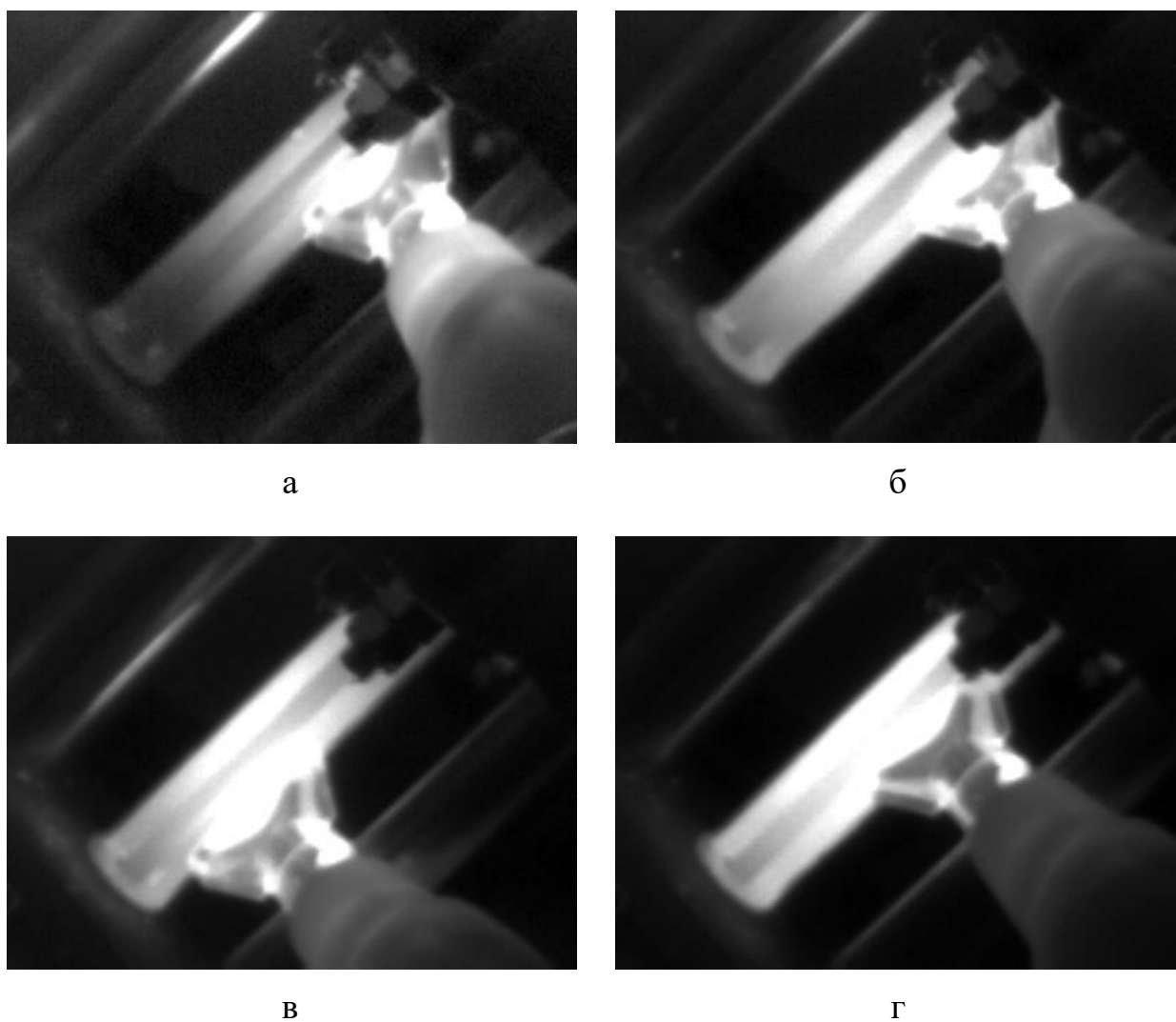


Рисунок 3.6 – Распределение нагрева по длине образца и по времени

Кроме этого проводилась видео фиксация всего процесса на камеру смартфона. Перед растяжением с нагревом образца производился его нагрев. Он осуществлялся при помощи промышленных фенов с рабочей температурой нагрева воздуха до 600°C.

Контрольный замер температуры образца при помощи пирометра давал максимальную температуру нагрева образца 210°C. Пример нагрева образца одним феном со съемкой теплового поля на тепловизор показан на рисунке 3.6. На нем показан характер изменения нагрева образца по длине последовательно через 1 минуту. В данном примере нагрев по длине образца производился за счет перемещения фена вдоль его оси. В экспериментах по растяжению нагрев образцов производился при помощи одновременно двух фенов, выходные сопла которых были расположены вдоль оси образца равномерно покрывая потоком воздуха всю поверхность заготовки.

3.2 Результаты измерений после растяжения

При растяжении образца предварительно происходил нагрев в течении 5 мин. Температура нагрева по пирометру в пределах 175-190°C. После этого производилось нагружение до величины 10, 15, 20 мм. Для образца это составляет 4, 6,1 и 8,2%. Из-за местной и общей деформации элементов силового контура установки, упругой и температурной деформации образца фактическая остаточная деформация меньше в зависимости от условий нагружения. Скорость деформации задавалась скоростью перемещения рукоятки домкрата и имела переменный характер, что хорошо видно на графиках осевых смещений. Одно перемещение рукоятки приводит к 1,5 мм осевого выдвигания штока. Высчитывалась по времени записи и количеству качаний рукоятки (например, 15 циклов за 50 с). Тогда скорость составляла 0,45 мм/с или 0,0018с⁻¹.

Пример замера приведен в таблице 3.1. При измерениях фиксировалась температура образца при измерении. Нагружение 10 мм. Фактическое

удлинение 4 мм. По крайним рискам 1,47 мм, остальное пришлось на резьбовой участок. Нагружение со скоростью 0,45 мм/с. Риски по длине по участкам после растяжения (наносились большим ШЦ). Измерение диаметра проводилось вдоль нанесенной продольной линии.

На рисунках 3.7 и 3.8 показаны графики изменения размеров диаметров и расстояний между рисками. Замер диаметров показал очень большую погрешность измерения из-за погрешности контролируемого диаметра.

Таблица 3.1 – Результаты замеров изменений параметров образцов

Участок	Диаметр до, мм	Диаметр после, мм	Расстояние между рисками, мм	Оценка изменения расстояния по калибровке, мм
1	13,64	13,58	10,53	0,24
2	13,55	13,52	10,64	0,35
3	13,62	13,52	10,34	0,05
4	13,6	13,59	10,35	0,06
5	13,6	13,51	10,45	0,16
6	13,6	13,51	10,29	0
7	13,57	13,64	10,29	0
8	13,58	13,67	10,48	0,19
9	13,58	13,68	10,48	0,19
10	13,58	13,67	10,51	0,22
11	13,52	14,10	10,44	0,15
12	13,49	14,11	10,99	0,7
13	13,53	13,86	10,42	0,13
14	13,53	13,89	10,87	0,58
15	13,52	13,89	10,54	0,25
16	13,48	13,85	10,54	0,25
17	13,5	13,78	10,82	0,53
18	13,48	13,52	10,14	-0,15
19	13,48	13,5	10,88	0,59
20	13,5	13,59	10,68	0,39
21	-	-	10,68	0,39
22	-	-	11,11	0,82

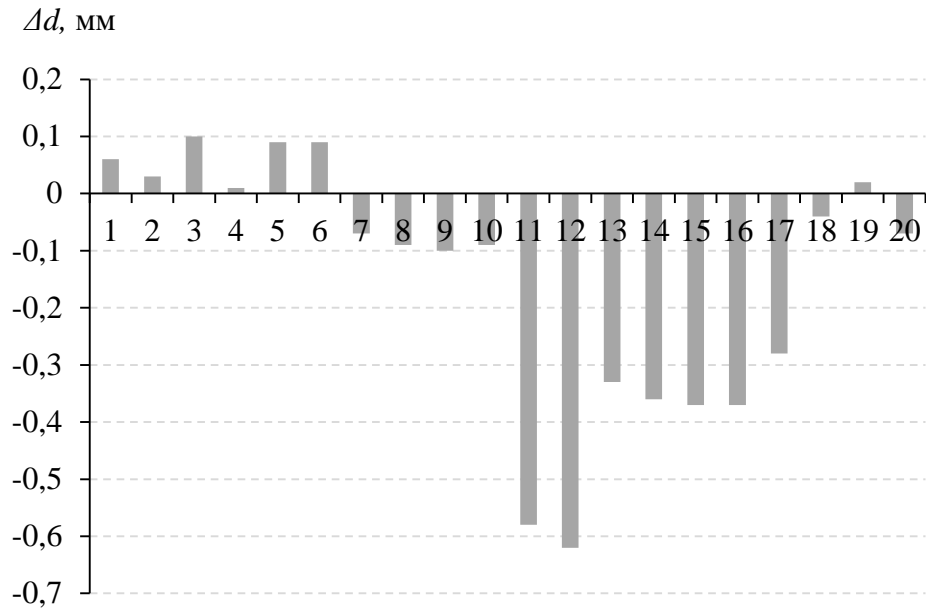


Рисунок 3.7 – Изменение диаметров по сечениям

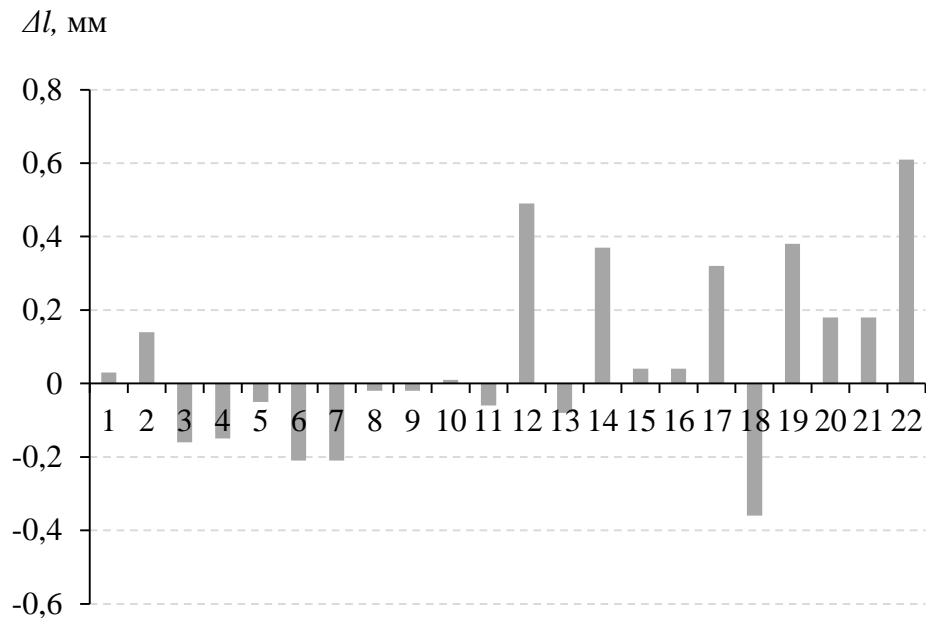


Рисунок 3.8 – Изменение расстояния между рисками по сечениям

Риски по длине по участкам после растяжения (наносились большим ШЦ). Измерение диаметра по линии с торца. Метки пронумерованы. Расстояние резьбы левая – 37,11, правая – 36,11 мм. Длина рабочего участка 245 мм. Общая длина 318 мм. После растяжения – 320,5 мм. Перемещение по меткам на направляющих – 19 мм. Удлинение образца по индикатору (0,01 мм) – 3,8 мм.

Таблица 3.2 – Результаты замеров образца

Участок	Диаметр до, мм	Диаметр после, мм	Расстояние между рисками, мм	Оценка расстояния по калибровке, мм
1	14,09	13,85	11,42	11,39
2	14,07	13,89	11,94	11,7 (65)
3	13,89	13,16	11,10	10,9
4	13,84	13,82	10,81	10,9
5	13,85	13,73	10,52	10,7
6	13,7	13,72	10,58	10,68
7	13,72	13,53	11,04	10,68
8	13,71	13,57	11,06	10,9
9	13,71	13,83	9,98	11,19
10	13,72	13,62	10,54	10,56
11	13,75	13,66	10,54	10,8
12	13,65	13,54	10,54	10,9
13	13,67	13,69	11,01	11,09
14	13,66	13,7	9,86	10,92
15	13,73	13,52	10,49	10,3
16	13,72	13,58	10,49	10,97
17	13,70	13,56	10,99	10,96
18	13,72	13,7	10,40	11,09
19	13,70	13,65	10,55	10,62
20			10,79	

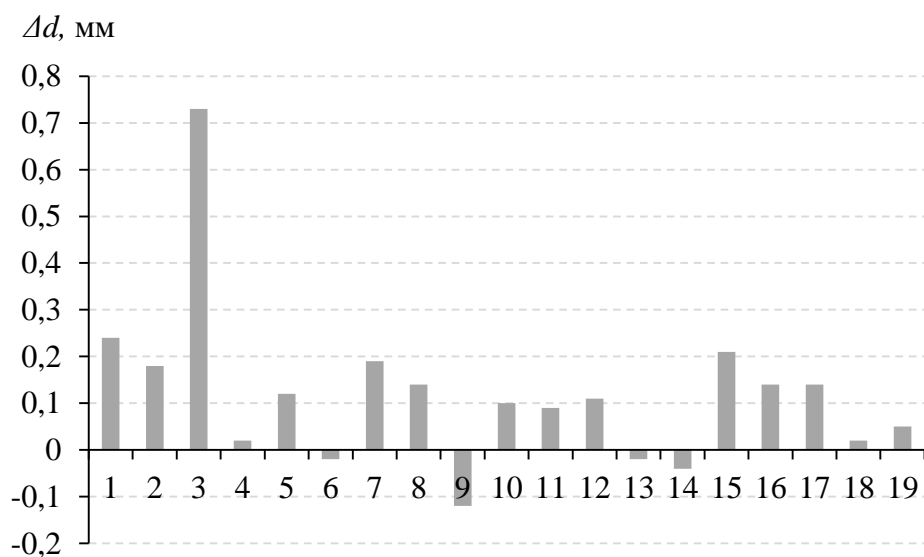
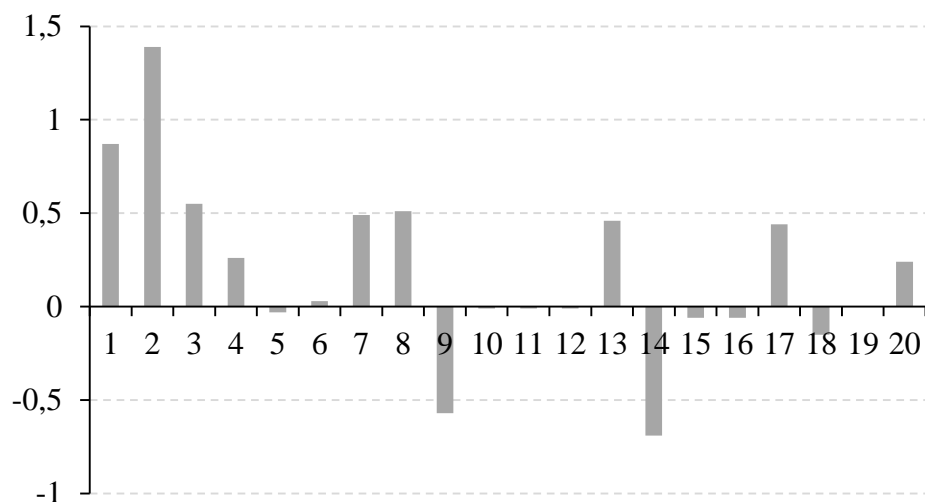
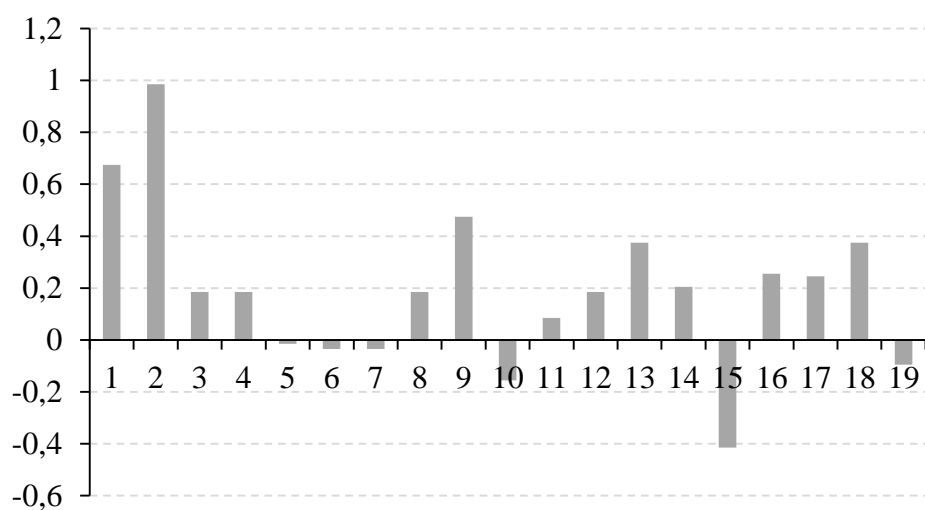


Рисунок 3.9 – Изменение диаметров по сечениям



Δl , мм

а



б

а – первый столбец; б – второй столбец

Рисунок 3.10 – Изменение расстояния между рисками по сечениям

3.3 Обработка результатов методами цифровой корреляции изображений

На рисунке 3.11 показано окно программы расчета смещений и деформаций по изображениям образца, растягиваемого при правке растяжением с нагревом.

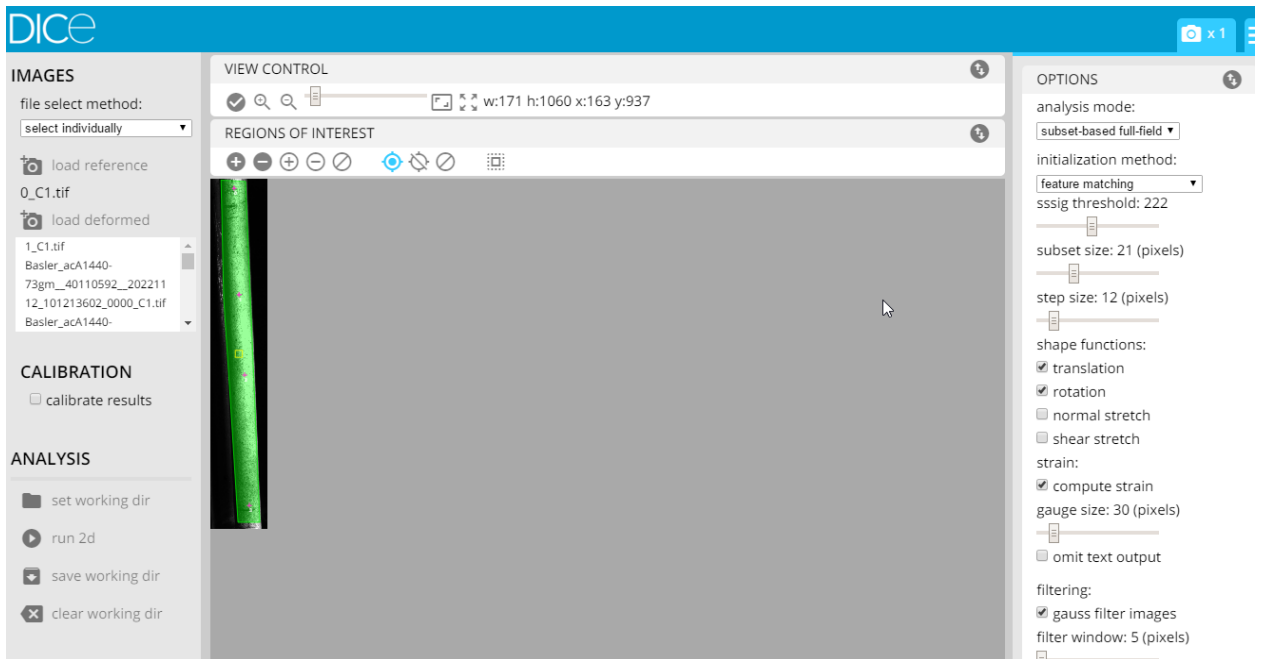


Рисунок 3.11 – Окно программы DICE (digital image correlation engine) с выбором области анализа на образце и параметров расчета (колонка справа)

На рисунках 3.12-3.18 показаны результаты расчета продольных, поперечных смещений, поворотов, напряжений, поперечной, сдвиговой и продольной деформаций.

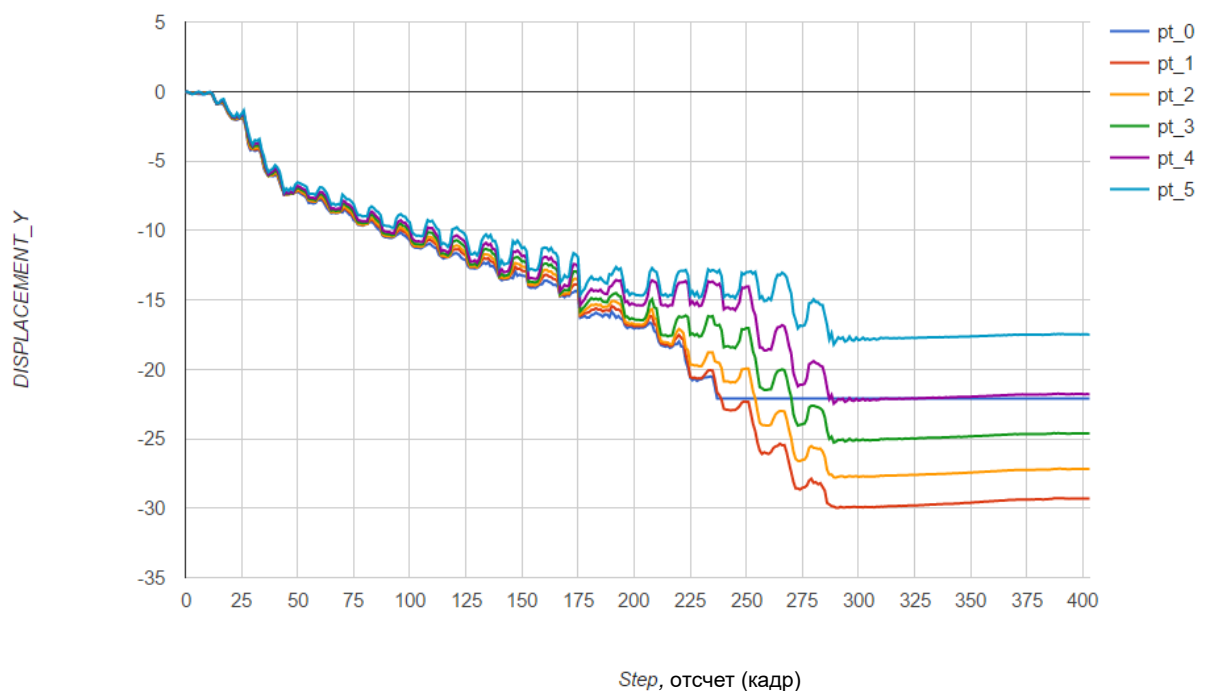


Рисунок 3.12 – Результаты расчета продольных смещений по контрольным точкам, указанным в области анализа

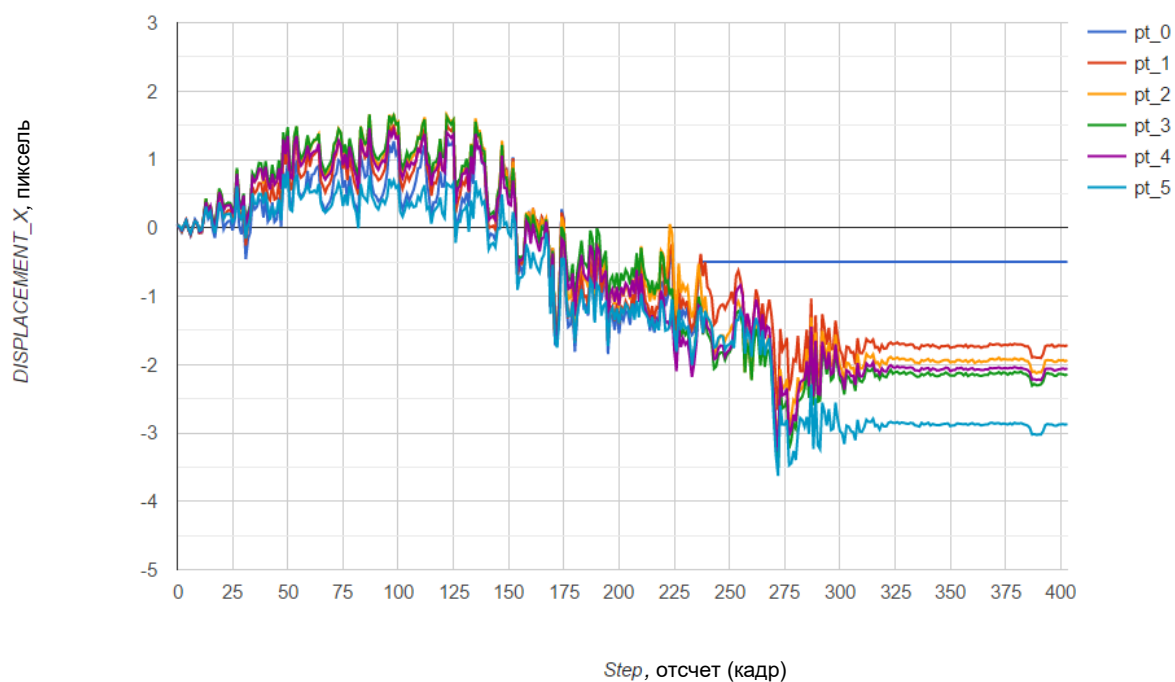


Рисунок 3.13 – Результаты расчета поперечных смещений по контрольным точкам, указанным в области анализа

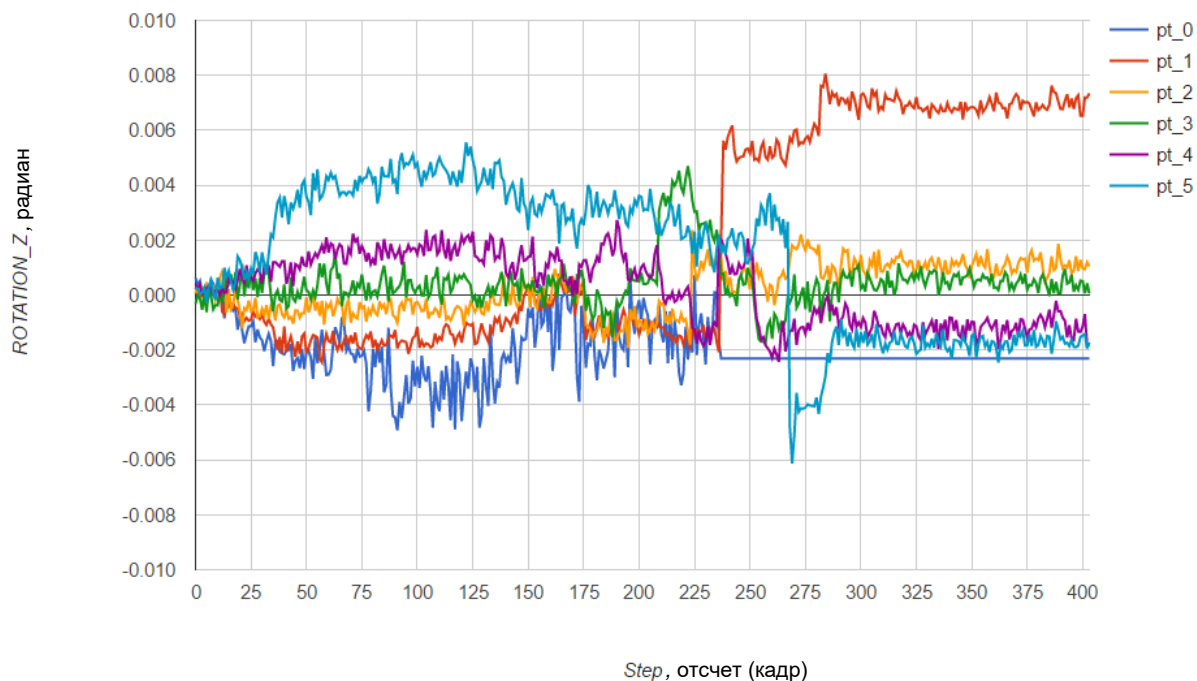


Рисунок 3.14 – Результаты расчета поворота по контрольным точкам, указанным в области анализа

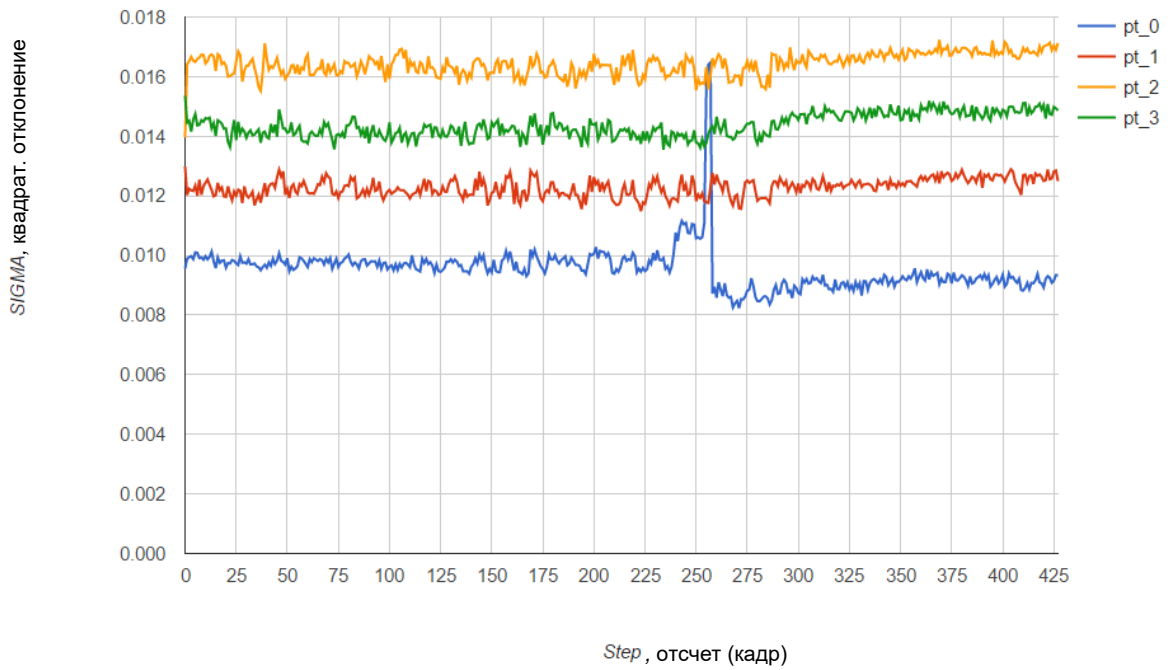


Рисунок 3.15 – Результаты расчета напряжений по контрольным точкам, указанным в области анализа

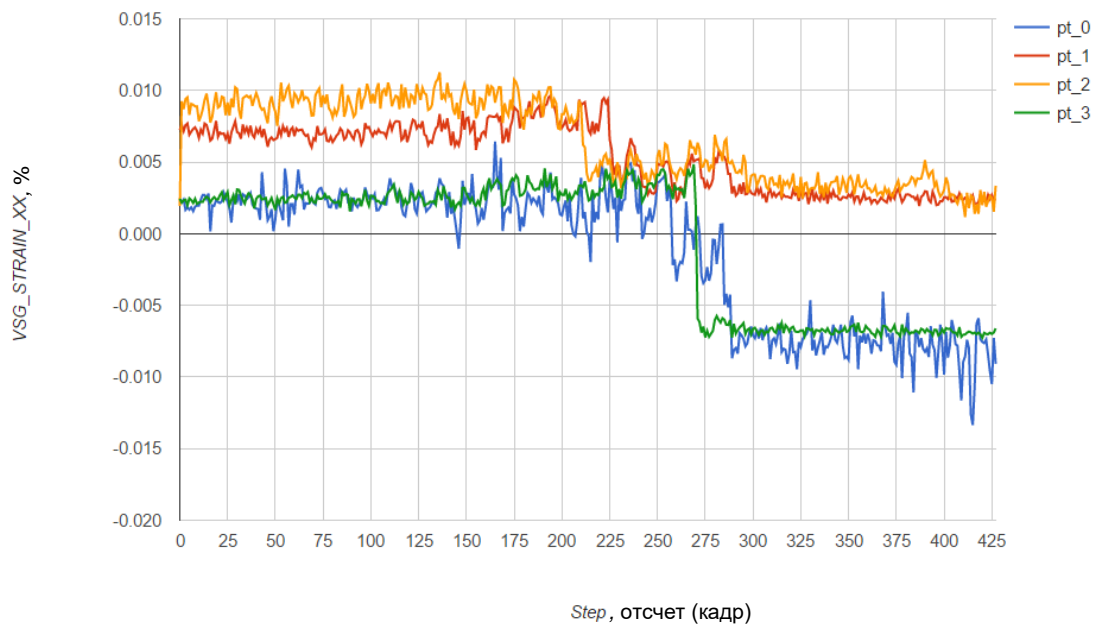


Рисунок 3.16 – Результаты расчета поперечных деформаций по контрольным точкам, указанным в области анализа

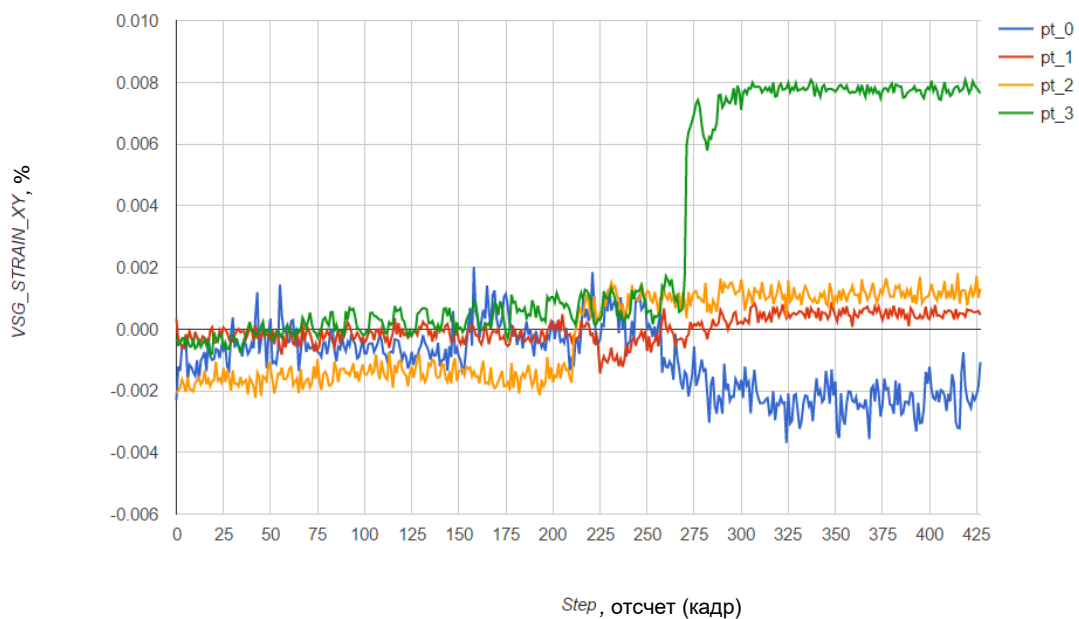


Рисунок 3.17 – Результаты расчета сдвиговых деформаций по контрольным точкам, указанным в области анализа

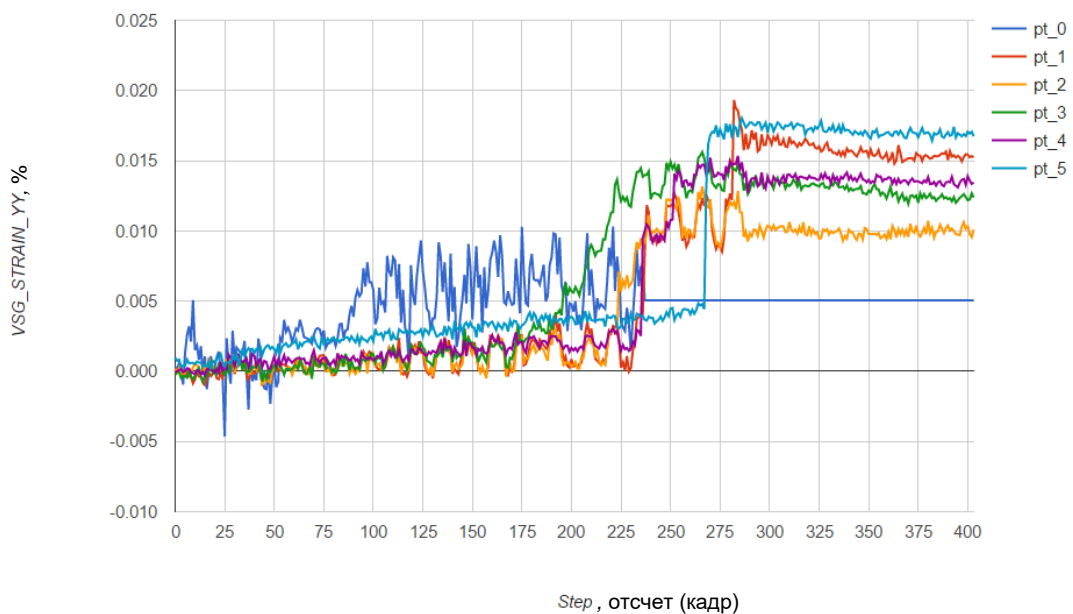


Рисунок 3.18 – Результаты расчета продольных деформаций по контрольным точкам, указанным в области анализа

На рисунках 3.19 и 3.20 показаны результаты вычисления деформаций по 10 точкам, распределенным вдоль оси образца.

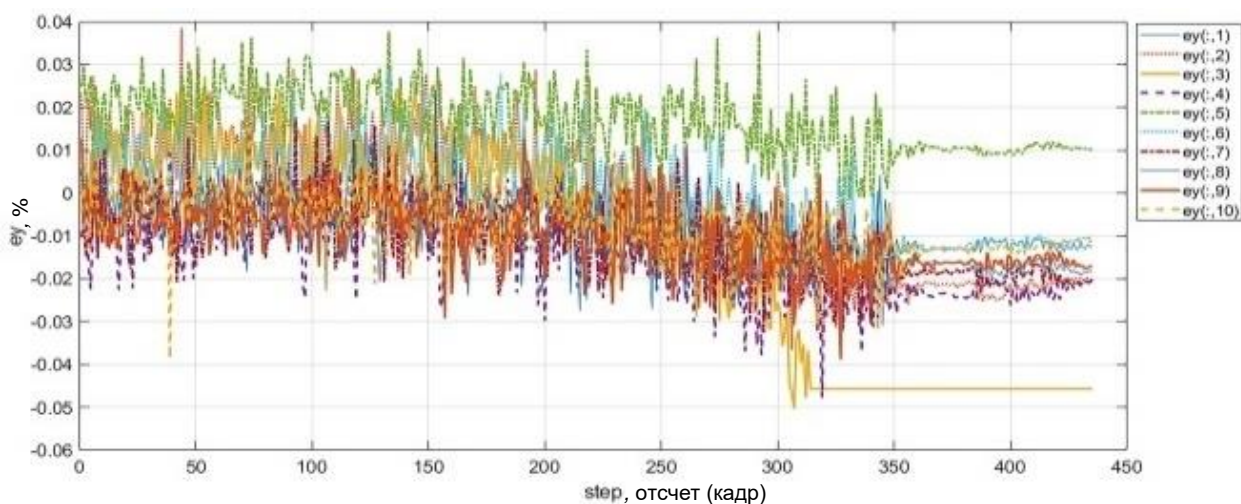


Рисунок 3.19 – Результаты расчета поперечных деформаций по контрольным точкам, указанным в области анализа (графики точек отобранные для анализа)

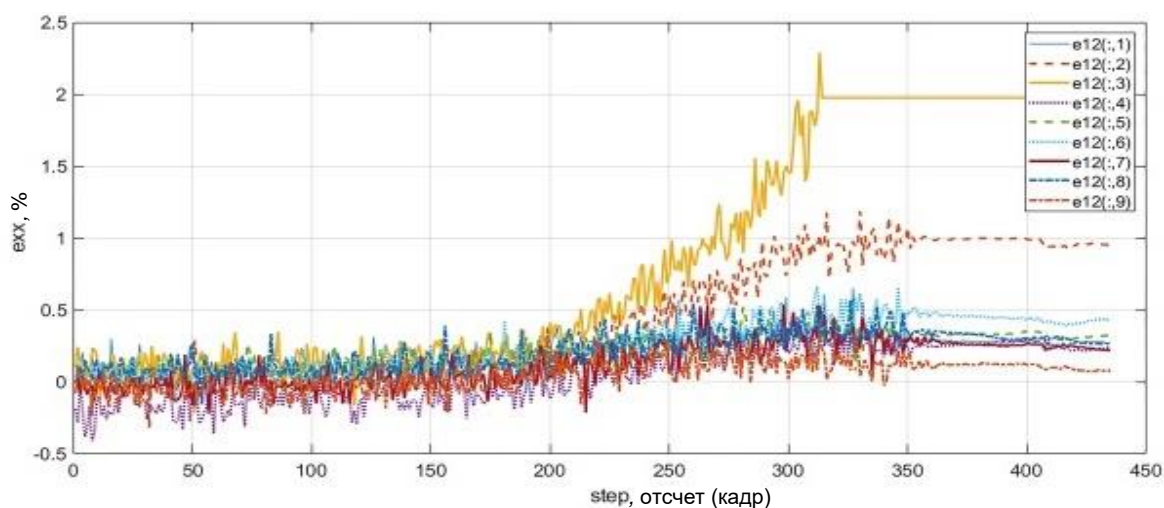


Рисунок 3.20 – Результаты расчета продольных деформаций по контрольным точкам, указанным в области анализа (графики точек отобранные для анализа)

Результаты расчета данных, полученных съемкой с телефона, представлены на рисунках 3.21-3.22. Как видно из графиков при более затемненной съемке образца с темным спеклом, результат расчета получается более зашумленным.

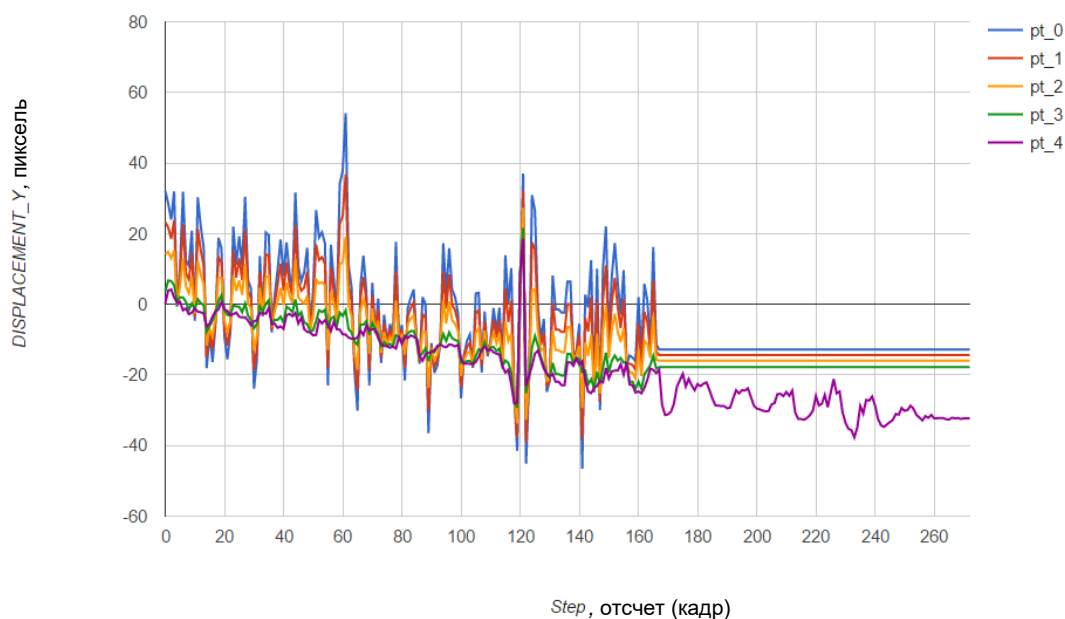


Рисунок 3.21 – Результаты расчета продольных смещений по контрольным точкам, указанным в области анализа

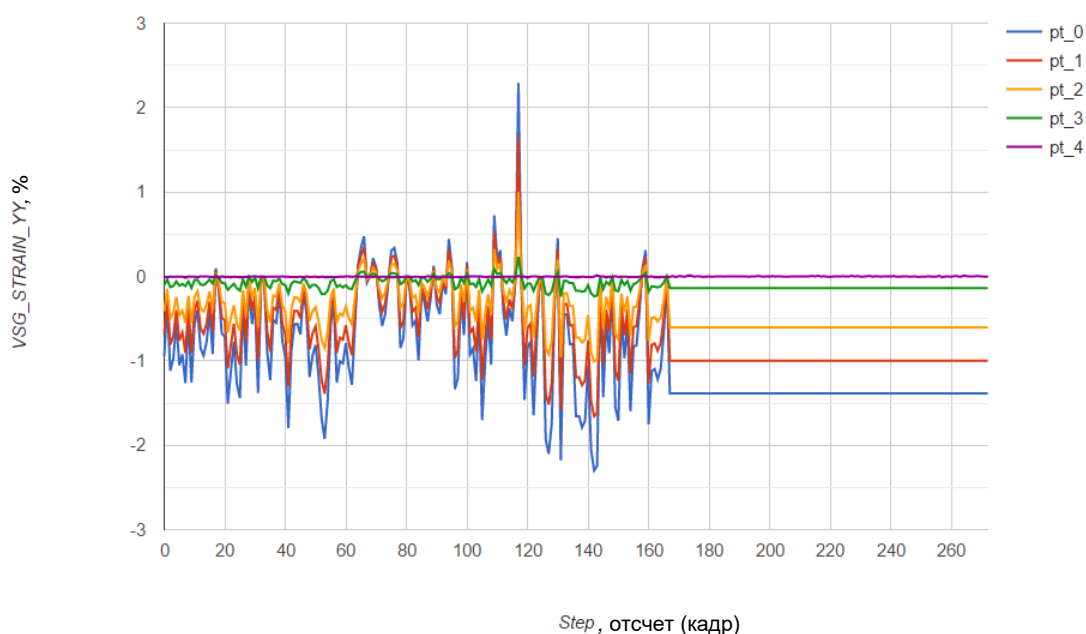


Рисунок 3.22 – Результаты расчета продольных деформаций по контрольным точкам, указанным в области анализа

На рисунках 3.23-3.24 представлена фиксация изображений образцов для определения расстояния между рисками. Для приведения изображений к масштабу использовались мерительные угольники. Дополнительно

используется методика ручного контроля растяжения образца дискретно, по участкам с использованием штангенциркуля, а также измерение деформаций по рискам по изображениям образца до и после нагружения.

Методика позволяет получить двухмерные и одномерные зависимости распределения деформаций по направлениям – осевые и поперечные в заданных точках.



Рисунок 3.23 – Образец_1 после обработки (1)

Измерения расстояний между рисками проводилось с использованием Image Viewer. Обработка результатов проводилась методами цифровой корреляции изображений в программе DICe на основе подготовленных предварительно серий последовательных изображений образца, полученных при его деформировании для расчета смещений и деформаций по изображениям образца.

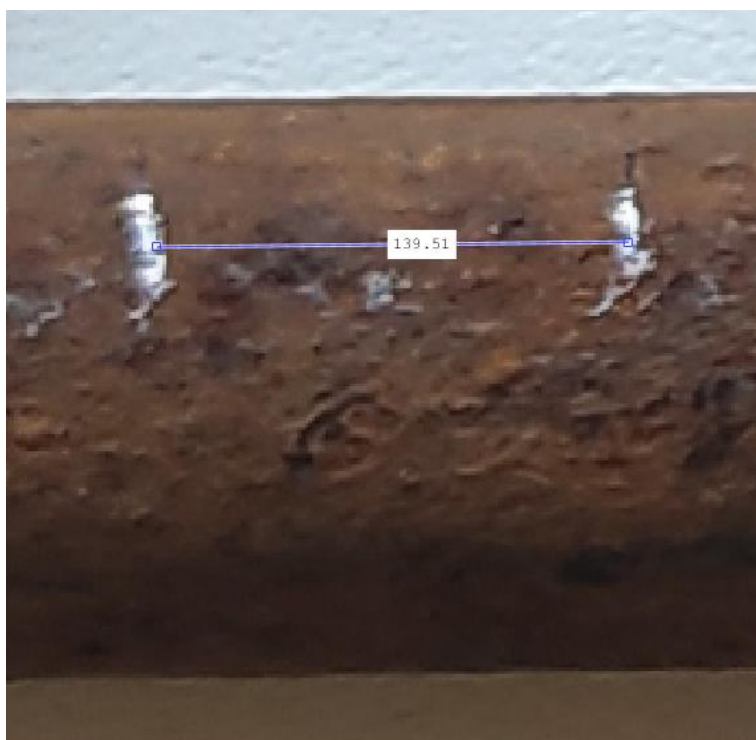


Рисунок 3.24 – Измерение риски с использованием Image Viewer



Рисунок 3.25 – Масштабирование при измерении риски

Для фиксации общего удлинения образец выставлялся вертикально (индикатор выводился на 0). После растяжения он подставлялся под ножку индикатора (ход 10 мм с точность 0,01 мм) – рисунок 3.26.



Рисунок 3.26 – Контроль удлинения образца для образца

Рисунки с изображением поверхности образца после обработки методом цифровой корреляции изображения и визуализации полей смещений и деформаций в программе ParaView.

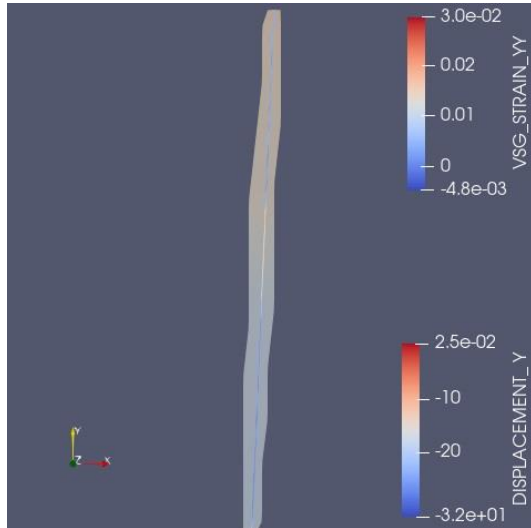
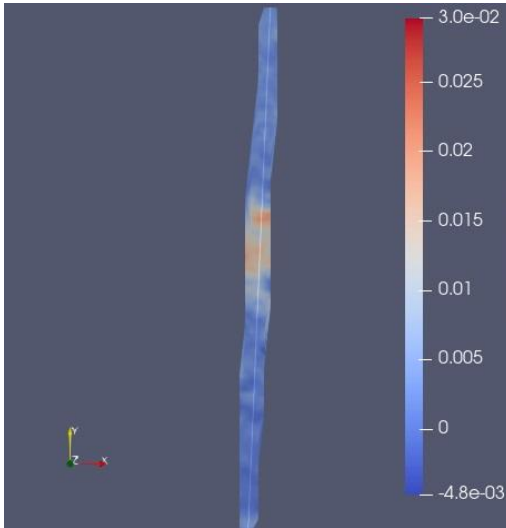

Результаты обработки изображений деформируемого образца (на кадрах с 204 по 291) в таблице 3.3.

Использование методов оптического контроля обеспечивает наглядную визуализацию процессов деформации, протекающих в процессе нагружения.

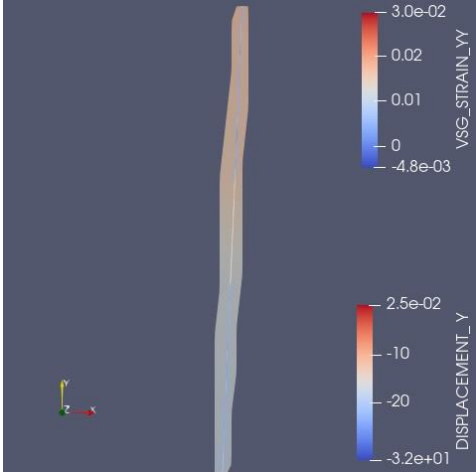
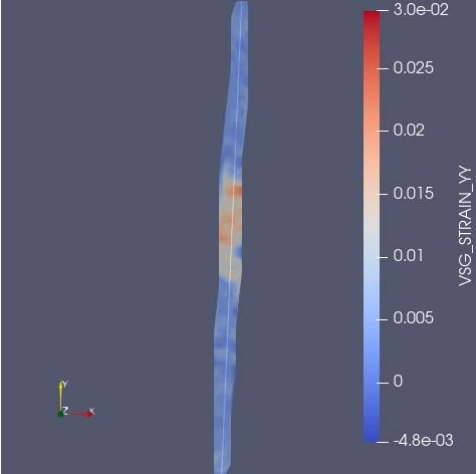
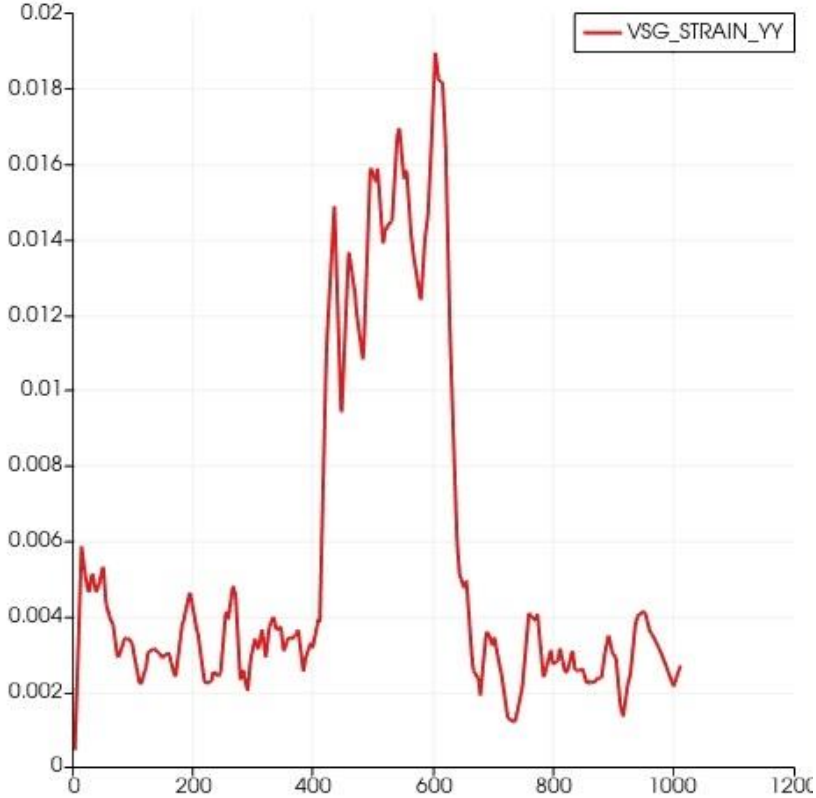
Таблица 3.3 – Результаты расчета

Номер кадра	Поле смещения по вертикали	Поле осевой деформации
204		
<p>График осевой деформации</p> <p>Ось X – Точки отсчета, мм ($\times 0,25$)</p> <p>Ось Y – ϵ, %</p>		
212		

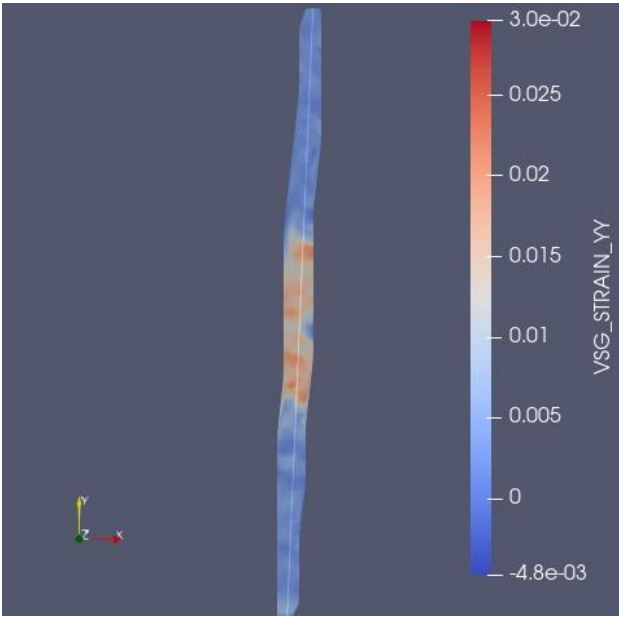
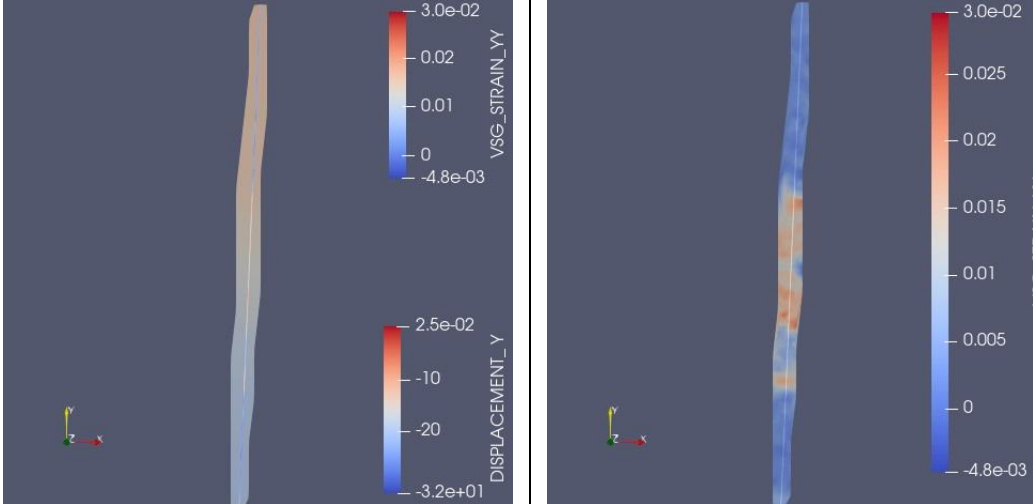
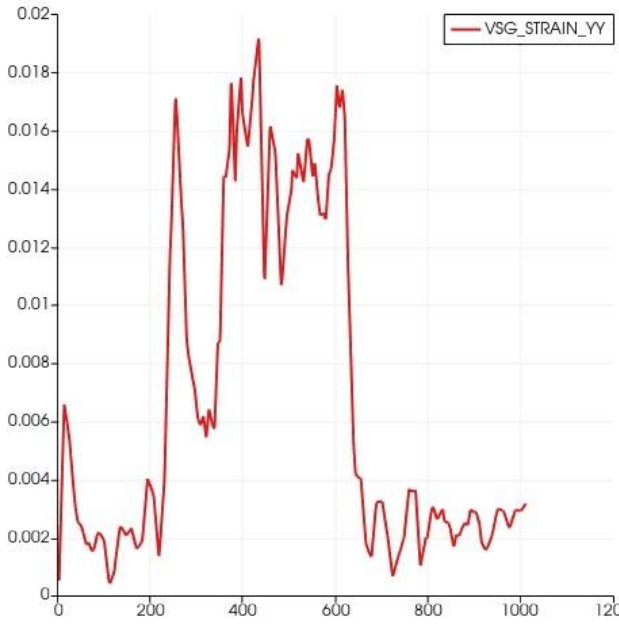
Продолжение таблицы 3.3 – Результаты расчета

Номер кадра	Поле смещения по вертикали	Поле осевой деформации
<p>График осевой деформации</p> <p>217</p>		
<p>График осевой деформации</p> <p>Ось X – Точки отсчета, мм (×0,25)</p> <p>Ось Y – ε, %</p>		

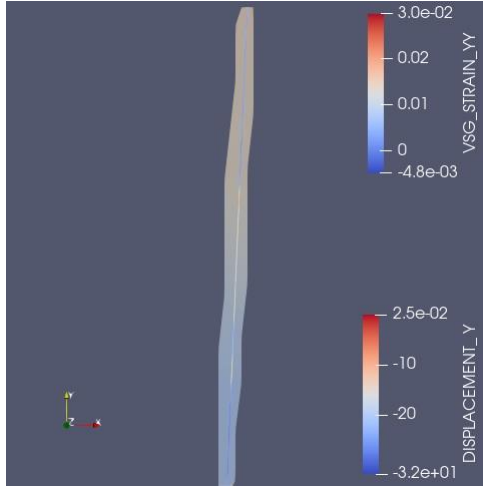
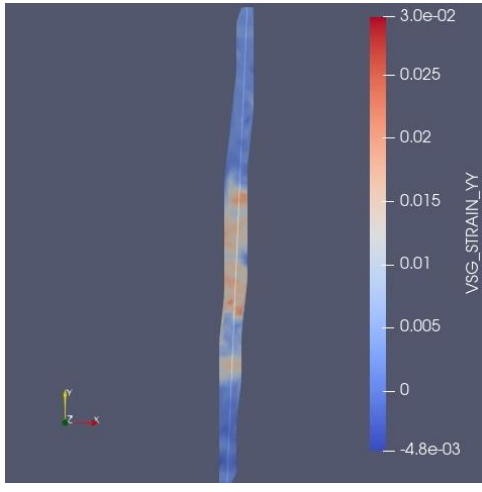

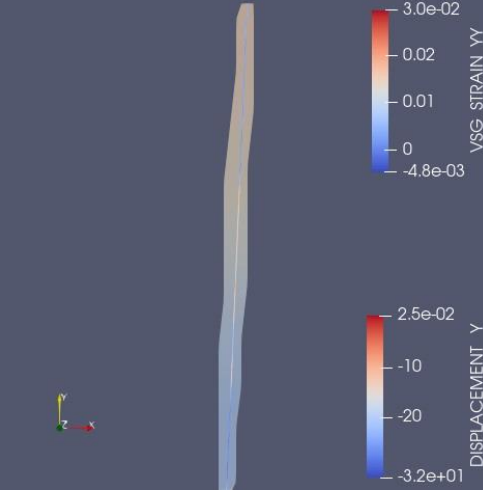
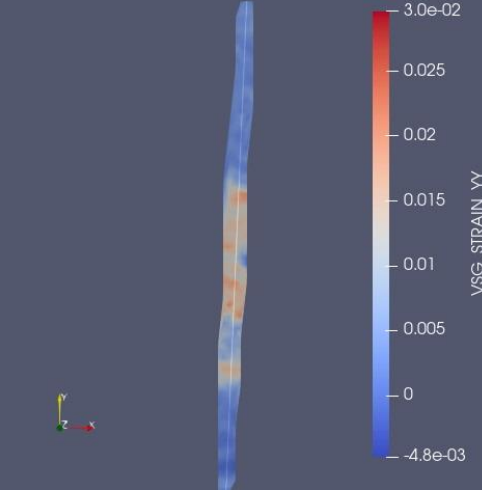
Продолжение таблицы 3.3 – Результаты расчета

Номер кадра	Поле смещения по вертикали	Поле осевой деформации
223		
<p>График осевой деформации</p> <p>Ось X – Точки отсчета, мм ($\times 0,25$)</p> <p>Ось Y – ϵ, %</p>		

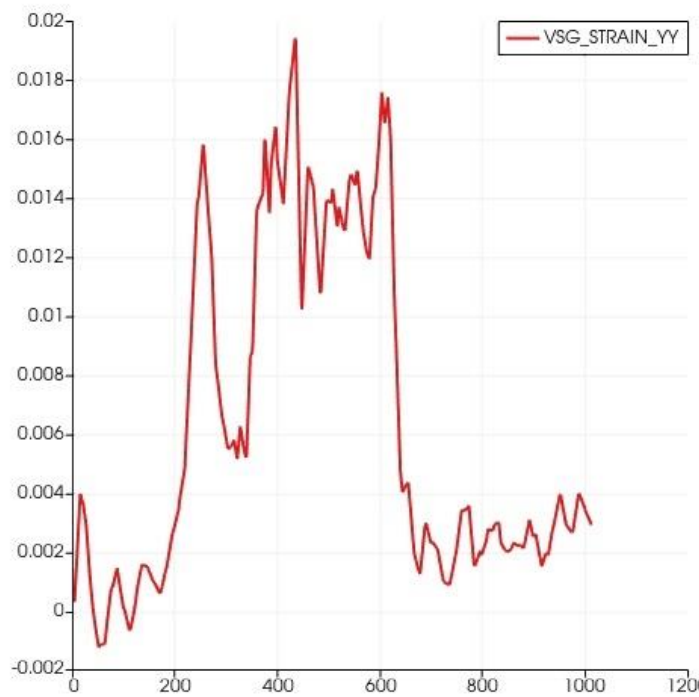
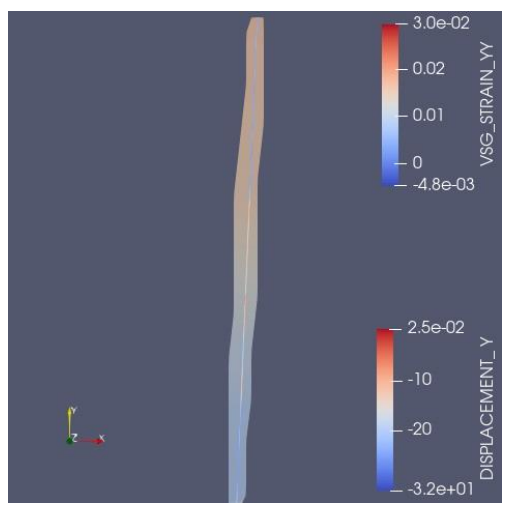
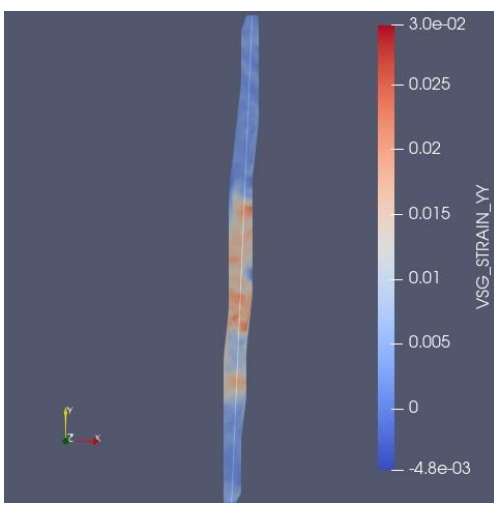
Продолжение таблицы 3.3 – Результаты расчета

Номер кадра	Поле смещения по вертикали, поле осевой деформации
224	
225	
<p>График осевой деформации</p> <p>Ось X – Точки отсчета, мм ($\times 0,25$)</p> <p>Ось Y – ε, %</p>	

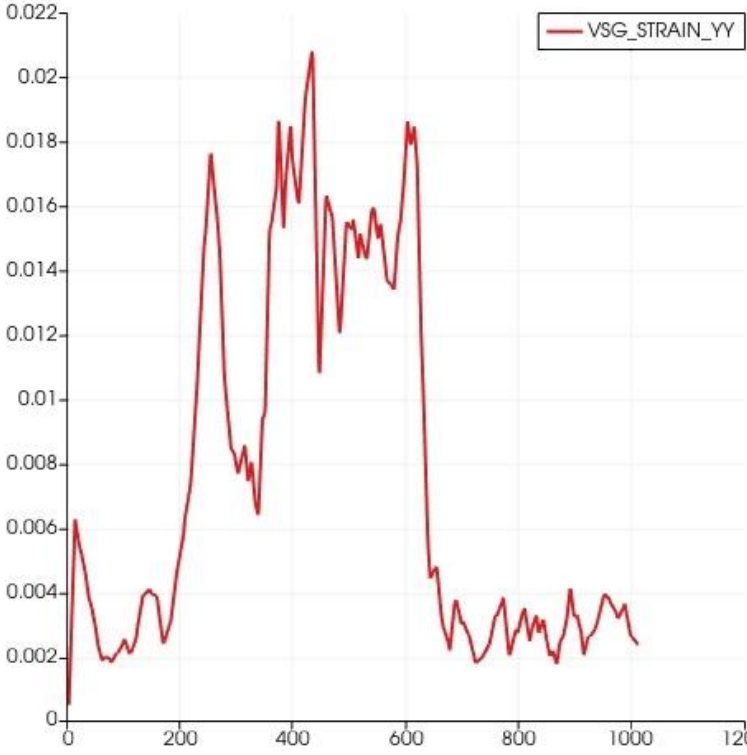
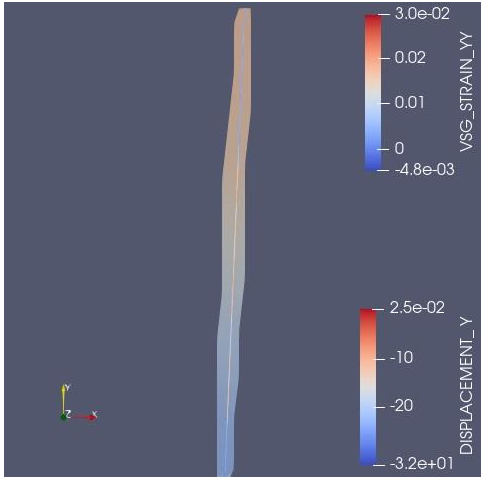
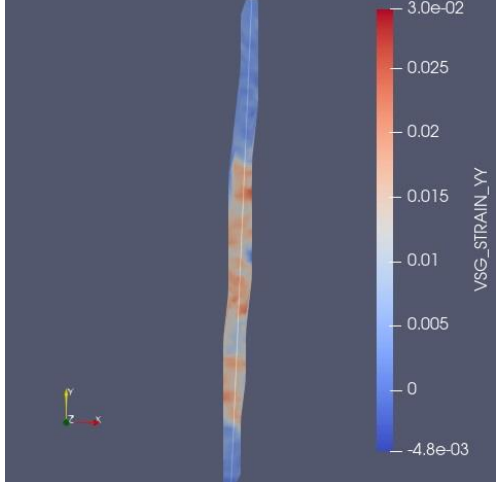
Продолжение таблицы 3.3 – Результаты расчета

Номер кадра	Поле смещения по вертикали	Поле осевой деформации
228		
<p>График осевой деформации</p> <p>Ось X – Точки отсчета, мм ($\times 0,25$)</p> <p>Ось Y – ε, %</p>		
232		


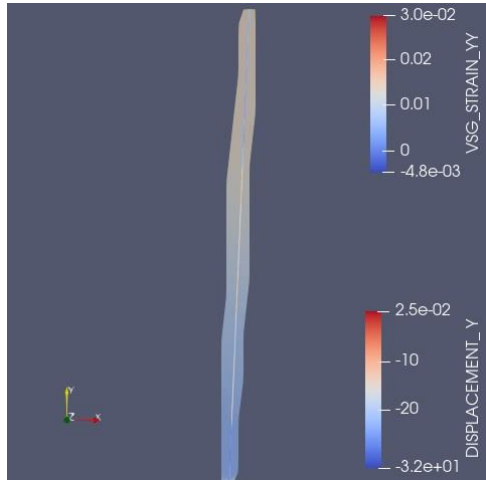
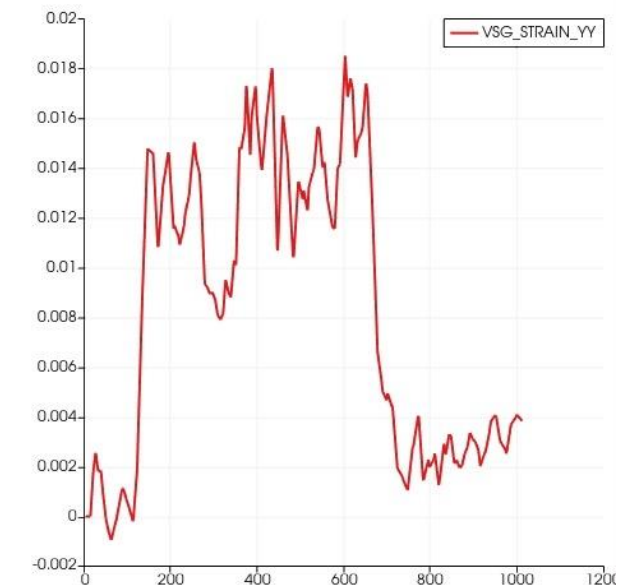
Продолжение таблицы 3.3 – Результаты расчета

Номер кадра	Поле смещения по вертикали, поле осевой деформации	
<p>График осевой деформации</p> <p>Ось X – Точки отсчета, мм ($\times 0,25$)</p> <p>Ось Y – ε, %</p>		
235		

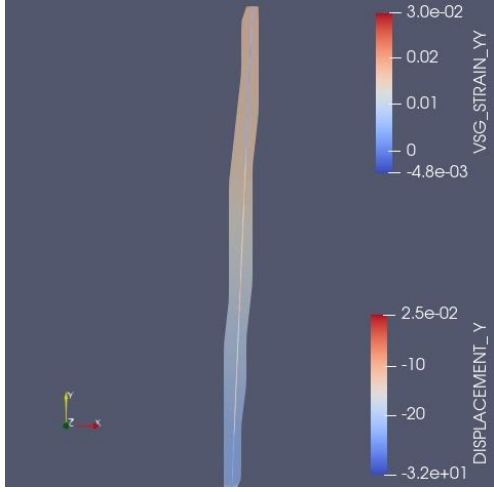
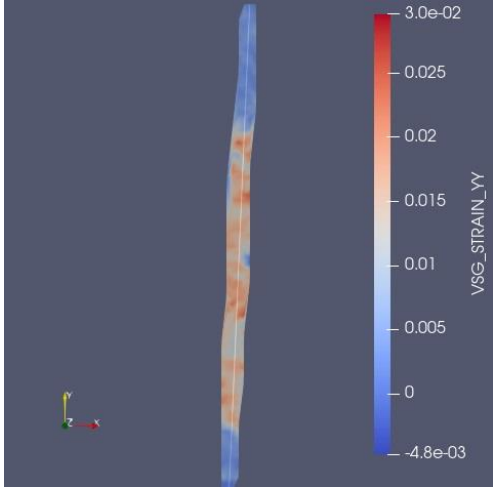
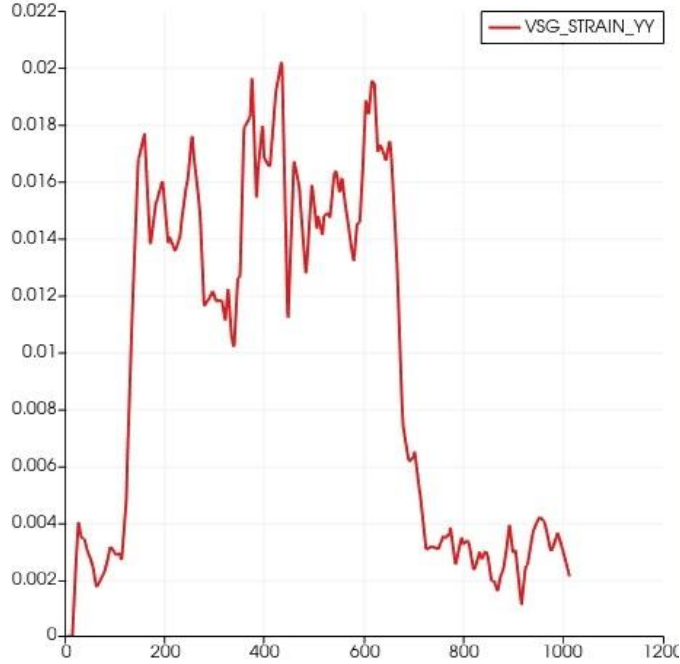
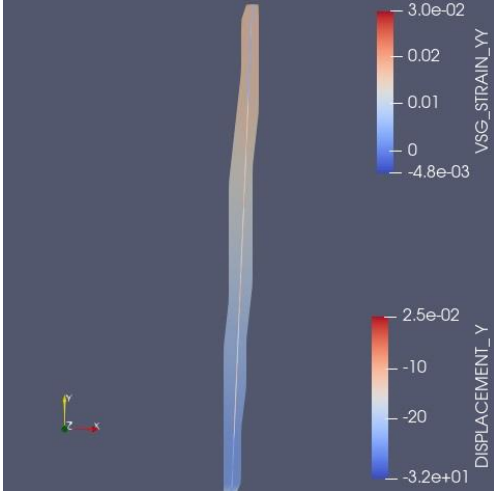
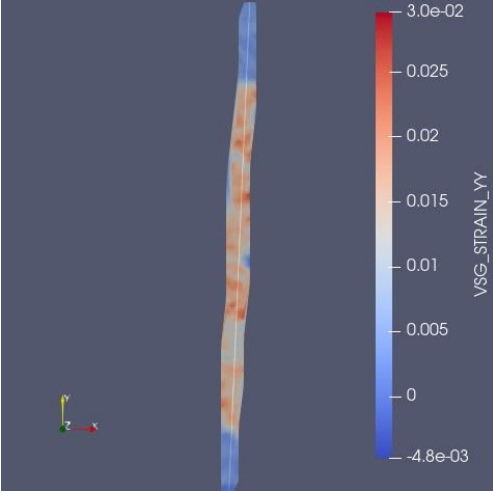
Продолжение таблицы 3.3 – Результаты расчета

Номер кадра	Поле смещения по вертикали, поле осевой деформации
<p>График осевой деформации</p> <p>Ось X – Точки отсчета, мм ($\times 0,25$)</p> <p>Ось Y – ε, %</p>	
<p>239</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="451 1137 933 1617">  </div> <div data-bbox="981 1137 1479 1617">  </div> </div>


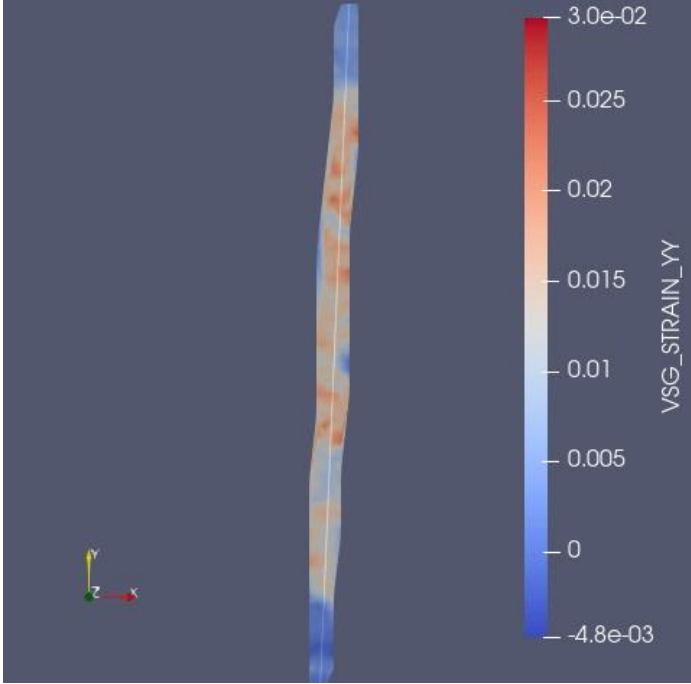
Продолжение таблицы 3.3 – Результаты расчета

Номер кадра	Поле смещения по вертикали, поле осевой деформации	
<p>График осевой деформации</p> <p>Ось X – Точки отсчета, мм ($\times 0,25$)</p> <p>Ось Y – ε, %</p>		
<p>241</p>		<p>-</p>
<p>График осевой деформации</p> <p>Ось X – Точки отсчета, мм ($\times 0,25$)</p> <p>Ось Y – ε, %</p>		

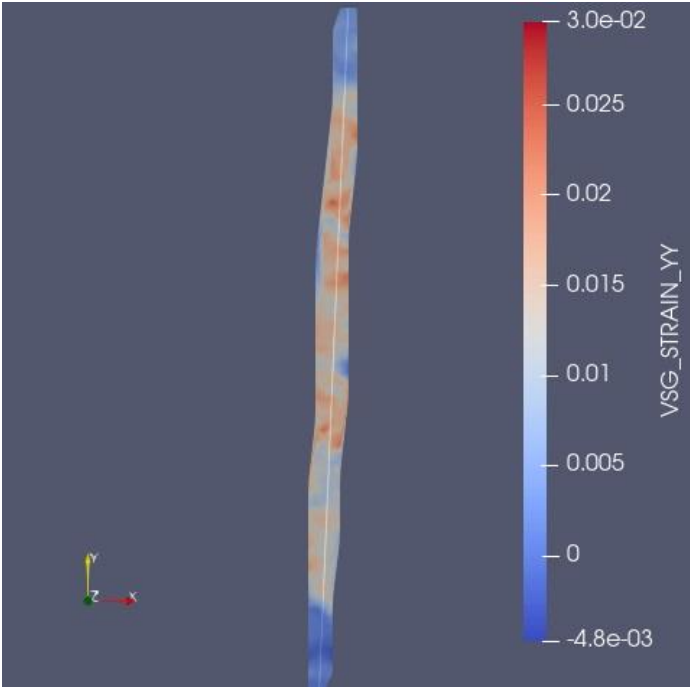
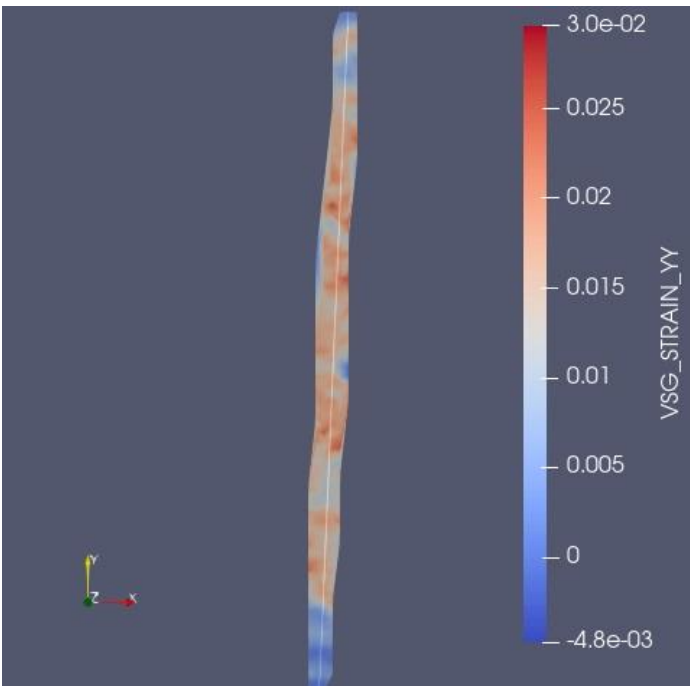
Продолжение таблицы 3.3 – Результаты расчета

Номер кадра	Поле смещения по вертикали	Поле осевой деформации
250		
<p>График осевой деформации</p> <p>Ось X – Точки отсчета, мм (×0,25)</p> <p>Ось Y – ε, %</p>		
254		

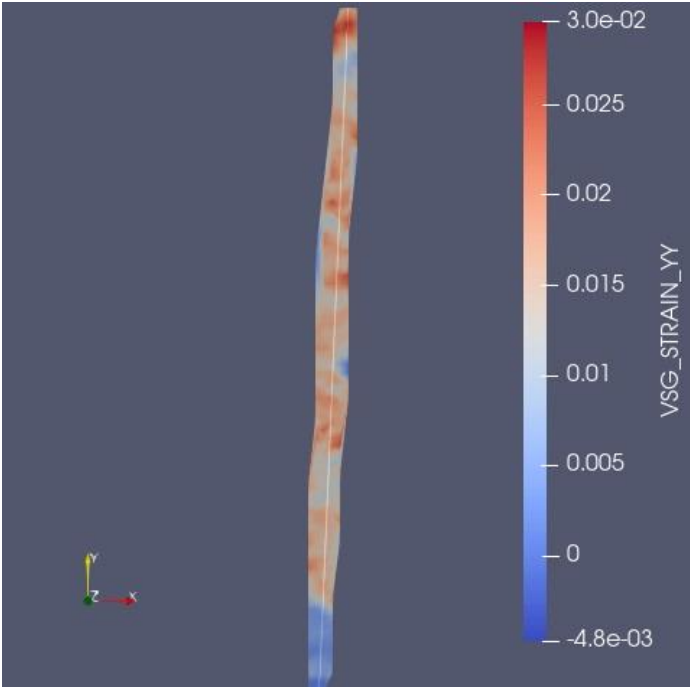
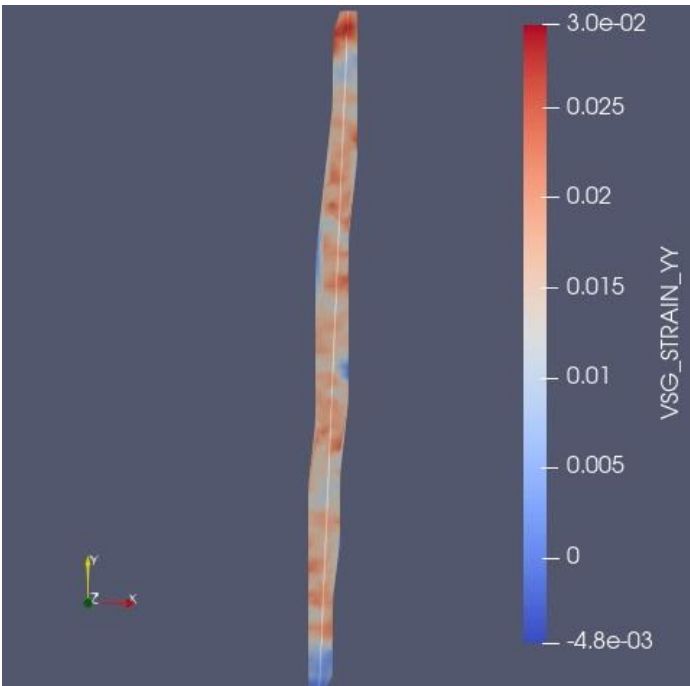
Продолжение таблицы 3.3 – Результаты расчета

Номер кадра	Поле смещения по вертикали, поле осевой деформации
<p>График осевой деформации</p> <p>Ось X – Точки отсчета, мм ($\times 0,25$)</p> <p>Ось Y – ε, %</p>	
257	

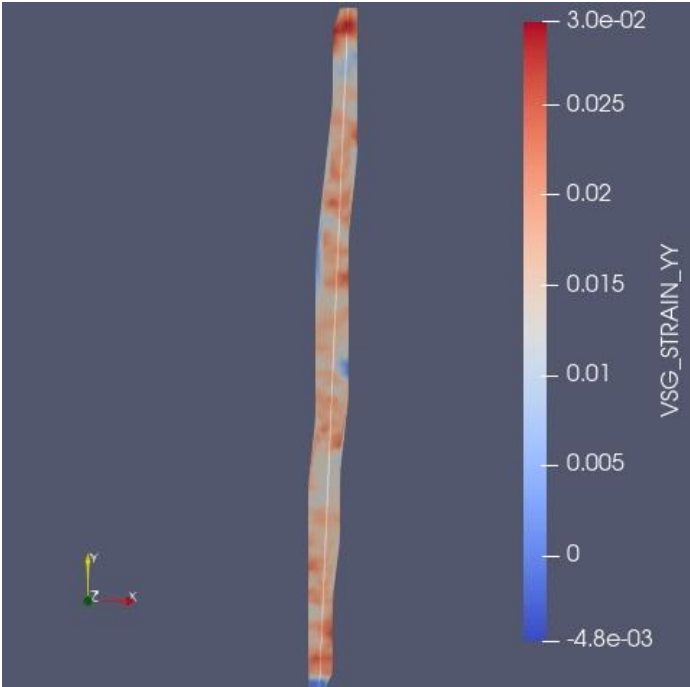
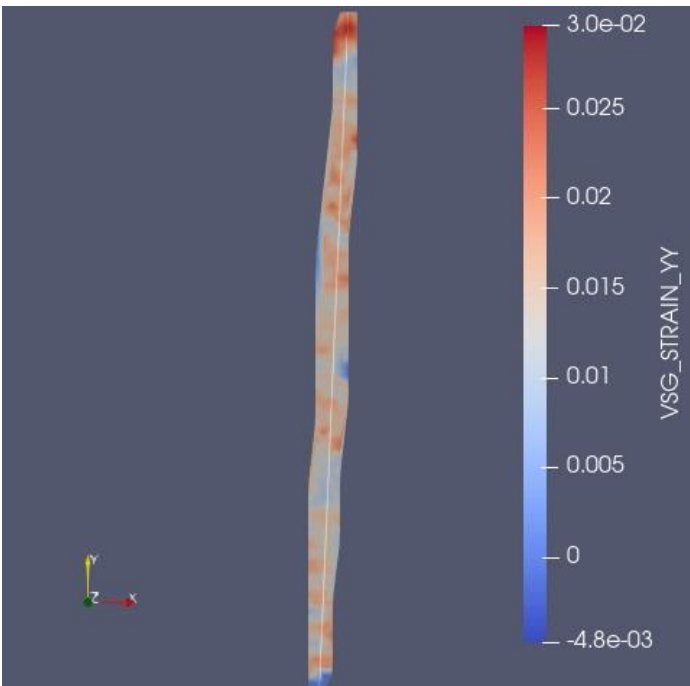
Продолжение таблицы 3.3 – Результаты расчета

Номер кадра	Поле смещения по вертикали, поле осевой деформации
260	
269	

Продолжение таблицы 3.3 – Результаты расчета

Номер кадра	Поле смещения по вертикали, поле осевой деформации
271	
283	

Продолжение таблицы 3.3 – Результаты расчета

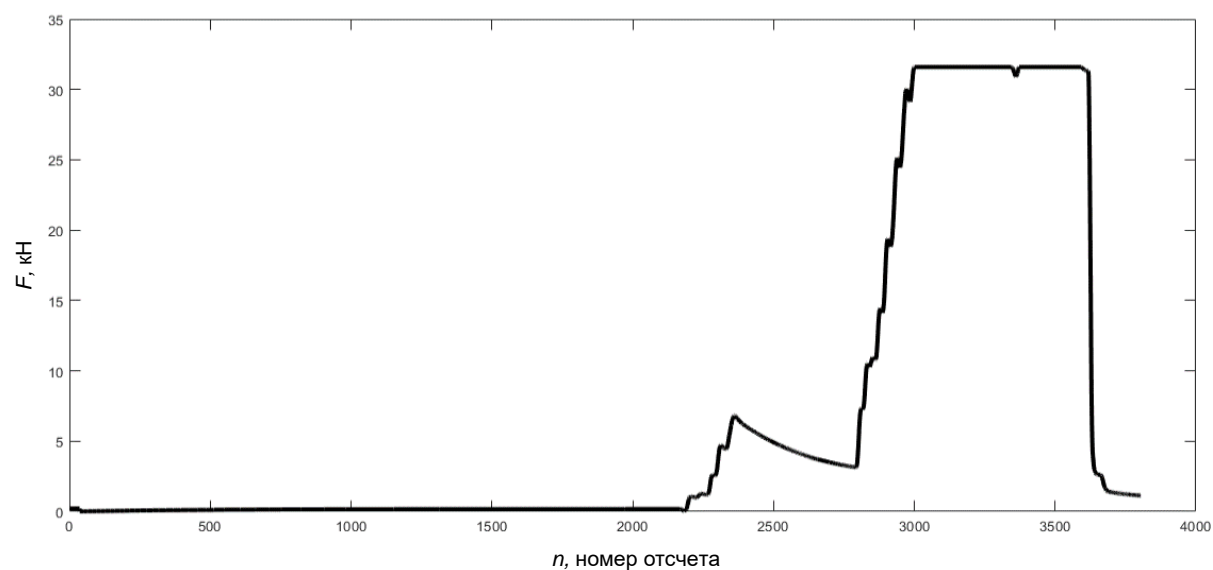
Номер кадра	Поле смещения по вертикали, поле осевой деформации
285	
291	

На графиках виден переход от локальной деформации в центре образца к общей деформации с возникновением все новых локальных зон деформаций. Они расширяются от центра заготовки к краям.

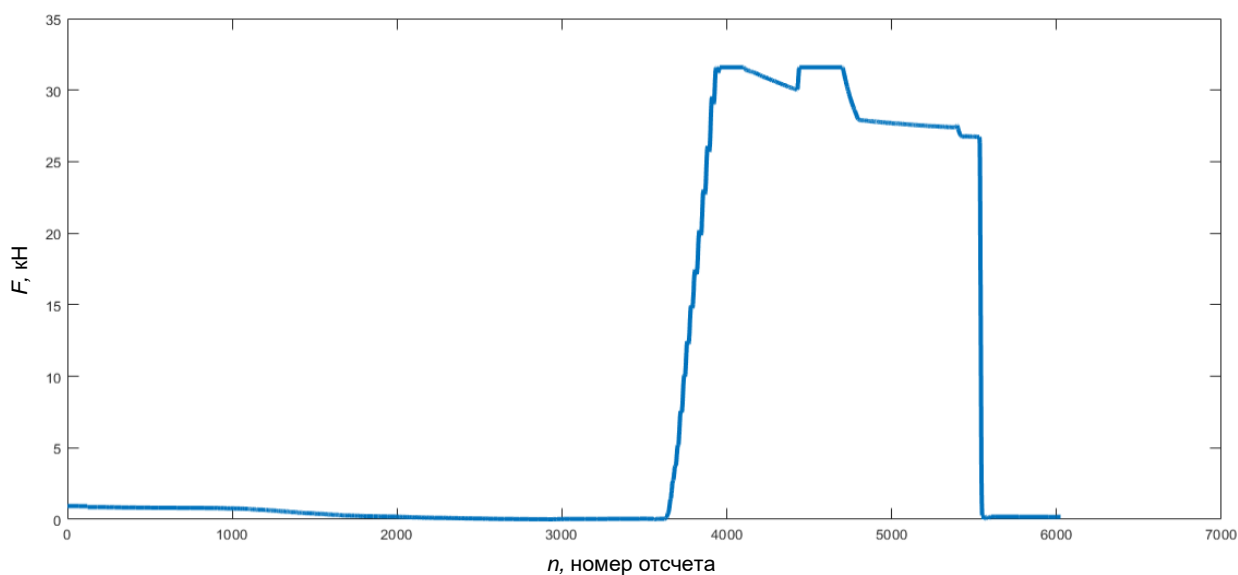
Полученные результаты свидетельствуют о волнообразном характере деформации, которая начинается локализовано. Далее распространяется

вдоль образца в виде дополнительных источников волнового характера к краям образцам, охватывая весь объем заготовки.

При записи величины силового нагружения тензоизмерительным датчиком получались зависимости, представленные на рисунке 3.27 и 3.28. Данный сигнал отражает неравномерность приложения силы из-за особенностей действия домкрата. У него нагрузка прикладывается ступенчато. Кроме этого ограничение по максимальной нагрузочной способности обрезало запись на предельных значениях (больше 4000 Н).



а



б

а – образец №1; б – образец №2

Рисунок 3.27 – Параметры силового нагружения

После формирования сигнала в виде разности соседних значений параметра силового нагружения и объединения полученных векторов в одну матрицу, полученный массив прогонялся через нейронную сеть LSTM типа для классификации полученных параметров, рисунки 3.29 и 3.30.

Данные по классификации зависят от дискретности полученного сигнала. Максимально точно классификация происходит при одинаковом дискретном отсчете получаемых значений для обучающей и тестовой выборок.

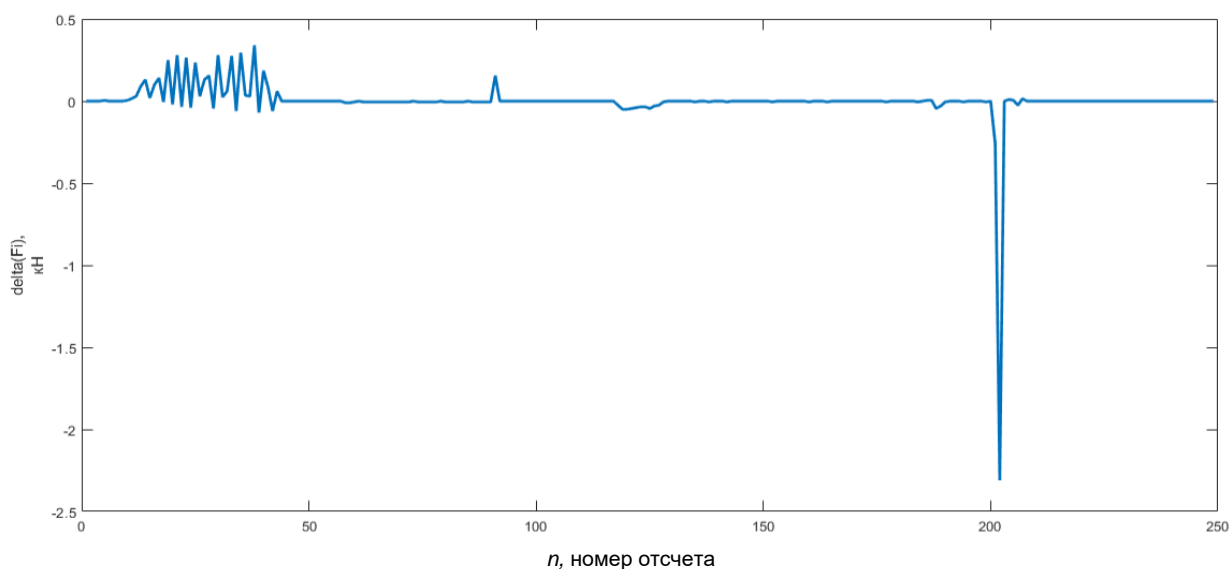


Рисунок 3.28 – Разность соседних значений для отсчетов с шагом 50 (500 мс)

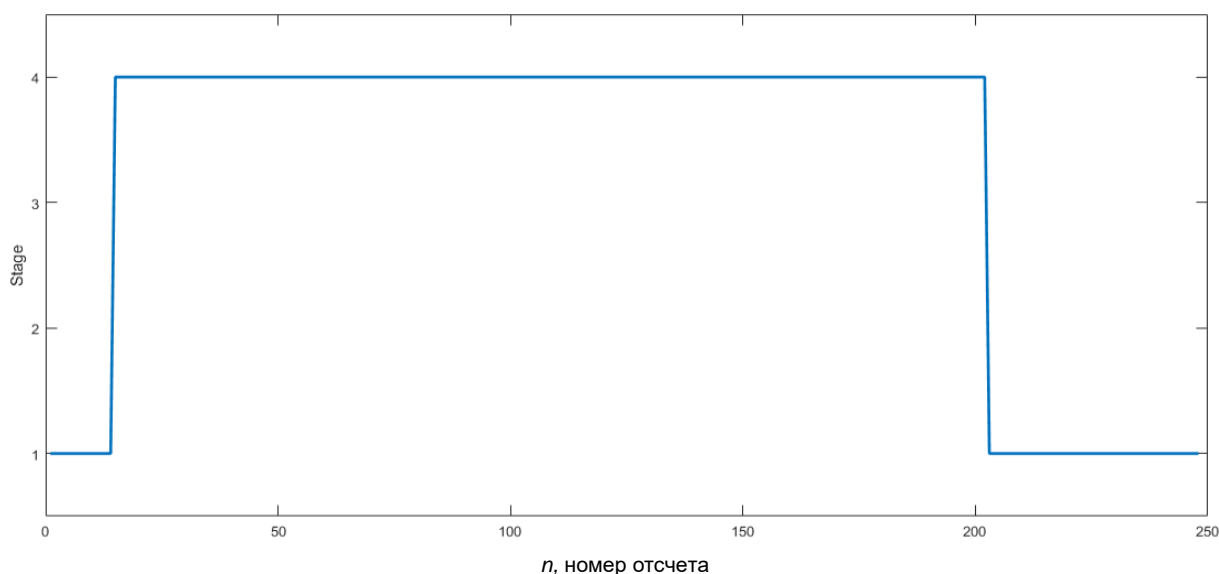


Рисунок 3.29 – Распознавание по стадиям нагружения параметров силового отсчета, взятого с шагом 10 (100 мс)

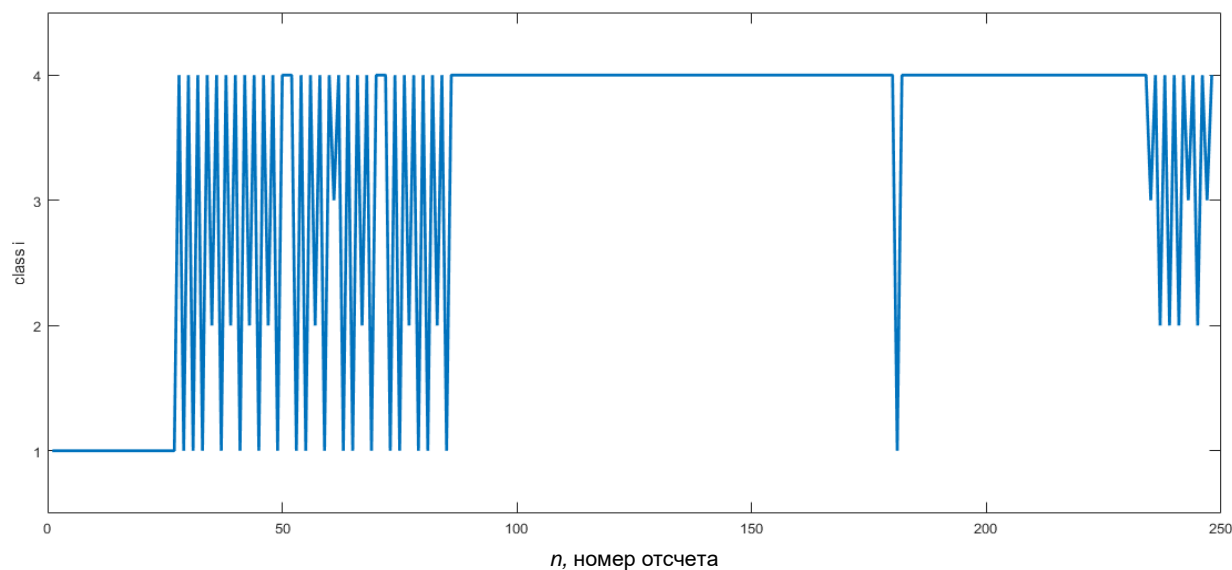


Рисунок 3.30 – Распознавание по стадиям нагружения параметров силового отсчета, взятого с шагом 50 (500 мс)

На рисунке 3.31, показаны результаты одиночного фотографирования образца в начальном положении, после окончания деформирования, после снятия разгрузки (полутоновые изображения). На последнем изображении расстояние уменьшилось на величину упругих деформаций. По замерам контрольных рисок можно определять в ручном режиме расстояние между ними (1,968%). Для измеренной базы 200 мм это соответствует 3,9 мм. Индикатор, настроенный на начальный размер, с погрешностью измерения 0,01 мм, определил удлинение образца в 3,8 мм.

Также на этом рисунке показан контур образца в начальном и конечном состоянии (черно-белое изображение). Из-за плохого контраста контур может выделиться с погрешностью, но по замерам можно определить относительную величину изменения размера – диаметра (0,25%).

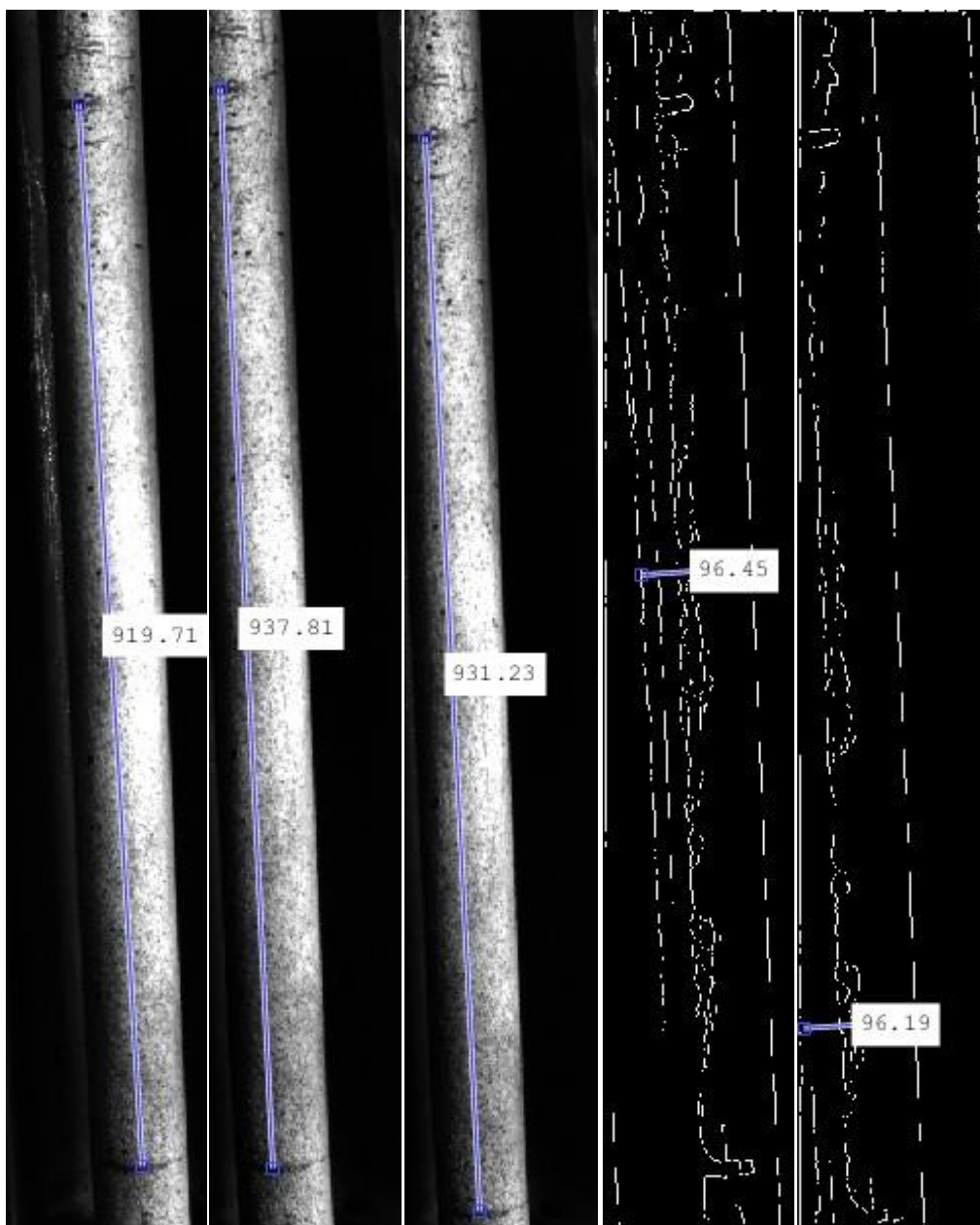


Рисунок 3.31 – Измерение рисок в рабочей зоне деформирования на образце

Выводы по главе 3

Представлен метод оптического контроля, тесно связанный с технологией контроля смещений, включая цифровую корреляцию изображений на основе компьютерного зрения. Разработана установка и методика регистрации деформаций по поверхности образца на длине заготовки до 350 мм (рабочая зона до 300 мм) на основе цифровой корреляции изображений.

Использование предложенной методики цифровой корреляции изображений с точностью контроля смещений до 0,025 мм на длине заготовки до 350 мм (рабочая зона до 300 мм), позволяет для открытого образца с использованием неконтактных методов нагрева производить съемку процесса растяжения с заданной точностью, с точки зрения обеспечения технологических требований к данной операции.

Дополнительно использовалась методика ручного контроля растяжения образца дискретно, по участкам с использованием штангенциркуля, а также измерением деформаций по рискам по изображениям образца до и после нагружения.

Методика позволяет получить двухмерные и одномерные зависимости распределения деформаций по направлениям (осевые и поперечные) в режиме реального времени.

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРАВКИ РАСТЯЖЕНИЕМ С НАГРЕВОМ НА ДЕФОРМАЦИЮ ЗАГОТОВОК

4.1 Технологические факторы влияющие на выбор параметров правки растяжением с нагревом

К входным параметрам правки растяжением с нагревом можно отнести как технологические параметры операции, так и параметры заготовки. К технологическим параметрам относятся характеристики деформации и температуры. Первая группа – эта величина деформации и ее скорость. Вторая группа – эта величина температуры при рабочем режиме термообработки (нормализации, отпуска или закалки), а также скорости нагрева и охлаждения заготовки. Деформационные характеристики могут быть связаны с температурным режимом непосредственно при обработке в стапеле, который создает силу нагружения. Или они могут изменяться независимо друг от друга в установках с отдельным силовым приводом нагружения и отдельным нагревательным элементом. Кроме этого есть временные параметры технологической правки растяжением с нагревом операции. Это время нагрева и охлаждения, которые связаны со скоростью нагрева и охлаждения. Данные параметры зависят от конструктивных особенностей стапеля, а также особенностей организации теплообмена с окружающей средой стапеля и заготовки. Технологическая операция три этапа: нагрев-нагружения, выстой и охлаждении-разгрузка. На втором этапе определяется размерами и материалам заготовки, видом термообработки. Поэтому при проектировании правки растяжением с нагревом необходимо учитывать и параметры заготовки, включая соотношение размеров длины l к диаметру d , а также исходную кривизну f_0 .

Из анализа [20] следует, что заготовка не может иметь исходную кривизну более 5 мм на метр длины. Это связано с тем, что при эксплуатации

таких валов, которые имеют требования по отклонению от прямолинейности на чертеже менее 0,02 мм на метр, коробление может привести к выходу за указанный предел и без применения дополнительных стабилизирующих операций (вибростабилизация, старение, термообработка) технология их изготовления не должна проектироваться [76, 83, 130].

Температурный диапазон, а также скорость нагружения, при которых действует линейная теория для процессов деформирования материалов, имеет ограниченное значение. Входные параметры, которые определяют результат нагружения при пластическом деформировании имеют сложное взаимодействие.

Основной недостаток правки растяжением с нагревом – осевая деформация протекает неравномерно вдоль оси заготовки. Основным технологическим параметром при этом – деформация, контроль которой является ключевым фактором, обеспечивающим эффективность правки растяжением с нагревом. Для обеспечения геометрической стабильности вдоль оси образца заготовки необходимо провести исследование распределения пластической деформации по участкам длинномерных заготовок с различной степенью деформации. Необходимо выполнить оценку равномерности деформирования по участкам заготовки с учетом того, на какой стадии зависимости напряжения-деформация находились образцы в конце цикла нагружения с точки зрения пяти стадийной теории кривой нагружения. На основе представлений о пластической деформации как автоволновом процессе необходимо выбрать диапазон технологических режимов, соответствующий максимально однородному распределению деформации вдоль оси заготовки с полной проработкой всего объема заготовки. Реологическое моделирование позволяет определять реперные точки на кривой нагружения, по которым можно отслеживать наступление той или иной стадии кривой пластического течения при различных параметрах нагружения, включая температуру. Для повышения надежности определения фактической деформации в производственных условиях

необходимо модернизировать способ контроля процесса правки растяжением с нагревом за счет фиксации деформации на ограниченном участке заготовки оптическим методом. Корректность данного подхода необходимо подтвердить статистическим анализом распределения деформаций по участкам для образцов. Использование предложенного способа контроля может обеспечить достижение максимально равномерного распределения пластической деформации за счет гарантированного выхода деформации заготовки в диапазон значений деформаций, соответствующий наиболее эффективной стадии кривой пластического течения для обеспечения равномерности пластического течения.

4.2 Обоснование выбора режимов правки растяжением с нагревом с точки зрения диагностики

Для обеспечения равномерности распределения пластических деформаций вдоль оси заготовки необходим их контроль и управление ими. Но в производственных условиях эта задача имеет сложности в реализации.

Контроль деформации заготовки по смещению захватов отличается не точностью. Величина фактической пластической деформации заготовки кроме влияния температурного фактора, трудно определима из-за большой контактной деформации в стыках между захватами и опорной поверхностью заготовки, а также общей деформации элементов силового контура для фиксации заготовки. Значительное влияние оказывает температурное воздействие (распределение температуры нагрева вдоль оси заготовки). Нагрев заготовки из-за особенностей подвода и отвода тепла происходит неравномерно, что определяет по длине заготовки переменные базовые температурно-зависимые параметры материала (модуль упругости, предел текучести).

Использование тензоизмерительной аппаратуры в производственных условиях при нагреве установке в печи является нерациональным и сложным

способом контроля. Контактные методы, при их точности, значительно усложняют и удорожают технологию правки растяжением с нагревом [131, 132].

Для бесконтактного контроля процесса деформирования в настоящее время широко применяется оптический метод контроля распределения деформаций с использованием цифровой обработки изображений методом корреляции [30, 33, 111].

Все исследования по локализации деформаций на основе принципов мезомеханики основаны на применении оптических методов определения полей распределения деформаций [31]. Как показывают последние результаты исследований в области мезомеханики [25, 26], определяющим фактором в распределении пластических деформаций по длине заготовки является характер пластического течения, который имеет автоволновой характер. Локализация деформаций по длине образца определяется особенностями автоволнового пластического течения и определяется стадией деформационного упрочнения, которой достигает процесс деформирования при правке растяжением с нагревом.

В данных исследованиях, как правило, изучается деформация плоских образцов небольших размеров на ограниченной площади поверхности. В [56] размер зоны локализованной деформации имеет величину порядка 150-360 мкм. Авторы связывают его с размерами группы зерен деформируемого материала. В [58] приводится пример контроля деформаций с использованием ее видеофиксации на стадии образования шейки в закритической области деформации при растяжении. В [38] локализация на мезоуровне рассматривается с максимальным шагом 5 мм и определяется параметрами зерен (их размерами и распределением предела текучести). В [39] на основе метода корреляции цифровых изображений получены распределения деформаций при растяжении плоских титановых образцов на измерительной базе 0,28 мм.

При реализации правки растяжением с нагревом для длинномерных круглых образцов задача сводится к определению фактической пластической деформации с тем, чтобы гарантированно войти в заданный диапазон, в котором равномерность распределения деформаций максимальная. При этом все участки должны выйти в заданный диапазон для максимально полной проработки объема заготовки с целью создания «технологического» барьера на пути передачи исходных погрешностей заготовки на готовое изделие. Использование оптического способа контроля фактической деформации по всей длине заготовки обеспечило бы наиболее объективную информацию для комплексной оценки равномерности деформации в режиме реального времени. Но закрытая рабочая зона в стапеле не позволяет осуществлять непосредственный контроль процесса деформации оптическим способом по всей длине заготовки.

4.3 Обоснование выбора режимов правки растяжением с нагревом с точки зрения мезомеханики

Причиной нарушения внутреннего равновесного состояния заготовки, которая проявляется в виде коробления, является структурная, температурная, силовая неравномерность в процессе ее обработки. Здесь формируется причинно-следственная связь. Неоднородность деформаций по длине приводит к нестабильному диаметальному размеру по длине вала с переменными физико-механическими свойствами. Из-за этого возникают переменные условия обработки при снятии неравномерного припуска с снижением точности и нарушение однородности остаточных технологических напряжений. Поэтому, наряду с уровнем и распределением остаточных напряжений, необходимо формировать стабильную геометрию за счет равномерности продольных и поперечных деформаций на заготовительном этапе [121, 133].

Вопросы оценки локализации деформации при растяжении рассматривались ранее [100] с использованием коэффициентов локальности двух типов.

Критерий локальности $K_{лI}$ первого типа:

$$K_{лI} = \frac{\varepsilon_{\min i}}{\varepsilon_{\max i}}, \quad (4.1)$$

Критерий локальности второго типа $K_{лII}$ определяли по формуле:

$$K_{лII} = \frac{\varepsilon_{\text{ср}}}{\varepsilon_{\max i}}, \quad (4.2)$$

Где $\varepsilon_{\min i}, \varepsilon_{\max i}$ – относительное удлинение локального участка с минимальной (максимальной) деформацией, %; $\varepsilon_{\text{ср}}$ – средняя деформация по образцу, %.

Выбор длины участка определяется длиной волны, равной пятой или шестой гармонике колебаний вала. Недостатками такой оценки является обобщенность оценки. Эти коэффициенты характеризуют равномерность деформаций без учета характера их распределения по длине, т.е. оценивают просто перепад на всей измерительной базе равной длине заготовки. Также из-за растущих знаменателей при увеличении деформации, коэффициенты будут уменьшаться, даже без изменения параметра, стоящего в числителе. Это также нарушает объективность оценки процесса.

В работе [56] при исследовании локализации пластического течения плоских образцов оценка степени макролокализации от времени проводилась при помощи критерия, который волнообразно возрастает с течением времени.

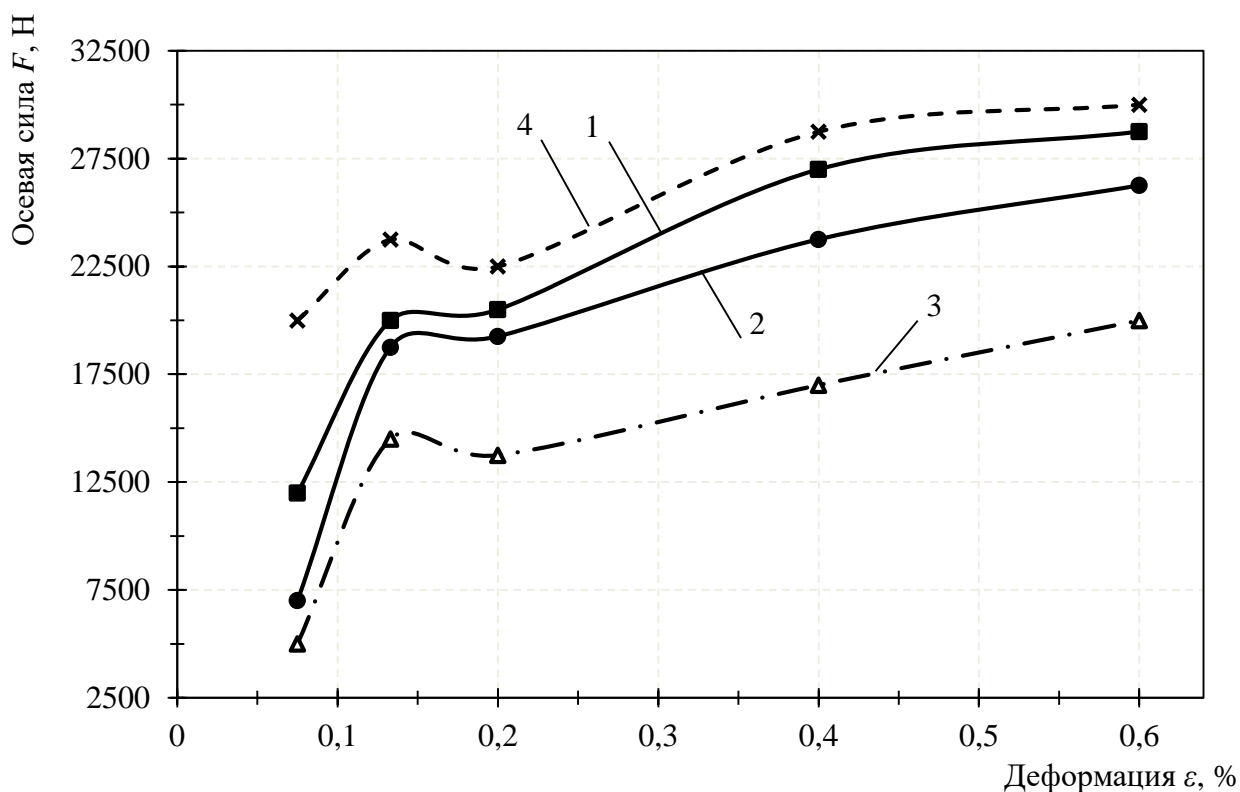
Зависимость деформация – напряжения носит существенно нелинейный характер и состоит из характерных участков: линейного, так называемой площадки и участков упрочнения. Процесс усложняется при изменении температуры в процессе самого деформирования, рисунок 4.1 [107].

На кривой, рисунок 4.2 выделены участки:

1 – линейный участок с площадкой текучести или участок легкого скольжения, которому соответствует уединенный очаг локальной деформации;

2 – участок линейного упрочнения, на котором происходит движение нескольких эквидистантных очагов деформаций;

3 – участок параболического упрочнения, на котором формирование эквидистантных очагов локальной деформации [25, 26].



1 – $T = 200^{\circ}\text{C}$; 2 – $T = 300^{\circ}\text{C}$; 3 – после выдержки 30 мин; 4 – после охлаждения до 20°C

Рисунок 4.1 – Зависимость изменения возникающего осевого усилия F от заданной относительной деформации ϵ и температуры T

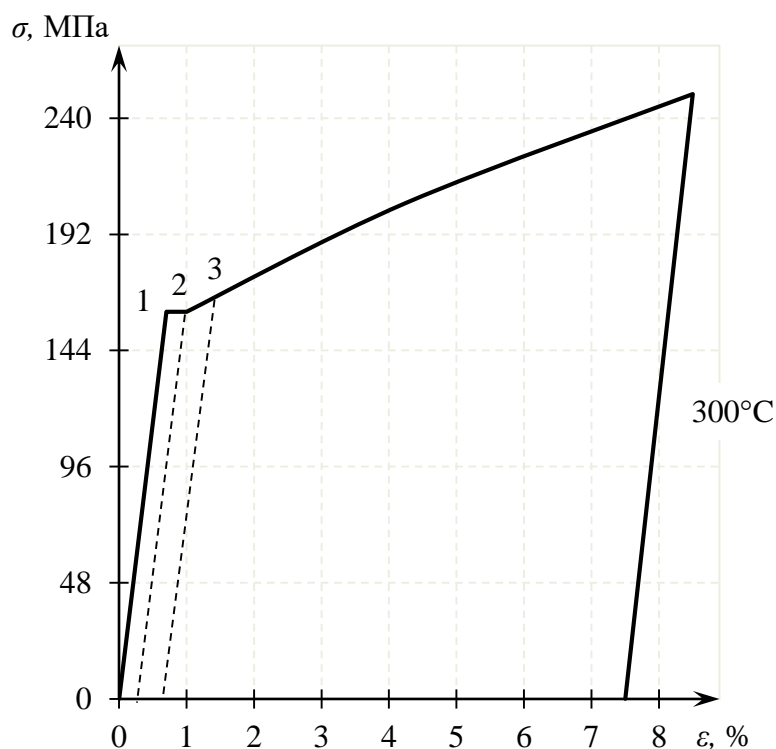


Рисунок 4.2 – Зависимость деформация-напряжение для сплава 12Х18Н10Т при 300°C с выделенными стадиями пластического течения

Локализация пластических деформаций связана с особенностями температурно-скоростного режима обработки, фазовыми превращениями в материале. Она способствует формированию неоднородной структуры и свойств материала, отклонению размеров при непрерывном деформировании.

Но локализация – это также свойство самоорганизации процессов на различных структурных и масштабных уровнях материала, которые формируют чередующиеся объемы деформированного и недеформированного материала. Связь между видом материала, его структурой, вплоть до дислокационной системы деформируемого тела и параметрами автоволн пластического течения, возникающих при деформировании с постоянной скоростью отмечено в [26].

Особенности пластического течения или как их называют паттерны локализованной пластичности, определяются стадией деформационного упрочнения, которой достигает процесс деформирования. Указанным

стадиям пластического течения на кривой упрочнения на рисунке 4.2 соответствуют дискретные изменения показателя параболичности n в уравнении, аппроксимирующем кривую пластического течения:

$$\sigma(\varepsilon) = \sigma_0 + Q \cdot \varepsilon^n, \quad (4.3)$$

где σ – напряжение, МПа;

ε – деформация;

Q – показатель упрочнения;

σ_0 – предел текучести, МПа.

В соответствии со стадией пластического течения показатель параболичности n принимает следующие значения: $n \approx 0$ на площадке текучести, $n \approx 1$ на стадии легкого скольжения и линейного деформационного упрочнения, $n \approx 1/2$ на стадии параболического упрочнения и $0 \leq n \leq 1/2$.

Каждой стадии соответствует определенный паттерн локализации пластической деформации. На площадке текучести происходит движение фронтов, разделяющих упруго и пластически деформированные объемы. На стадии легкого скольжения и линейного деформационного упрочнения происходит движение нескольких фронтов с увеличением их количества к концу стадии (от 2-3-х до 5-10-ти). На стадии параболического деформационного упрочнения происходит формирование стационарной системы очагов деформации. На стадии предразрушения происходит слияние очагов деформации с образованием шейки. При переходе от одной стадии кривой к другой происходит перестройка паттерна через разрушение старого, хаотизацию картины пластического течения и формирование нового паттерна. Очевидно, что коэффициент локальности при растяжении цилиндрических образцов, кроме влияния погрешностей диаметральных размеров, исходной кривизны, неоднородности свойств материала будет определяться стадией деформационного упрочнения, до которой дошло в

каждом при растяжении заготовки. При этом необходимо учитывать при нагреве заготовок и температурное влияние на кривую упрочнения и смещение стадий пластического течения.

Исследование закономерностей технологических особенностей локализации пластического течения необходимо для оценки последующей неравномерности распределения припуска под обработку, картины формирования неравномерности напряженно-деформированного состояния на макроуровне. Более приближенная к производственным условиям комплексная оценка однородности пластических деформаций приведена в [39]. Она проводится на основе плотности распределения главных упругопластических деформаций, их интенсивностей, случайных коэффициентов Надаи-Лоде. Все перечисленные работы имеют материаловедческий аспект, проводится на плоских образцах с ограниченной длиной деформируемой части. Локализация пластических деформаций рассматривается на мезоскопическом уровне, редко обобщаясь до макроскопических масштабов. Для технологических целей необходимо выявлять особенности формирования локализации пластических деформаций в макромасштабе на основе методики оценки равномерности распределения вдоль оси образца. Необходимо выбрать величину деформации, которая с учетом автоволновых процессов, обеспечила бы максимально равномерное распределение пластических деформаций по длине заготовки и возможность их контроля при правке растяжением с нагревом с максимальной достоверностью. Возникает задача – обосновать возможность контроля общей деформации образца с выходом на заданную стадию деформирования по наблюдению за деформацией его участка.

4.4 Методика эксперимента

Необходимо исследовать зависимость локализации деформации от основных технологических режимов правки растяжением с нагревом, в

первую очередь величины пластической деформации. Степень и характер локализации деформации по длине также определяется свойствами материала, которые имеют вероятностное распределение параметров (предел текучести, модуль упругости, коэффициент линейного расширения), состоянием поверхностного слоя, исходной геометрической точностью (неравномерность диаметральных размеров, исходное коробление).

Для оценки эффективности правки растяжением с нагревом с точки зрения обеспечения и сохранения точности размеров и форм по этапам технологии ее изготовления и в эксплуатационный период необходима оценка степени равномерности деформирования по длине или степени ее локализации в зависимости от величины деформации.

Предложенная методика оценки локализации пластического течения применяется к результатам исследований по растяжению образцов из сплава 12X18Н10Т на установке для правки растяжением с нагревом. Образцы двух типов.

Первый тип образца – пруток с длиной деформируемой части 1200 мм и диаметром – 30 мм. На каждом образце наносились 20 рисок через каждые $60 \pm 0,01$ мм, глубиной 0,2-0,4 мм, и шириной 0,5-1 мм. Перед началом испытаний измерялись расстояние между соседними рисками. Цикл испытаний заключался в нагреве образца до различных температур $T=300, 400, 500^\circ\text{C}$. Далее растяжение с различной скоростью нагружения (4, 6, 8 единиц) и величиной деформации с последующим охлаждением до $T=20^\circ\text{C}$.

Второй тип образцов. Из заготовки в поставке вытачиваются образцы из одного прутка. Минимальный диаметр 10 мм, длина цилиндрической части 300 мм, полная длина образца 320 мм. Головки образцов точатся под захваты машин для испытания. Отклонения размеров $\pm 0,01$ мм. Образцы маркируются.

Для оценки равномерности пластической деформации по длине образца сделаны риски с шагом $5 \pm 0,01$ мм. Расстояние между ними

измерялось до и после деформирования, а также по участкам контролировали диаметры и биение.

Контрольными параметрами являлись усилия растяжения при нагрузке и, разгрузке, а также на этапе выстоя, который измеряли тензометрическим датчиком.

Температурный режим: 20°, 250°, 300°, 400°С обеспечивался способом электроконтактного нагрева для длинномерных заготовок, а для укороченных образцов использовалась переносная печь с нагревательным элементом.

Деформация ε по уровням 0,8%, 2%, 4%, 6%.

Скорость деформации $\dot{\varepsilon} = 1 \cdot 10^{-3} \dots 1 \cdot 10^{-5} \text{ C}^{-1}$,

Материал – сталь 12Х18Н10Т.

Для оценки степени равномерности деформаций при растяжении предлагается определение коэффициентов локальности двух типов, а также накопленной разности деформаций по соседним участкам в абсолютном выражении и в виде среднеквадратичного отклонения от среднего, размаха деформаций, а также построение и оценка гистограмм распределения деформаций по участкам по параметрам эксцесса и асимметрии, а также проверка по соответствию полученного экспериментально распределения нормальному закону [124, 130].

Величина деформации – это сумма температурной, пластической и упругой составляющих. Из общей деформации вычиталась температурная деформация и получалась деформация от нагрузки. Для определения стадии пластического течения, на котором находился образец, использовались значения пластической деформации после вычитания из деформации от нагрузки упругой составляющей. Стадии пластического течения определены по кривой нагружения, полученной на испытательной разрывной машине. Для определения положения характерных участков кривых упрочнения используются контрольные точки – предел текучести, переход к линейному участку упрочнения и параболическому. Контрольные точки на графике:

1 стадия (точки 1-2) – площадка текучести – 0-0,3%;

2 стадия (точки 2-3) – линейное упрочнение – 0,3-1,87%;

3 стадия (точки 3-4) – параболическое упрочнение – более 1,87%.

Также был проведен эксперимент с предварительно деформированными образцами с остаточным прогибом 0,5 мм; 1 мм; 1,5 мм. Прогиб проверяется в центре по упорам. Далее анализ по обычным пунктам методики.

4.5 Результаты испытаний материала

Для определения свойств материала образцов использовалась разрывная машина AMSLER с возможностью записи параметров нагружения и деформации. Образцы для испытаний изготовлены по ГОСТ 1497-84 цилиндрической формы с утолщением на концах под захваты. Были также использованы результаты нагружения с использованием индукционной печи.

При обработке стали 12X18H10T, которая относится к разряду жаропрочных нержавеющей сталей аустенитного класса, необходимо учесть следующие факторы.

Сталь 12X18H10T в диапазоне температур 200...600°C показывает падающую зависимость пределов прочности и пластичности.

Коррозионная стойкость таких сталей при превышении определенного значения величины пластической деформации, падает из-за роста коррозионного растрескивания. Это связано с зависимостью σ_B от образования α -фазы при температурах менее 200°C с более интенсивным упрочнением. Межкристаллитное разрушение интенсивно идет в наклепанном аустените при температуре 600°C.

Текстура зерен деформации в местах разрыва имеет вытянутую форму. При растяжении на 10% при температуре 300°C деформация образца идет за счет межзеренного скольжения.

Правку растяжением с нагревом нужно вести при температурах рабочих отпуска 200...400°С.

Из-за особенностей формирования α -фазы верхний диапазон выпуска снижают до 400°С. В холодном состоянии при 20°С деформирование до 8% идет без формирования α -фазы.

Для стали 12Х18Н10Т необходимо учитывать фазовые переходы в процессе деформации. Для осуществления мартенситного превращения в данном сплаве идет перераспределение элементов, приводящее к расслоению твердого раствора и образованию объемов, объединенных никелем. Это достигается интенсивным наклепом аустенита при холодной деформации. Чтобы не произошло аустенитно-мартенситное превращение необходимо ограничиться малыми степенями деформации (до $\varepsilon=10\%$) и температурой нагрева выше 200°С. Это позволит избежать увеличения объема заготовки, повышения технологических напряжений и деформации, и в конечном итоге, к короблению.

При небольших степенях деформации правка растяжением с нагревом повышает длительную прочность, а при высоких степенях деформации положительное влияние на физико-механические свойства не обнаруживается. Наклеп растяжением с нагревом приводит к резкому снижению деформационной способности стали 12Х18Н10Т при температуре испытаний 600°С.

Особенности процесса деформации зависят от участка кривой деформация – напряжения и меняются при переходе от участка к участку [23]. Исключив из рассмотрения участок упругой деформации, учитываются следующие стадии.

I стадия – участок площадка текучести или участок легкого скольжения, которому соответствует формирование уединенного очага локальной деформации. Далее следуют участки упрочнения.

II стадия – участок линейного упрочнения, на котором происходит движение нескольких нестационарных очагов деформаций.

III стадия – участок параболического упрочнения, на котором происходит формирование эквидистантных очагов локальной деформации.

На рисунке 4.3 приведены графики экспериментальных кривых деформация-напряжения для сплава 12X18H10T для различных температур с указанными стадиями пластического течения. Они соответствуют дискретному изменению показателя параболичности n в уравнении, аппроксимирующем кривую пластического течения в соответствии со стадией пластического течения показатель параболичности n принимает следующие значения: $n \approx 0$ на площадке текучести, $n \approx 1$ на стадии легкого скольжения и линейного деформационного упрочнения, $n \approx 1/2$ на стадии параболического упрочнения.

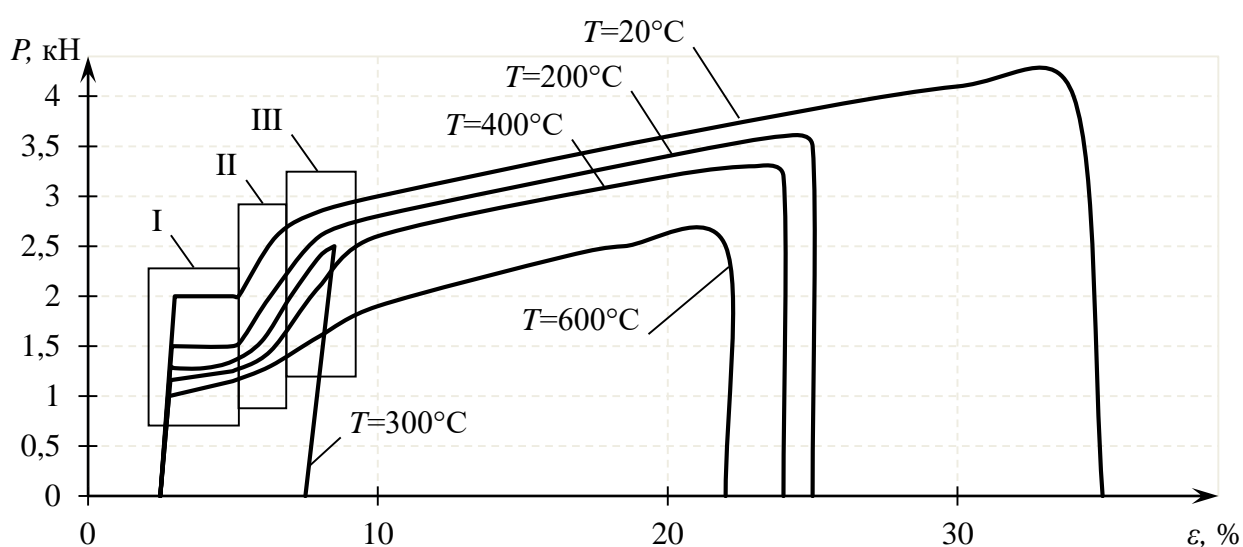


Рисунок 4.3 – Температурная зависимость деформация-напряжения сплава 12X18H10T

Проводить экспериментальные исследования по определению зависимостей напряжения-деформации при различных температурах трудоемко. Для определения стадии пластического течения по положению фактической величины пластической деформации относительно контрольных точек, которые определяют границы стадий кривой пластического течения, предлагается использовать расчет деформации с температурно-зависимыми параметрами на основе реологических моделей

Ишлинского. Методика расчета и пример ее применения представлены в [7, 11]. Учет силовых и температурных факторов проводится не только через влияние температуры на температурную деформацию, но и через ее влияние на модуль упругости и предел текучести. Результаты проведенных испытаний сведены на рисунок 47.

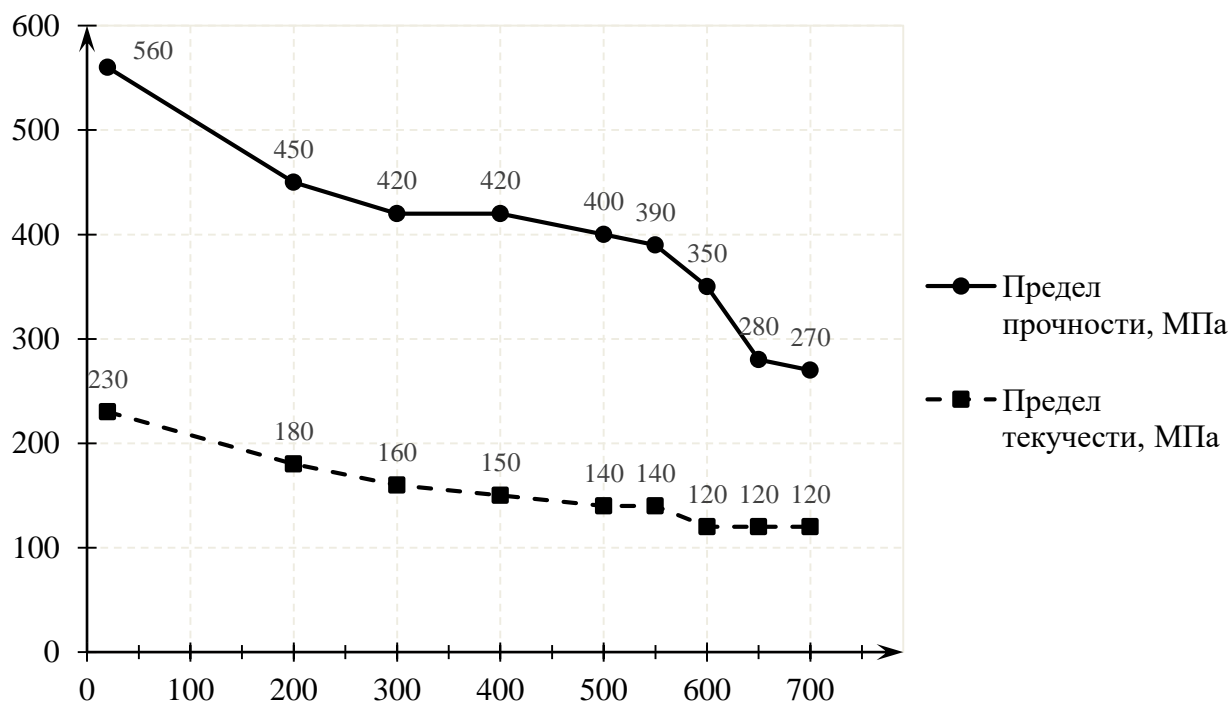


Рисунок 4.4 – Зависимости предела прочности и предела текучести от температуры стали 12X18H10T после закалки с 1080°C на воздухе

Соответственно, температура влияет и на деформационные параметры, показанные на рисунке 4.5.

При растяжении образцов при температурах 200°C, 400°C, 600°C мартенсит из аустенита не образуется. Таким образом, проведение правки растяжением с нагревом при температурах 200°C и выше обеспечивает стабильную структуру аустенита вне зависимости от степени деформации.

По результатам испытаний построены графики зависимости предела текучести (σ_T) и предела прочности (σ_B) от температуры деформации, выявлены зависимости удлинения (Δl) при усилие текучести (P_T) от температуры.

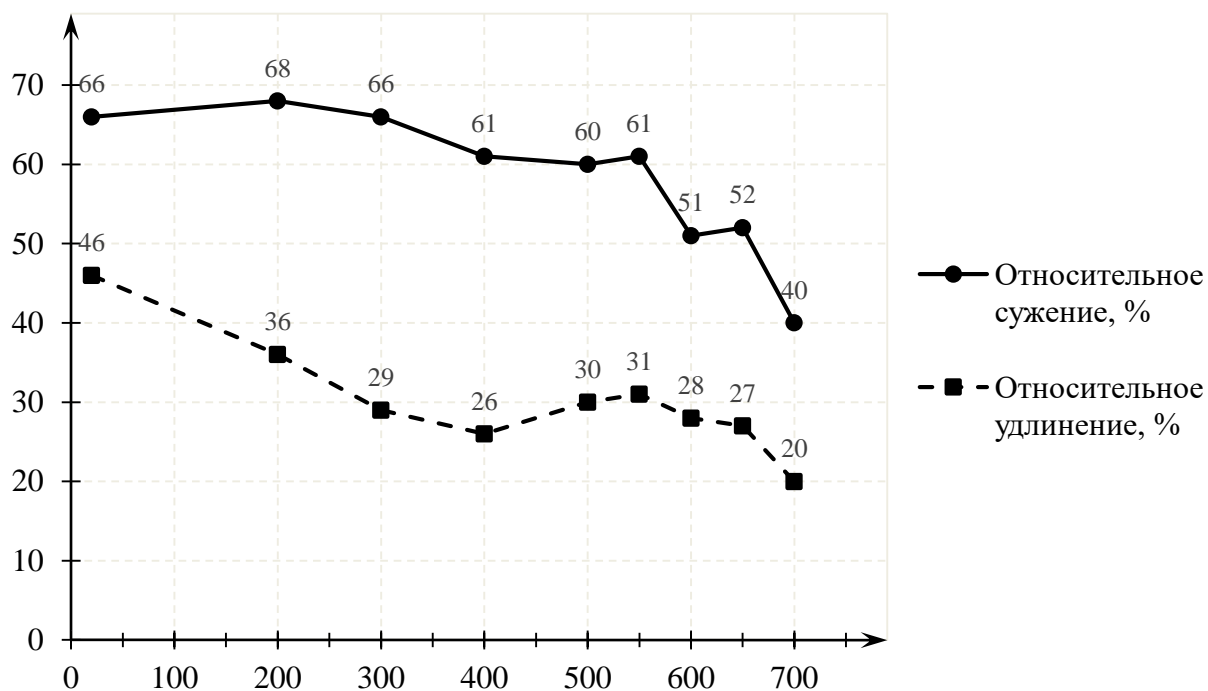


Рисунок 4.5 – Зависимости относительного сужения и удлинения в % от температуры стали 12X18H10T после закалки с 1080°C на воздухе

Сравнение диаграмм растяжения образцов при температурах 200°C, 400°C, 600°C позволяет заметить резкое стабилизацию пластичности. Это объясняется более интенсивным развитием межкристаллического разрушения в наклепанной стали.

4.6 Результаты исследований правки растяжением с нагревом

С точки зрения оценки именно равномерности распределения деформаций по длине, их периодичности, стабильности, общей величины наиболее информативными являются межквартильный размах (*IQR*), эксцесс и оценка степени нормальности распределения деформации *p*-значения. Дополнительную оценку дают среднее значение ε , среднеквадратичное отклонение σ_ε , накопленная сумма отклонений деформаций по соседним участкам, критерий локальности первого и второго типов, оценка асимметрии. Данные оценки в совокупности образуют набор признаков, которые можно использовать для характеристики процесса правки

растяжением с нагревом с точки зрения равномерности проработки заготовки по длине.

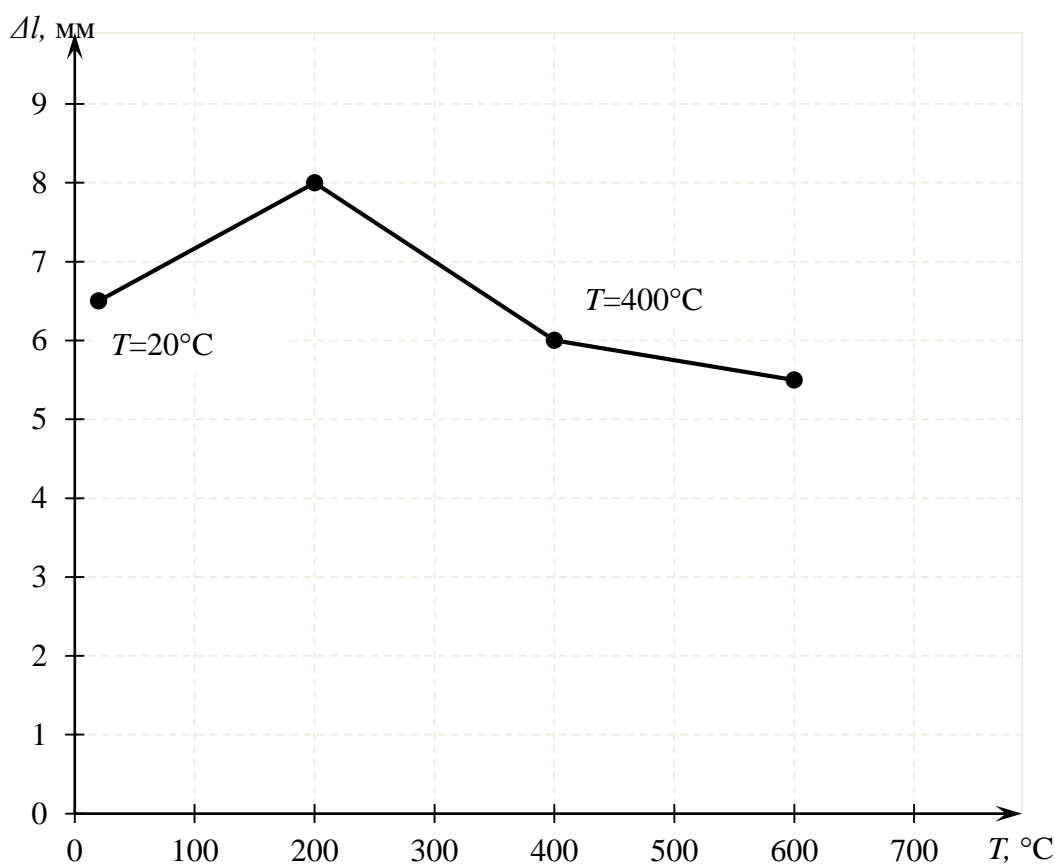
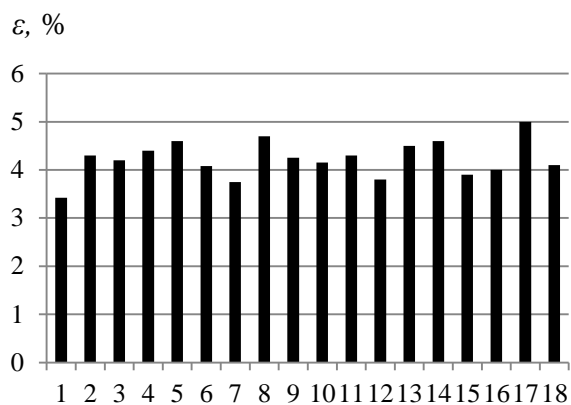
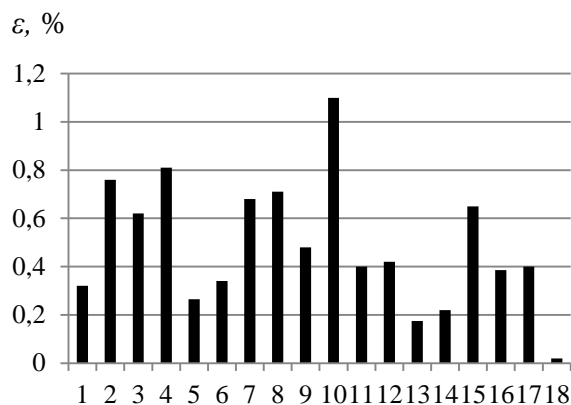


Рисунок 4.6 – Зависимость удлинения при P_T от температуры

Для стадий пластического течения для сплава 12X18H10T показаны типовые графики локализации и даны их оценки в таблице 4.1, полученные в результате обработки данных. Результаты показаны на рисунках 4.7 и 4.8.

Таблица 4.1 – Параметры растяжения образцов из стали 12X18H10T

Стадии пластического течения	Средняя деформация $\varepsilon, \%$	$\sigma_\varepsilon, \%$	IQR	Асимметрия	Эксцесс	p -значение
1 стадия	0,415	0,189	0,22	0,38591	-0,6803	0,4117
2 стадия	1,626	0,337	0,57	-0,34963	-1,0101	0,3495
3 стадия	4,225	0,3819	0,455	-0,06134	0,234033	1

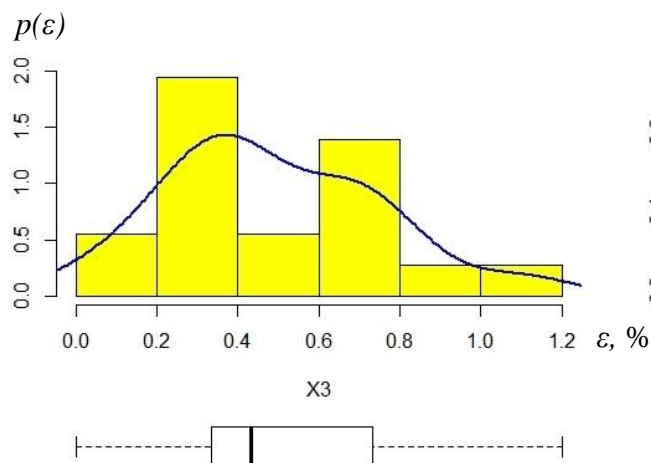


а

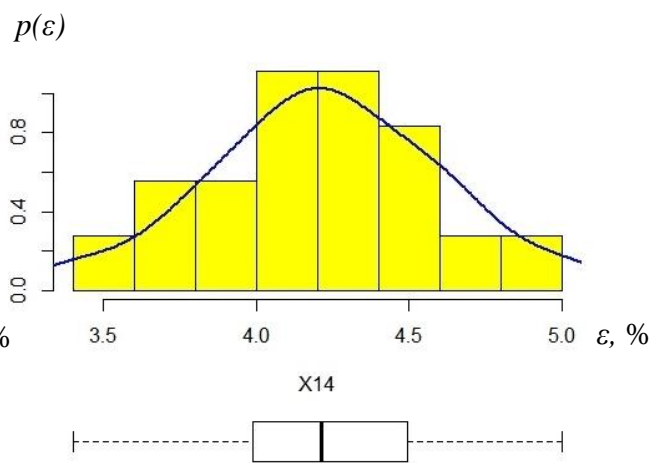
б

а – I стадия пластического течения; б – II стадия пластического течения

Рисунок 4.7 – Распределение деформаций по контрольным участкам



а



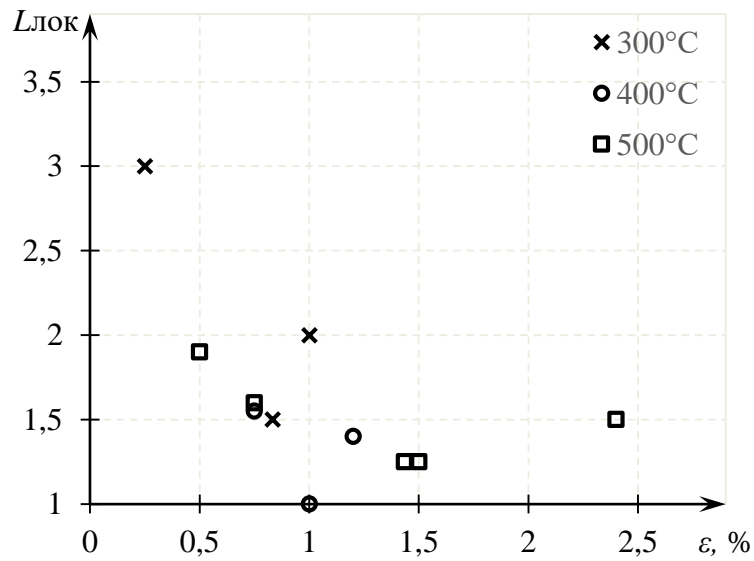
б

а – на первой стадии пластического течения
(деформация третьего образца – плотность распределения деформаций);
б – на второй стадии пластического течения
(деформация четырнадцатого образца – плотность распределения деформаций)

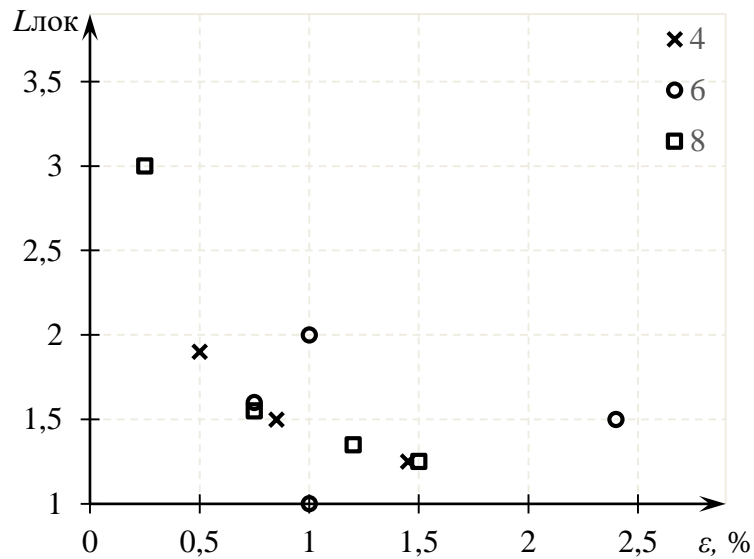
Рисунок 4.8 – Оценка распределения деформаций заготовок.
Под гистограммой – диаграмма размаха деформаций

Локализация деформации вдоль оси вала согласуется с характером волнового распространения пластической деформации и, соответственно, может управляться выбором диапазона пластического течения, где формируется максимальное количество устойчивых фронтов пластической деформации. На рисунке 4.9 показано группирование коэффициентов

локальности от деформации в зависимости от температуры и скорости нагружения.



а



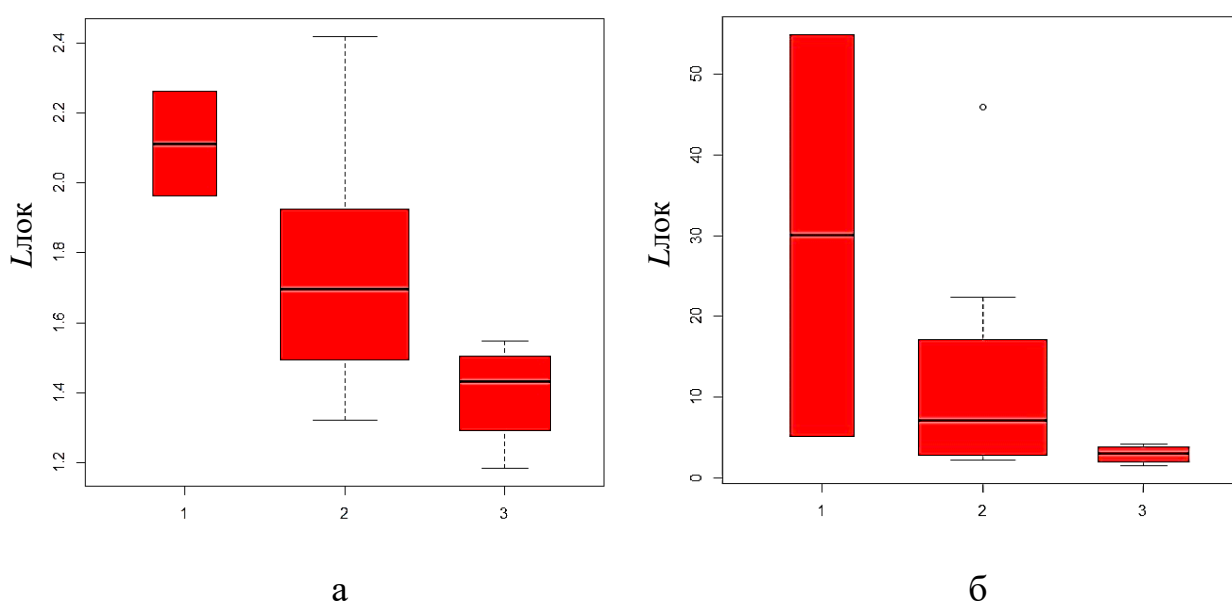
б

а – по температуре; б – по скорости деформирования

Рисунок 4.9 – Группирование параметров в координатах деформация-коэффициент локальности для 12Х18Н10Т

На рисунке 4.10 показаны диаграммы размахов, построенные для коэффициентов локальности первого и второго типов. Группирование

коэффициентов локальности приведено для трех стадий в зависимости от участка кривой упрочнения, где находилась заготовка в конце цикла нагружения. Результаты группирования коэффициента локальности первого типа на рисунке в виде диаграммы размаха. «Усы» – крайние значения, точка – выброс, а прямоугольник задает края, между которыми находится от 25 до 75% данных. Линия внутри прямоугольника – медианное значение показателей группы. Анализ статистической разницы между средними внутри групп 1 и 2 и 2 и 3 оценивался параметрическим тестом Крускала-Уоллеса, который показал статистически значимую разницу.



а – первого типа; б – второго типа
 1 – площадка текучести; 2 – участок линейного упрочнения;
 3 – участок параболического упрочнения

Рисунок 4.10 – Группирование по классам в зависимости от участка кривой упрочнения для коэффициента локальности

Поиск параметров обработки совместного растяжения и нагрева, обеспечивающих максимальную степень равномерности локализации деформации по длине, проводился чисто экспериментальными методами. При этом необходимо учитывать, что экспериментальные исследования проводятся на подготовленных образцах, механически обработанных до высокой степени точности и небольших при этом размеров. Технология

правки растяжением с нагревом апробировалась на заготовках длиной 6 метров, причем сама заготовка, кроме крайних участков под захваты вообще не обрабатывалась. Точность размеров и погрешность формы, свойства материала заготовки соответствовали параметрам проката, что создает дополнительные возмущающие факторы по формированию картины напряженно-деформированного состояния.

Распределение деформаций первой стадии характерно наличием всплеска, что связано с формированием полосы Людерса. В целом стабильное по квадратичному отклонению и по коэффициентам локальности, оно уступает в равномерности распределению деформаций образца, соответствующего второй стадии обработки – участку линейного упрочнения. На этой стадии оценка дает следующее: межквартильный размах более симметричный, медиана ближе к центру, распределение деформаций больше соответствует нормальному. Несмотря на большую величину разброса по сравнению с первым образцом, это распределение более равномерное с точки зрения образования пространственной структуры. Для второй стадии характеристики уступают первой и третьей стадии. Такая оценка характерна для всех образцов. Это может быть связано с особенностями локализации деформации по стадиям пластического течения. Вторая стадия линейного упрочнения отличается образованием новых фронтов пластического течения с одного для первой стадии до 5-10 в конце второй. За счет них на второй стадии происходит выравнивание деформаций по длине. Обработка с минимальной величиной деформации в пределах первой стадии не эффективная в плане проработки всего объема заготовки, устранения кривизны исходной заготовки, выравнивания деформации по сечениям.

Результаты моделирования температурно-зависимых кривых напряжения-деформация по реологической модели Ишлинского показаны во второй главе.

Диаграмма на рисунке 4.12 показывает величину накопленных

отклонений деформаций $\sum \Delta \epsilon$ от среднего значения e_{cp} по участкам по всем образцам, которые находились на II стадии пластического течения (формирование нескольких нестационарных фронтов волн пластической деформации).

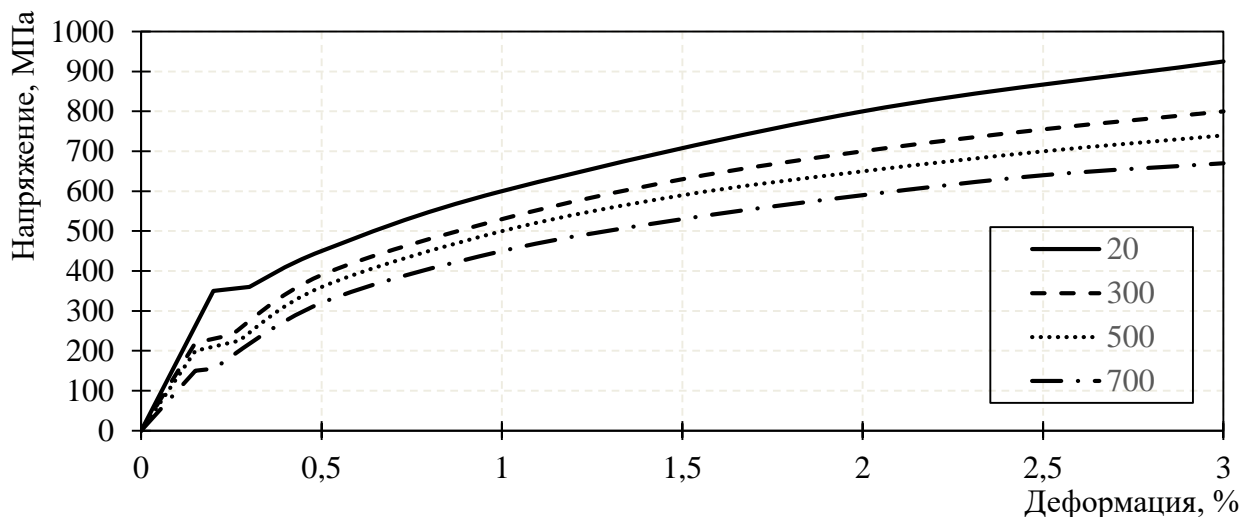


Рисунок 4.11 – Результаты моделирования зависимости напряжения-деформации для стали 12X18H10T при температурах 20, 300, 500 и 700°C

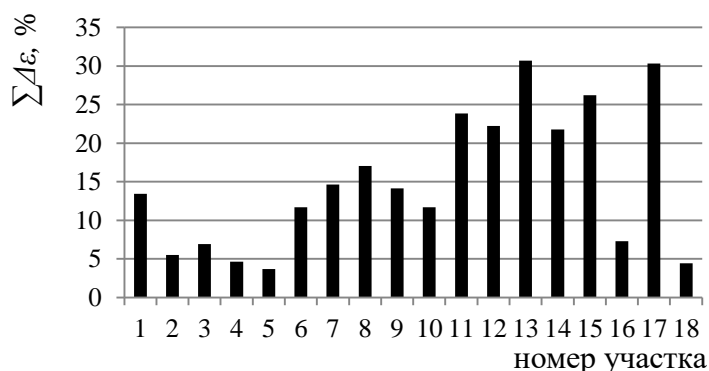


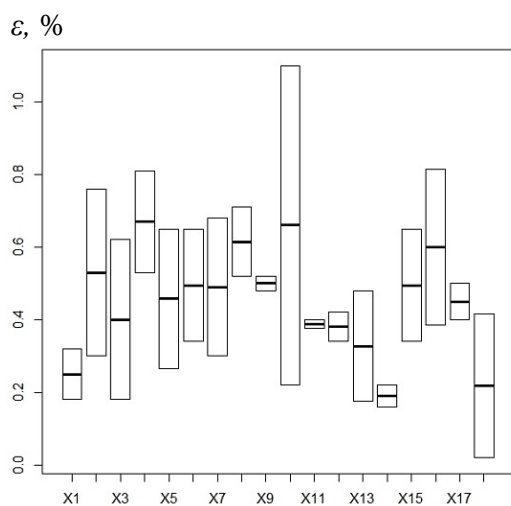
Рисунок 4.12 – Накопленная величина отклонения деформации от средней деформации на участках для всех образцов (II стадия пластического течения)

Частота соответствия величины деформации участка стадии пластического течения (II, III стадии) показана в таблице 4.2.

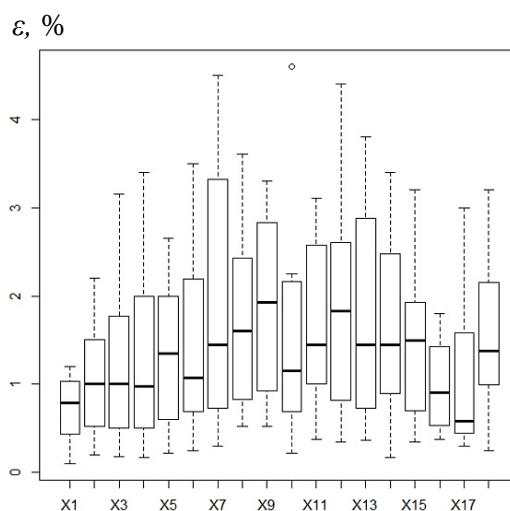
Параметры деформаций по участкам для всех образцов в виде диаграммы размахов, сгруппированных по стадиям пластического течения, показаны на рисунке 4.13. Для анализа распределения пластических деформаций были построены их плотности распределения, сгруппированные по стадиям, рисунок 4.14 и по укрупненным участкам, рисунок 4.15.

Таблица 4.2 – Частота соответствия величины деформации участка стадии пластического течения (для II, III стадии)

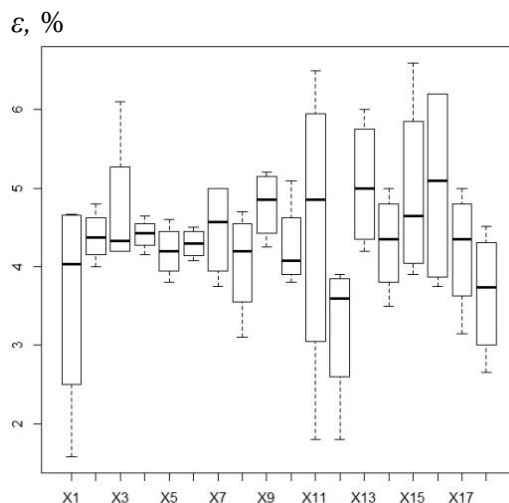
Стадии	Участки																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
II	0,6	0,6	0,6	1	0,8	1	0,6	1	1	0,6	1	1	0,8	0,4	1	1	0,8	0,4
III	0,6	0,4	0,4	0,4	0,2	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4	0,2	0,8	0,8	0,6	0,4
Среднее правильных исходов	0,6	0,5	0,5	0,7	0,5	0,7	0,4	0,6	0,6	0,4	0,7	0,7	0,6	0,3	0,9	0,9	0,7	0,4



а



б



в

а – I стадия; б – II стадия линейного упрочнения;
в – III стадия параболического упрочнения

Рисунок 4.13 – Диаграмма размаха деформаций по участкам

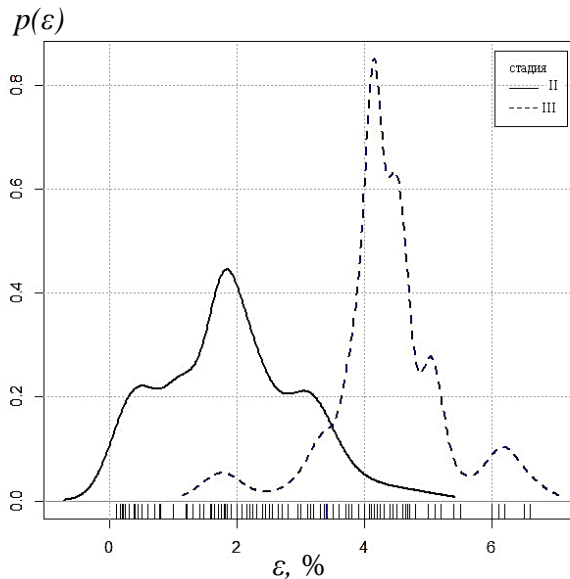
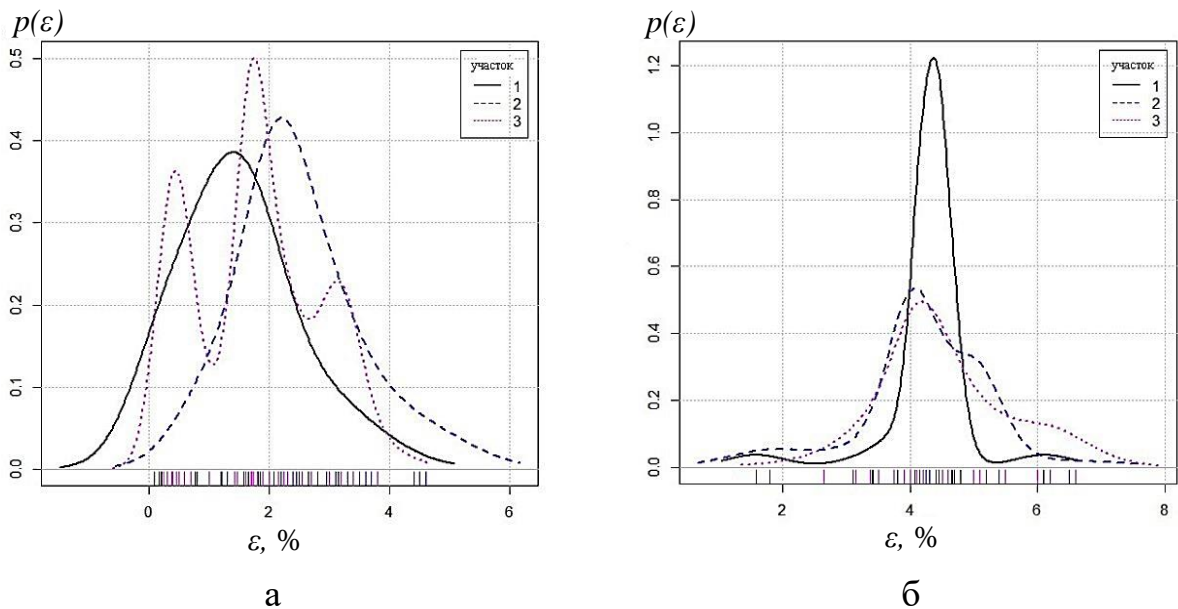


Рисунок 4.14 – Плотность распределения пластических деформаций по II и III стадиям



а – II стадия линейного упрочнения; б – III стадия параболического упрочнения

Рисунок 4.15 – Плотность распределения пластических деформаций, сгруппированная по длине по участкам: 1 – левая часть вала; 2 – середина вала; 3 – правая часть вала

Из-за влияния возмущающих факторов заданная деформации не всегда соответствует фактической, что показано на рисунке 4.18.

Данный разброс определяется влиянием деформации конструктивных элементов силового контура закрепления заготовки и контактной

деформацией в стыках элементов этого контура, а также влиянием температурной деформации.

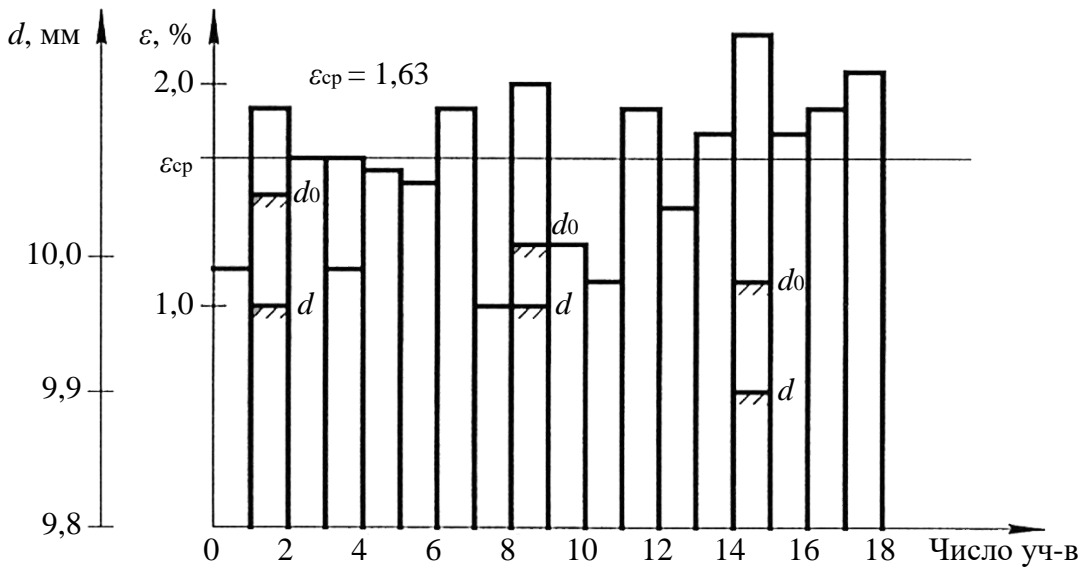


Рисунок 4.16 – Результаты замеров образца при деформации 1,6%

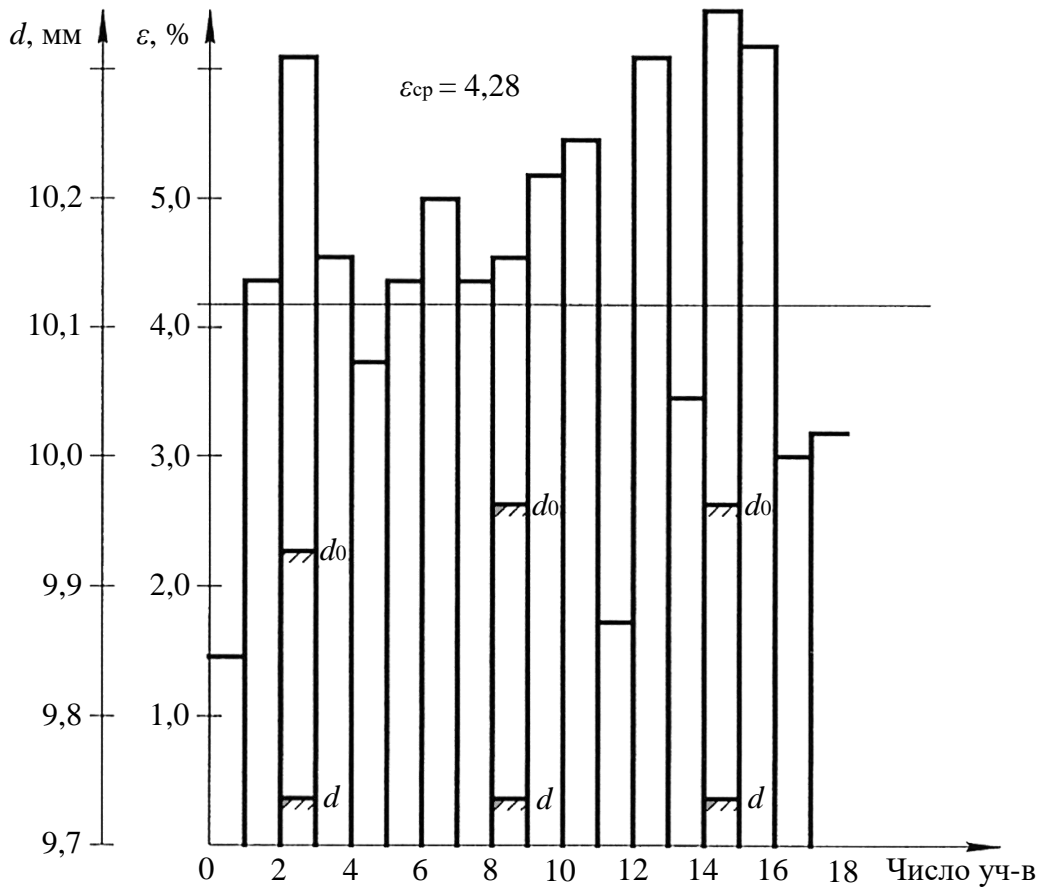


Рисунок 4.17 – Результаты замеров образца при деформации 4,3%

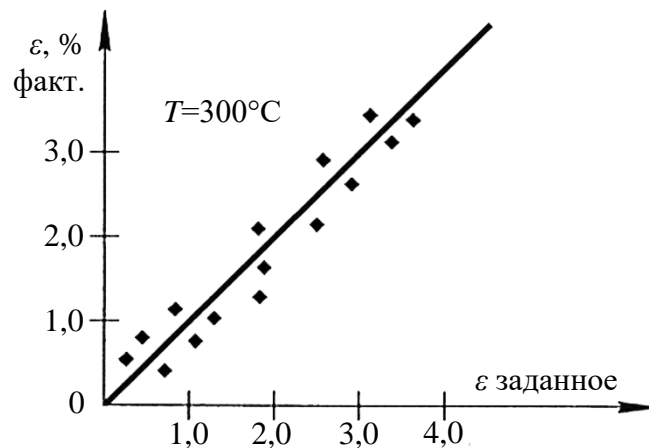


Рисунок 4.18 – Связь фактической и заданной деформаций

Как видно из сравнения экспериментальных кривых и результатов моделирования, реологическая модель позволяет получать зависимости напряжения-деформации с учетом температурного влияния с высокой точностью. Это позволяет определить граничные точки стадий деформации при переменных условиях нагружения.

Полученные распределения деформаций для анализа их равномерности сгруппированы в соответствии со стадиями пластического течения. Каждой стадии пластического течения соответствует определенный паттерн локализации пластической деформации. На площадке текучести происходит движение фронтов, разделяющих упруго и пластически деформированные объемы, т.е. есть недеформированные пластически участки заготовки. На стадии легкого скольжения и линейного деформационного упрочнения происходит движение нескольких фронтов с увеличением их количества к концу стадии (от 2-3-х до 5-10-ти). На стадии параболического деформационного упрочнения происходит формирование стационарной системы очагов деформации. До стадии пред разрушения, где происходит слияние очагов деформации с образованием шейки, при правке растяжением с нагревом доходить нельзя. При переходе от одной стадии кривой к другой происходит перестройка паттерна через разрушение старого, хаотизацию картины пластического течения и формирование нового паттерна.

Степень локализации по участкам, то есть неравномерности деформации, снижается с ростом деформации. Данные по локализации деформации при росте средней величины противоречивы. В [16] она растет вместе со средней величиной деформации по трех стадийной схеме. На первой стадии деформация однородная и мало отличается от среднего значения. Далее идут стадии макролокализации с образованием сначала длинной, затем короткой «шеек». В [17] были построены распределения продольных деформаций для образцов различной длины. Коэффициент локальности, как отношение максимальной продольной деформации к среднему значению, до момента образования шейки практически не зависит от длины образца, а место образования шейки располагалось в центральной части образцов. При росте деформации плотность распределения деформаций расширяется и отличается от закона нормального распределения [19].

Как показали результаты предыдущих исследований, максимальная степень однородности по различным критериям оценки обеспечивается на II стадии кривой пластического течения (стадия линейного упрочнения) [22].

Для исключения ошибки по определению стадии кривой пластического течения, на которой находится образец в течении правки растяжением с нагревом, был проведен анализ соответствия величины деформации каждого участка средней величине деформации всего образца. Из графиков можно определить расположение участков для данных условий обработки, которые дают наименьшую величину ошибки и степень отклонения от среднего значения.

Распределение зон локализации пластической деформации определяется длиной волны пластической деформации, которая логарифмически зависит от длины образца L :

$$\lambda(L) = \alpha \ln \frac{L}{L_0}, \quad (4.4)$$

где α – масштабный коэффициент;

L_0 – минимальный размер образца, в котором возможно возникновение локализации пластического течения.

4.7 Оценка деформаций и остаточных напряжений

Качественная зависимость распределения остаточных напряжений при известных осевых пластических деформациях по длине цилиндрической заготовки определяется на следующих допущениях. Для прямолинейной цилиндрической заготовки задано распределение осевых пластических деформаций $\varepsilon_p(z)$ по длине заготовки z , где z – координата вдоль оси вала. Это распределение задается для точек контроля.

Примем, что материал после превышения предела текучести течет пластически при постоянном напряжении. Распределение напряжений симметрично относительно оси, а влиянием радиальных и тангенциальных деформаций пренебрегаем.

С учетом того, что пластическая деформация растяжения (положительная $\varepsilon_p(z)$), после снятия нагрузки возникнут сжимающие остаточные напряжения.

Чем больше величина пластической деформации по модулю, тем больше будут и остаточные напряжения. Однако, если пластическая деформация превышает деформацию, соответствующую пределу текучести, то ее увеличение деформации не приведет к увеличению остаточных напряжений.

В областях с резким градиентом пластических деформаций будут возникать более высокие остаточные напряжения. Приблизительно остаточные напряжения $\sigma_{\text{ост}}(z)$ можно представить как функцию, зависящую от пластической деформации $\varepsilon_p(z)$ и её производной $\varepsilon_p'(z)$:

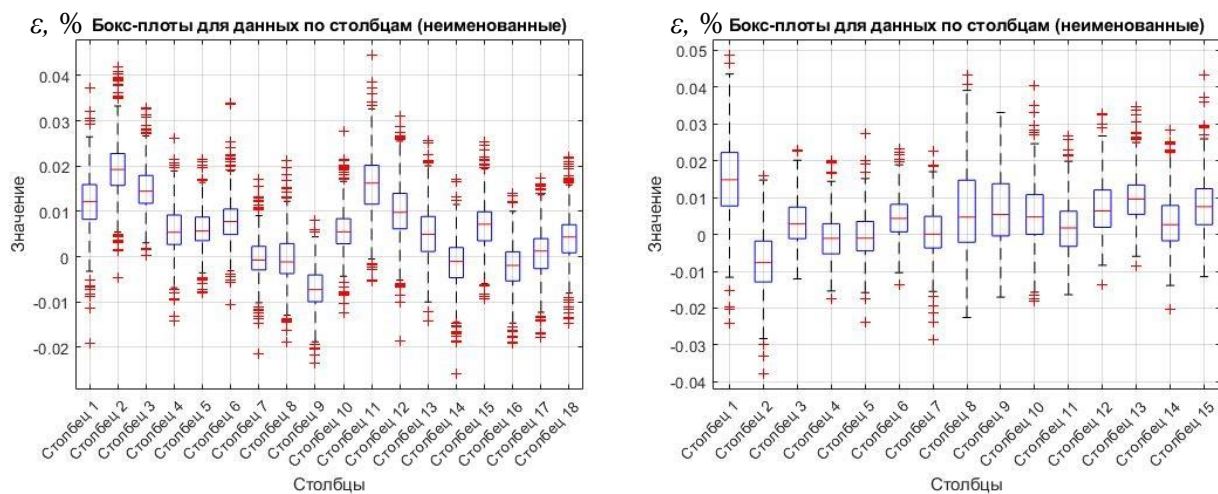
$$\sigma_{\text{ост}}(z) \approx -k_1 \varepsilon_p(z) - k_2 \frac{d\varepsilon_p(z)}{dz}, \quad (4.5)$$

где $\sigma_{ост}(z)$ – остаточные осевые напряжения в точке z ;

$\varepsilon_p(z)$ – пластическая осевая деформация в точке z ;

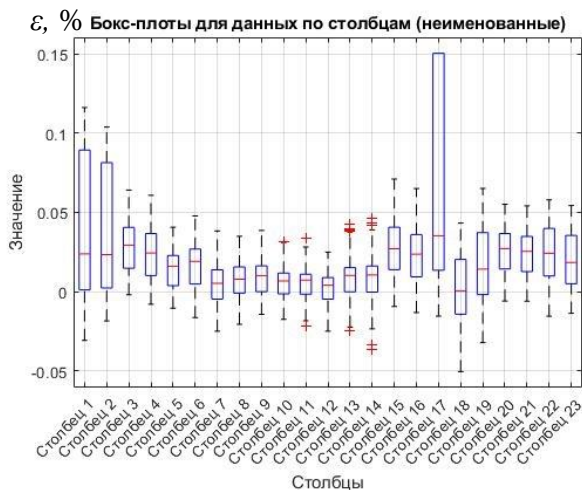
$\frac{d\varepsilon_p(z)}{dz}$ – градиент пластической деформации;

k_1 и k_2 – положительные коэффициенты, зависящие от модуля упругости, предела текучести, коэффициента Пуассона и геометрии заготовки.



а

б



в

а – для первой стадии течения; б – для второй стадии течения;
в – для третьей стадии течения

Рисунок 4.19 – Примеры распределения деформаций, определенных методом ЦКИ для образцов 12X18Н10Т

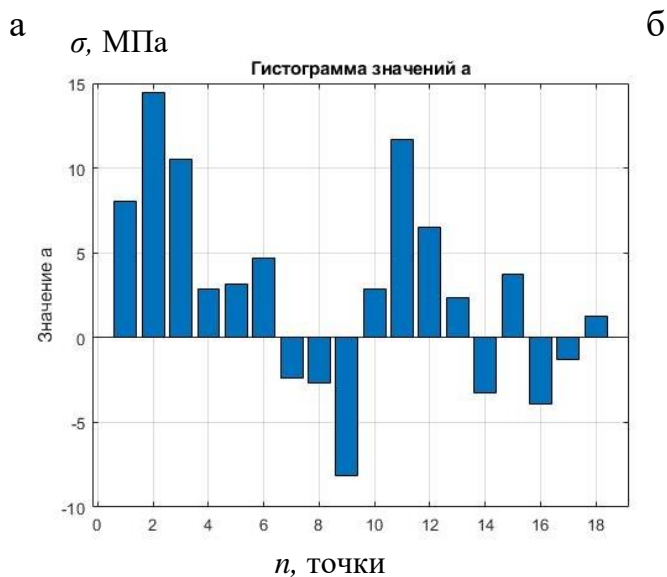
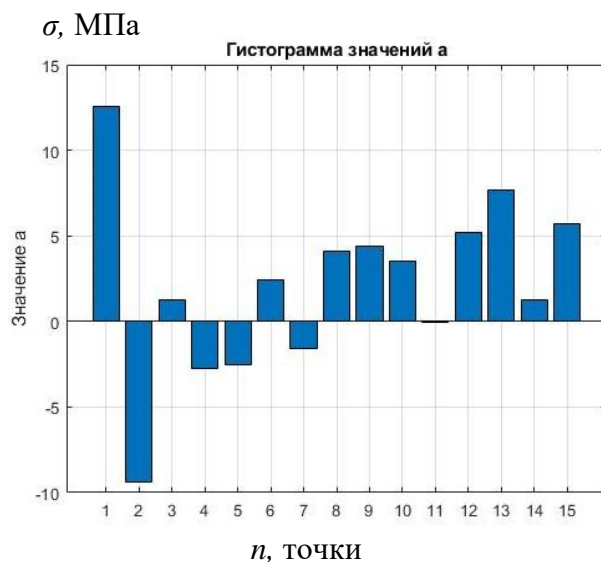
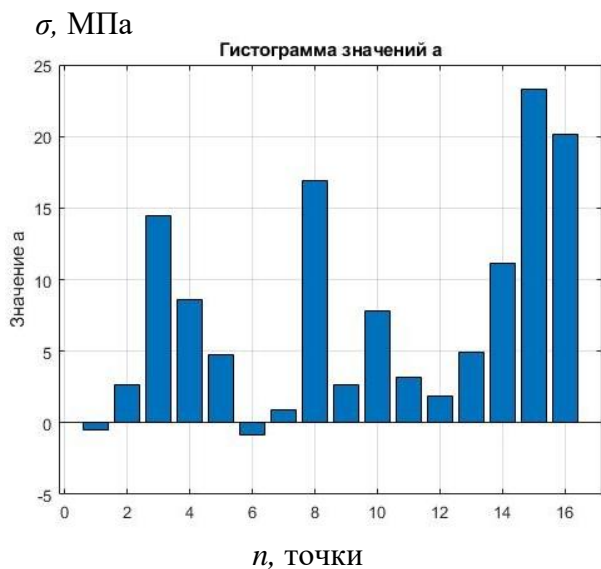
Распределение остаточных напряжений всегда должно удовлетворять условию равновесия. Интеграл от остаточных напряжений по площади поперечного сечения должен быть равен нулю и поэтому в заготовке должны быть как растягивающие, так и сжимающие напряжения.

Коэффициенты k_1 и k_2 позволяют учесть влияние величины деформации и её градиента. Знак "минус" указывает на то, что растягивающие пластические деформации вызывают сжимающие остаточные напряжения. Коэффициент k_1 отражает влияние величины пластической деформации на остаточное напряжение и его можно связать с модулем упругости материала E . Когда пластическая деформация мала и не превышает деформацию, соответствующую пределу текучести, остаточное напряжение будет пропорционально упругой деформации.

Коэффициент k_2 отражает влияние градиента пластической деформации. Он связан с тем, как связаны напряжения в областях с изменением деформации. Поэтому его можно связать и с модулем упругости E и характерным масштабом длины l , на котором происходит изменение деформации:

$$k_2 = E \cdot l, \quad (4.6)$$

где l – это характерный размер области, где происходит изменение пластической деформации. Примем его исходя из расстояния между точками контроля. Для сплава 12Х18Н10Т E равна $2,02 \cdot 10^5$ МПа, предел текучести 250 МПа, l для образца с рабочей зоной растяжения 300 мм и количеством точек в среднем 12 расстояние l равно 0,025 м.



а – для первой стадии течения; б – для второй стадии течения;
в – для третьей стадии течения

Рисунок 4.20 – Примеры оценки остаточных напряжений

Выводы по главе 4

Для оценки степени неравномерности деформаций по длине в рамках правки растяжением с нагревом предложена комплексная методика, которая включает в себя определение коэффициентов локальности деформации двух типов.

При анализе экспериментальных данных определены оценки равномерности деформаций для образцов и сгруппированы в соответствии со стадиями пластического течения. Данным стадиям (площадка текучести, линейное упрочнение, параболическое упрочнение), отвечают различные картины распределения пластических деформаций, что и показывают предлагаемые оценки. Поэтому при выборе величины деформации при правке растяжением с нагревом с учетом температуры нагрева необходимо гарантировано попадать в зону второй стадии пластического течения, на которой обеспечивается выравнивание распределение зон деформирования по длине.

Коэффициенты локальности деформаций по участкам заготовки меняются от 1,25 стадии линейного упрочнения до 2,6 стадии параболического упрочнения, характеризуя возрастание локальности деформаций на отдельных участках заготовки. Технология правки растяжением с нагревом имеет особенность температурного режима, которая заключается в том, что за полный цикл обработки температура изменяется от начальной до рабочей и обратно. На первом этапе операции активное нагружение сопровождается одновременными силовыми воздействиями на материал заготовки, превышающими предел текучести. На втором этапе операции процесс активного нагружения сменяется фиксированным растяжением без увеличения растягивающей силы. Третий этап – разгрузка. Характер распределения картин локализованной пластичности будет усложняться из-за температурного смещения кривых пластического течения и сменой стадий упрочнения из-за этого явления, что требует дальнейшего изучения вопроса.

Рассмотрены вопросы обеспечения равномерности распределения осевой деформации при растяжении цилиндрических заготовок с использованием новой методики оценки локализации деформации. Такая оценка необходима при проектировании и проведении правки растяжением с нагревом в рамках заготовительного этапа технологического процесса

изготовления маложестких длинномерных заготовок. Она заключается в одновременном нагреве и деформировании, что обеспечивает формирование прямолинейности заготовки с выравниванием и снижением уровня остаточных технологических деформаций. Разработанная методика оценки локализации деформаций, обеспечивает комплексную оценку равномерности растяжения по длине.

Равномерность по длине обеспечивается при выходе на участок линейного упрочнения кривой пластического течения, где формируется установившаяся картина распределения максимального количества фронтов локализации пластической деформации. С выходом на данную стадию пластического течения наблюдается сужение плотности распределения деформаций.

Анализ существующих способов и устройств для правки растяжением с нагревом показал или отсутствие контроля процесса формирования пластических деформаций в режиме реального времени или его неэффективность из-за сложности реализации традиционными методами.

ГЛАВА 5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРАВКИ РАСТЯЖЕНИЕМ С НАГРЕВОМ НА БАЗЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МЕТОДОВ

5.1 Обзор использования нейросетевых методов в исследовании процессов деформирования. Задачи нейросетевого моделирования

Современные методы обработки информации, основанные на методах машинного обучения, используются для повышения эффективности технологических процессов. Различные подходы, которые относят к методам машинного обучения, обеспечивают проектирование технологий с оптимальной структурой и технологическими параметрами, позволяют оперативно и точно реагировать на изменения в ходе выполнения операций.

Методы машинного обучения включает в себя несколько направлений. Методы статистической обработки с использованием регрессионных и корреляционных моделей являются базовыми. Но использование современных подходов в определении структуры данных моделей, расчете их коэффициентов обеспечивают эффективное извлечения знаний из обрабатываемых данных. Изменения касаются выбора параметров, видов моделей, повышения точности в условиях ограниченного количества исходных данных. Для анализа, кроме этого, могут использоваться методы группирования данных для их более полного и глубокого анализа и понимания с использованием методов кластеризации. Отдельным направлением являются методы нейросетевого моделирования, которые обеспечивают решение тех же задач, что и регрессионные модели, только для более сложных зависимостей с более высокой точностью. Дополнительным преимуществом нейронных модели является возможность дообучения их на основе дополнительных данных которыми могут выступать как результаты экспериментальных исследований, так и теоретического моделирования. Методы глубокого обучения позволяют решать вопросы обобщения

использованных моделей для ситуаций, отличных от экспериментальных, путем небольших коррекций структуры этих сетей и повторного дообучения. Это значительно сокращает время на подготовку модели, а также делают вопрос об объеме тренировочных данных не таким критическими [40, 50].

Различные типы нейронных сетей применяются для моделирования процессов деформирования. В статье [88] приведены примеры использования нейронных сетей для моделирования величины напряжения при сжатии различных материалов. В обеих статьях сравнивались аналитически определенные величины напряжений по температурно-скоростной зависимости Зенера-Холломана с результатами моделирования с использованием нейронных сетей с обратным распространением сигнала. Во второй статье коэффициенты аналитической модели определяли в ходе генетической оптимизации. Использовались две разновидности аналитических уравнений. Структуры нейронных сетей по количеству слоев и нейронов отличались. При этом, при любых архитектурах нейронные сети дают более точное значение выходного параметра – напряжений. В данном случае входными параметрами являлись величина деформации, скорость деформации и температура [43].

Для моделирования пластических деформаций, в том числе больших, используется МКЭ [22]. Для определения параметров реологических моделей, лежащих в основе расчетов, используется обратный метод для выбранных уравнений состояния. Вычисление параметров уравнений происходит с обеспечением условия минимизации расхождения экспериментальных и теоретических данных. Из-за значительной нелинейности зависимости деформация-напряжения и сложных скоростных и температурных взаимосвязей используются различные методы, обеспечивающие максимальную сходимость экспериментальных и теоретических данных, полученных в ходе моделирования МКЭ. В работе [81] используется автоматический алгоритм идентификации реологических параметров с точной оценкой матрицы чувствительности при

дифференцировании уравнений состояния по параметрам на примере термовязкопластической деформации при растяжении и кручении.

Обратный метод совместно с нейронными сетями был использован в [88] для моделирования кривой напряжение-деформация при сжатии при повышенных температурах (250-350°C) магниевых сплавов. Использование нейронной сети позволило описать эту зависимость с большей точностью, чем выбранные определяющие уравнения, коэффициенты которых были определены с помощью генетической оптимизации.

В [61] проведено исследование пластического течения алюминиевого сплава AA5182-O с учетом направления деформирования в широком скоростном диапазоне 0,001 до 1000 с⁻¹. Для аналитического описания процесса деформирования использовались уравнения состояния Джонсона-Кука (Johnson-Cook), Хана-Хуанга-Лианга (Khan-Huang-Liang), и модифицированное уравнение Воче (Voce), параметры которых определялись и методами регрессии, и методом генетической оптимизации. Результаты сравнивались с двумя типами нейронных сетей. Одна обучалась алгоритмом Маркварта, другая – Байесовской регуляризацией. Из определяющих уравнений модифицированное уравнение Воче показало наилучший результат, но оказалось хуже при сравнении с нейронными сетями по описанию анизотропного деформирования с учетом скорости пластического течения.

В [59] тесты на ползучесть композитного материала при различных температурах и начальном напряжении описывались определяющим вязкоупругим уравнением. Хорошая сходимость достигалась при низких температурах и напряжениях. Расхождение начиналось при температурах стеклования. Использование многослойной сети со сложной архитектурой (3 входных нейрона, 45 в первом скрытом слое, 39 во втором и 1 в выходном), обученной методом сопряженных градиентов, обеспечивает высокую точность при всех температурах и в широком диапазоне напряжений.

Как видно из краткого обзора, использование нейронных сетей для

моделирования различных процессов деформирования для широкого класса материалов показывает более высокую точность по сравнению с аналитическими определяющими уравнениями, коэффициенты которых получены из экспериментальных данных [51, 55].

В работе далее рассматривается процесс деформирования растяжением с нагревом двух типов материалов: углеродистой стали и коррозионностойкого сплава в условиях повышенной температуры. Моделирование проводится для определения напряжений в зависимости от значений входных параметров, которыми являются величина деформации, скорость деформации и температура. Входными параметрами управляют в ходе выполнения правки растяжением с нагревом. Выходными параметрами модели должны быть параметры, характеризующие равномерность распределения пластических деформаций вдоль оси заготовки – коэффициенты локальности разных типов. Также при моделировании осевых деформаций проведены исследования по группированию и кластеризации статистических параметров деформаций по участкам заготовки. Последняя задача связана с предположением, что в зависимости от стадии кривой пластического течения, до которого было произведено растяжение вала, параметры распределения деформации по участкам будут иметь определенные статистические особенности, связанные с изменением механизма деформирования на этих стадиях пластического течения. Автоматическое группирование соответствующих деформационных параметров в зависимости от стадии деформирования заготовки обеспечит подтверждения зависимости равномерности деформирования от стадии пластического течения с учетом температурного и скоростного факторов.

5.2 Построение нечеткой нейросетевой модели

Ниже представлены результаты экспериментальных исследований, полученных на разрывной машине с нагревом с использованием образцов из

материалов сталей 35 и 12X18H10T. Входом были величина и скорость деформации, а также температура, выходом – коэффициент локальности первого рода.

Коэффициент локальности:

$$K_{\Delta l} = \frac{l_{\max}}{l_{\min}} \geq 1, \quad (5.1)$$

где l_{\max} – максимальное удлинение участка образца, мм;

l_{\min} – минимальное удлинение участка образца, мм.

Обработка результатов велась с помощью нейронных сетей на основе гибридной адаптивной нейро-нечеткой системы вывода ANFIS. В качестве данных для обучения системы использовались результаты эксперимента по равномерности деформирования, показанные в таблицах 5.1 и 5.2.

Таблица 5.1 – Данные по локальности деформации для сплава 12X18H10T

$T, ^\circ\text{C}$	$V, \text{ед.}$	$\varepsilon, \%$	$K_{\Delta l}$
500	4	1.88	1.07
500	4	4.35	3.06
500	6	1.161	1.67
500	8	1.47	1.98
300	4	2.05	1.48
300	6	2.159	1.85
300	8	4.08	1.14
400	4	3.21	1.51
500	8	1.89	3.67
400	6	1.13	2.54
400	4	2.896	1.56
300	6	1.9	1.01
300	4	0.95	1.02
300	8	0.87	10
400	6	3.97	1.65
400	8	4.36	1.15
Примечание: T – температура печи; V – скорость деформации; ε – деформация; $K_{\Delta l}$ – коэффициент локальности			

Для моделирования гибридной нечеткой нейросетевой моделью, свернутая структура которой показана на рисунке 5.1, а развернутая на

рисунке 5.2, необходимо задать для входных параметров функции принадлежности.

Таблица 5.2 – Данные по локальности деформации для стали 35

$T, ^\circ\text{C}$	$V, \text{ед.}$	ε	$K_{\Delta l}$
300	4	0.84	1.48
500	4	1.43	1.24
500	6	0.74	1.56
500	8	0.42	2.1
400	4	1.327	2.03
400	8	1.17	1.36
400	6	1.06	2.5
300	6	0.96	1.95
300	8	0.31	10

Примечание: T – температура печи; V – скорость деформации; ε – деформация; $K_{\Delta l}$ – коэффициент локальности

Количество их может выбираться произвольно, но оптимальным количеством считается от 3 до 7. При выполнении исследования число данных функций изменялось от 3 до 5 для каждого параметра, и соответственно, для них были получены ошибки моделирования.

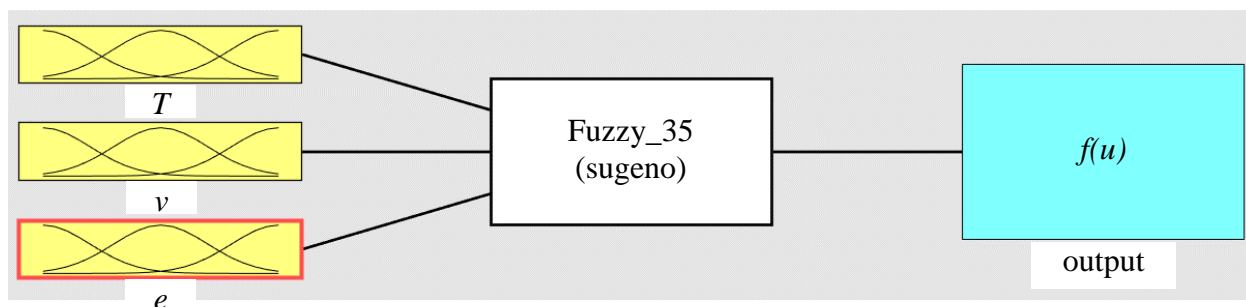


Рисунок 5.1 – Структура системы нечёткого вывода

В качестве функции принадлежности выбиралась различные функции. Это были Гауссова функция или треугольная функция, рисунок 5.3. Три входа: деформация, скорость деформации и температура проходят в первом слое фаззификацию. Эта процедура заключается в переводе четкого числа в нечеткую переменную при помощи функции принадлежности. Каждый параметр для этого представляется в виде набора определенного количества

функций принадлежности заданного типа, которые делят весь диапазон изменения переменной на участки, которым могут присваиваться наименование, например, по величине: малый, средний и большой параметры.

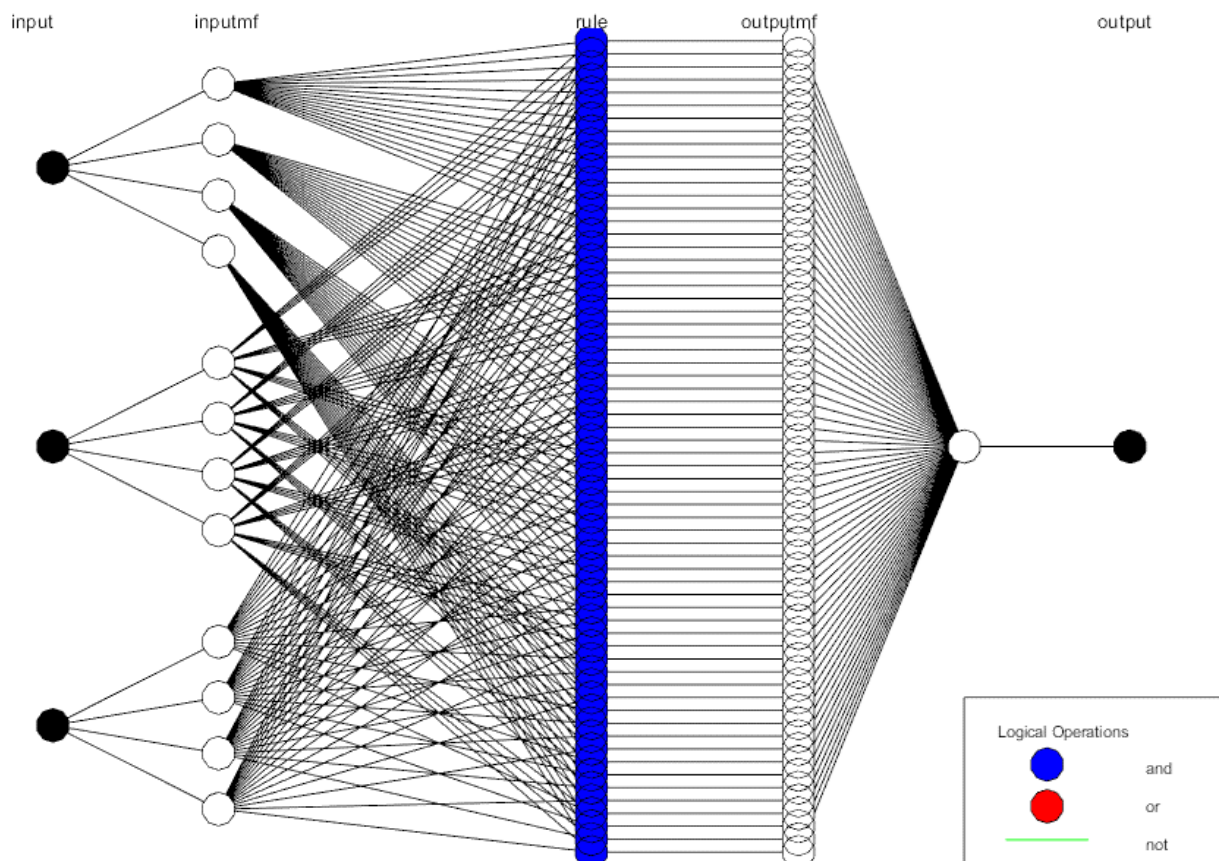


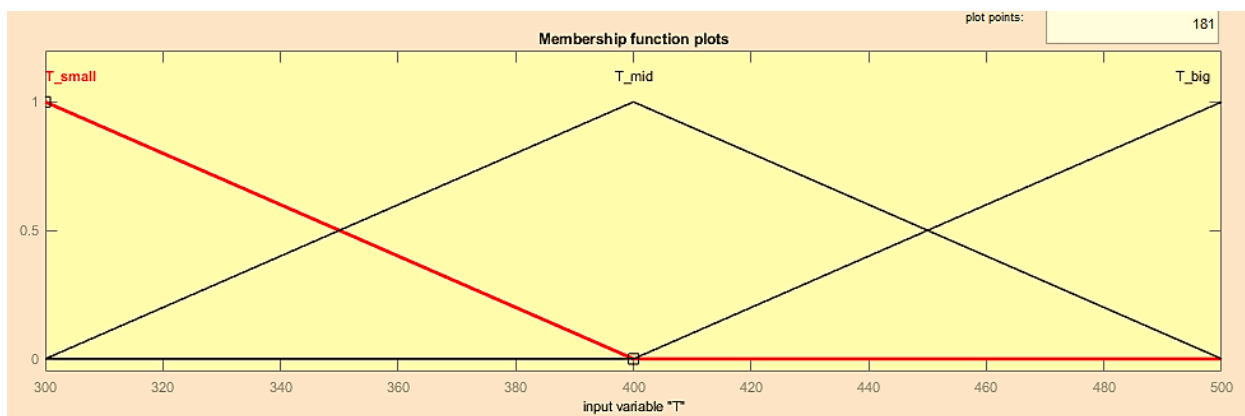
Рисунок 5.2 – Структура гибридной сети с четырьмя функциями принадлежности во входном слое

В случае использования большего количества функций принадлежности названия могут, например, очень маленький параметр, маленький параметр и так далее. Переведенные в нечеткие переменные, значения параметров попадают в базу лингвистического вывода, которая формируется в процессе обучения модели. Выходной слой представляет из себя линейную комбинацию выходов с каждого правила [111].

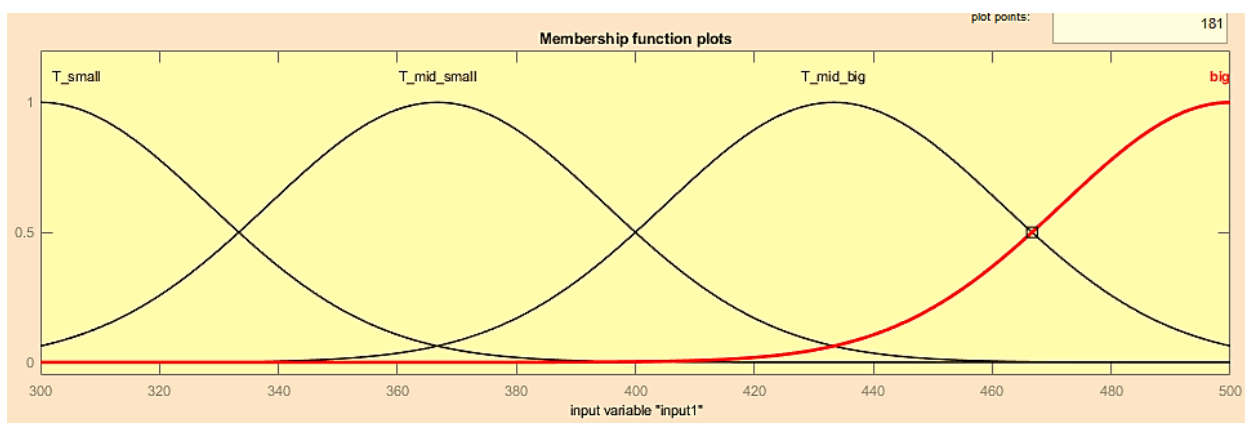
Для обучения необходимо задать число циклов (в нашем случае – 40). Метод обучения – обратное распространение ошибки. Данный метод

обучения находит расположение функций принадлежности, а также их форму, обеспечивающие минимальную погрешность обучения. При обучении исходные данные разделяются на тренировочные и тестирующие.

Обученная система отражается в правилах вывода, которые находятся в центральном блоке.



а



б

а – три треугольных функции; б – четыре Гауссовы функции

Рисунок 5.3 – Варианты выбора функций принадлежности

В основе описанного моделирования лежат следующие допущения. Процесс правки растяжением с нагревом является многомерным и характеризуется значениями входного вектора $X=(X_1, X_2, \dots, X_i)$, а также выходом – коэффициентами локальности, параметрами деформации по участкам и т.п. $Y=(Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$.

Процесс вывода представлен в виде правил «ЕСЛИ-ТО».

Для нечёткого логического вывода могут использоваться нечёткие модели типа Мамдани или Сугэно. В последней вывод следующего типа:

$$\bigcup_{p=1}^{k_j} \bigcap_{i=1}^n (x_i = a_{i,jp}) \rightarrow y = b_{j,0} + b_{j,1} \cdot x_1 + b_{j,2} \cdot x_2 + \dots + b_{j,n} \cdot x_n, \quad (5.2)$$

$$j = \overline{1, m},$$

где $b_{i,j}$ – коэффициенты;

m – количество функций принадлежности.

Вывод d_j базы нечеткого вывода является линейной функцией:

$$Y_j = b_{j,0} + \sum_{i=1}^n b_{j,i} \cdot x_i, \quad (5.3)$$

Вывод правил, как линейная комбинация параметров функций принадлежности и коэффициентов, показан в таблице 5.3. Здесь: i – компоненты входного вектора X ; j – количество выходных параметров; MF_{ji} – функция принадлежности i -го компонента входного вектора x_i при описании j -го параметра; Y_j – вывод модели.

Таблица 5.3 – Модель для оценки обработки на основе алгоритма Сугэно

x_1	x_2	...	x_i	y_n
MF_{11}	MF_{12}	...	MF_{1i}	Y_1
MF_{21}	MF_{22}	...	MF_{2i}	Y_2
...
MF_{j1}	MF_{j2}	...	MF_{ji}	Y_j

В результате получаем систему, готовую к использованию, а именно, лингвистические правила вывода, рисунок 5.4. Эти правила, могут быть представлены также графически, рисунок 5.5.

1. If (temperatyra is small) and (skorost is small) and (deformacia is small) then (lokalnost is mid) (1).....
2. If (temperatyra is small) and (skorost is small) and (deformacia is mid) then (lokalnost is mid) (1)
3. If (temperatyra is small) and (skorost is small) and (deformacia is big) then (lokalnost is mid) (1)
4. If (temperatyra is small) and (skorost is mid) and (deformacia is small) then (lokalnost is big) (1)
5. If (temperatyra is small) and (skorost is mid) and (deformacia is mid) then (lokalnost is big) (1)
6. If (temperatyra is small) and (skorost is mid) and (deformacia is big) then (lokalnost is big) (1)
7. If (temperatyra is small) and (skorost is big) and (deformacia is small) then (lokalnost is oshibka) (1)
8. If (temperatyra is small) and (skorost is big) and (deformacia is mid) then (lokalnost is small) (1)
9. If (temperatyra is small) and (skorost is big) and (deformacia is big) then (lokalnost is big) (1)
10. If (temperatyra is mid) and (skorost is small) and (deformacia is small) then (lokalnost is small) (1)
11. If (temperatyra is mid) and (skorost is small) and (deformacia is mid) then (lokalnost is big) (1)
12. If (temperatyra is mid) and (skorost is small) and (deformacia is big) then (lokalnost is mid) (1)
13. If (temperatyra is mid) and (skorost is mid) and (deformacia is small) then (lokalnost is big) (1)
14. If (temperatyra is mid) and (skorost is mid) and (deformacia is mid) then (lokalnost is mid) (1)
15. If (temperatyra is mid) and (skorost is mid) and (deformacia is big) then (lokalnost is big) (1)
16. If (temperatyra is mid) and (skorost is big) and (deformacia is small) then (lokalnost is big) (1)
17. If (temperatyra is mid) and (skorost is big) and (deformacia is mid) then (lokalnost is big) (1)
18. If (temperatyra is mid) and (skorost is big) and (deformacia is big) then (lokalnost is big) (1)
19. If (temperatyra is big) and (skorost is small) and (deformacia is small) then (lokalnost is big) (1)
20. If (temperatyra is big) and (skorost is small) and (deformacia is mid) then (lokalnost is mid) (1)
21. If (temperatyra is big) and (skorost is small) and (deformacia is big) then (lokalnost is mid) (1)
22. If (temperatyra is big) and (skorost is mid) and (deformacia is small) then (lokalnost is big) (1)
23. If (temperatyra is big) and (skorost is mid) and (deformacia is mid) then (lokalnost is big) (1)
24. If (temperatyra is big) and (skorost is mid) and (deformacia is big) then (lokalnost is mid) (1)
25. If (temperatyra is big) and (skorost is big) and (deformacia is small) then (lokalnost is small) (1)
26. If (temperatyra is big) and (skorost is big) and (deformacia is mid) then (lokalnost is mid) (1)
27. If (temperatyra is big) and (skorost is big) and (deformacia is big) then (lokalnost is big) (1)

Рисунок 5.4 – Лингвистические правила вывода для стали 35

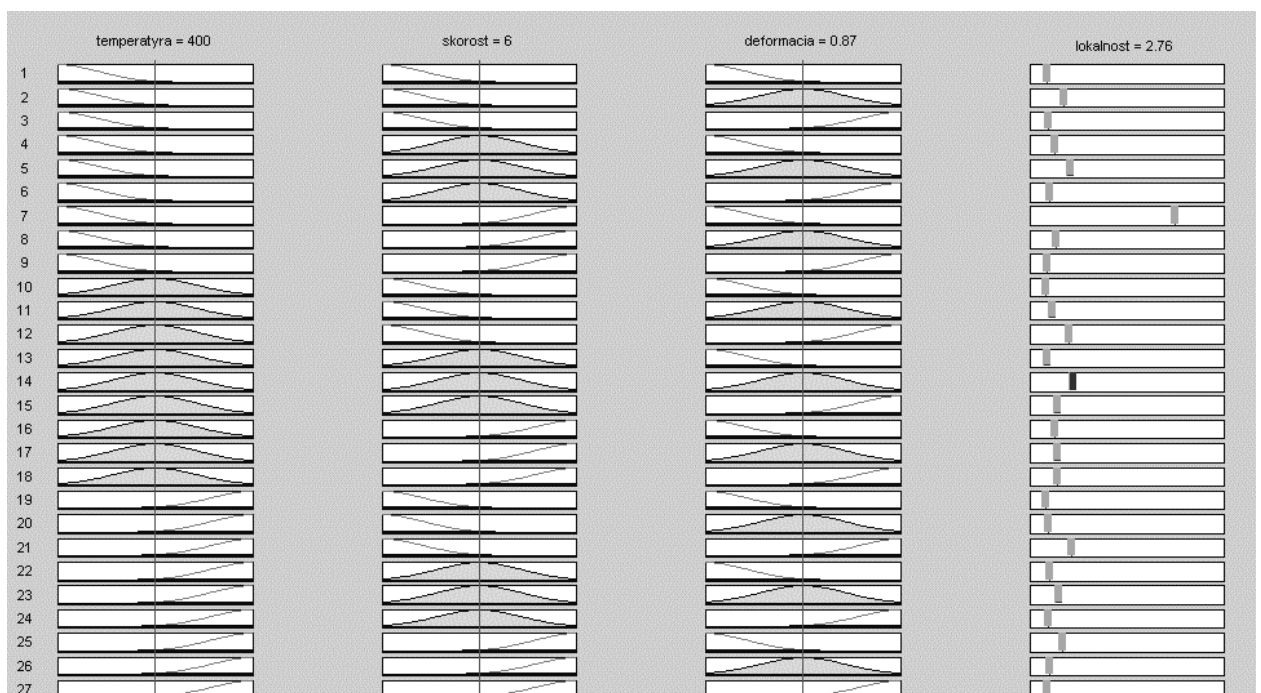
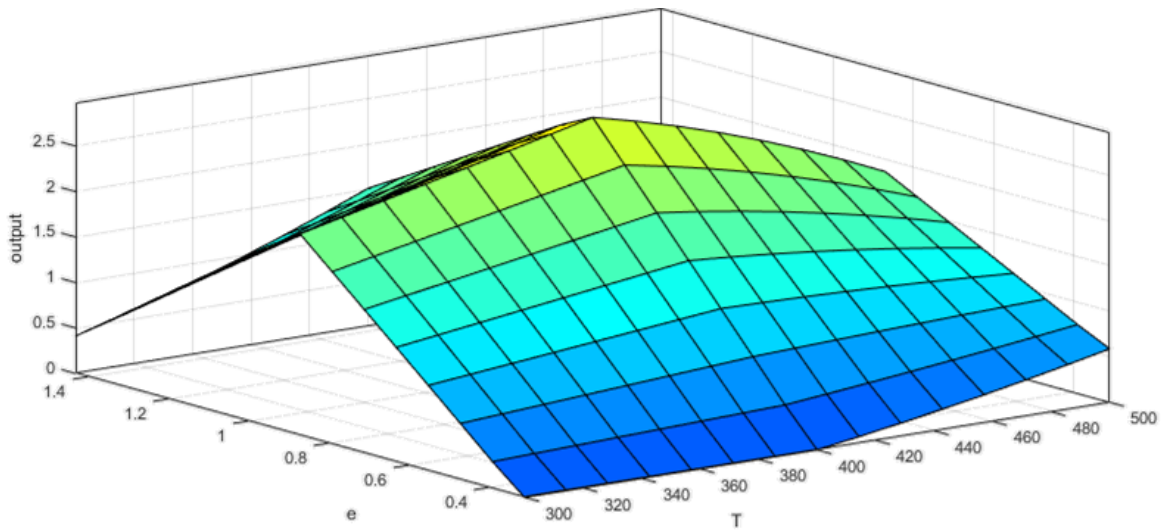
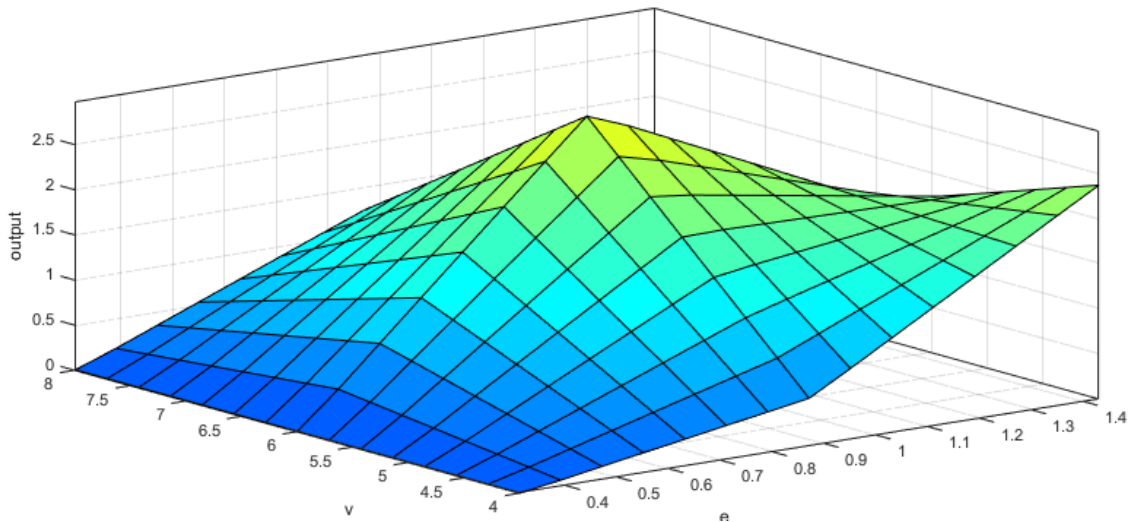


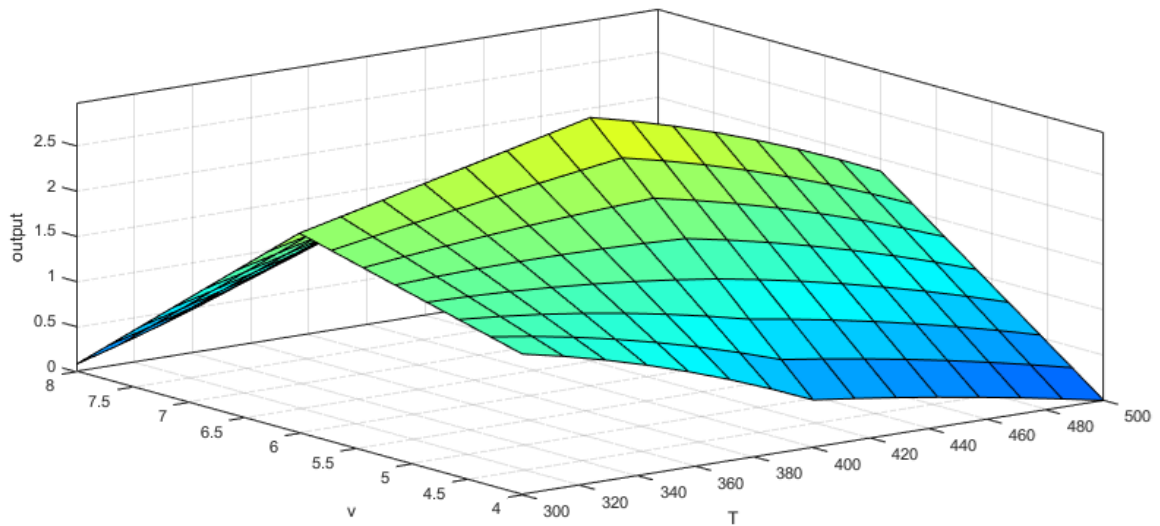
Рисунок 5.5 – Графические правила вывода для стали 35



а



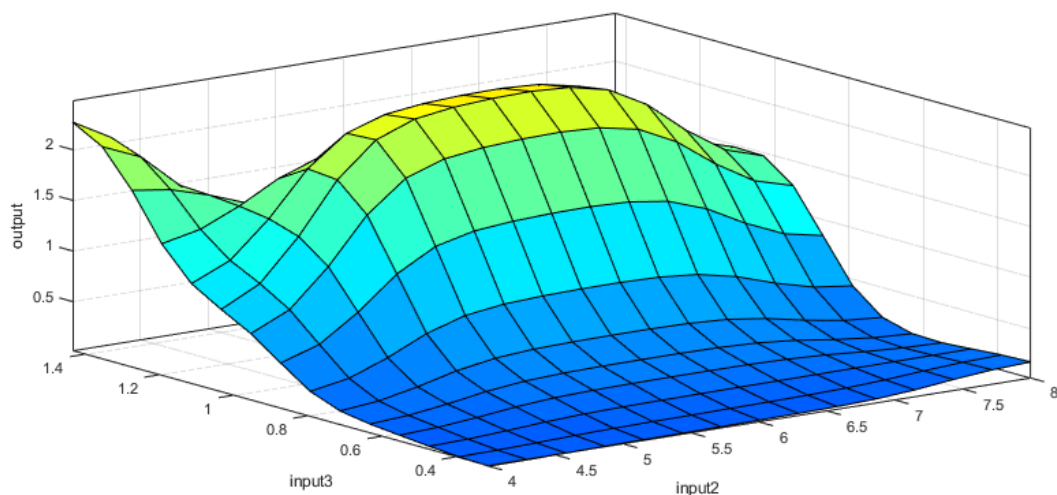
б



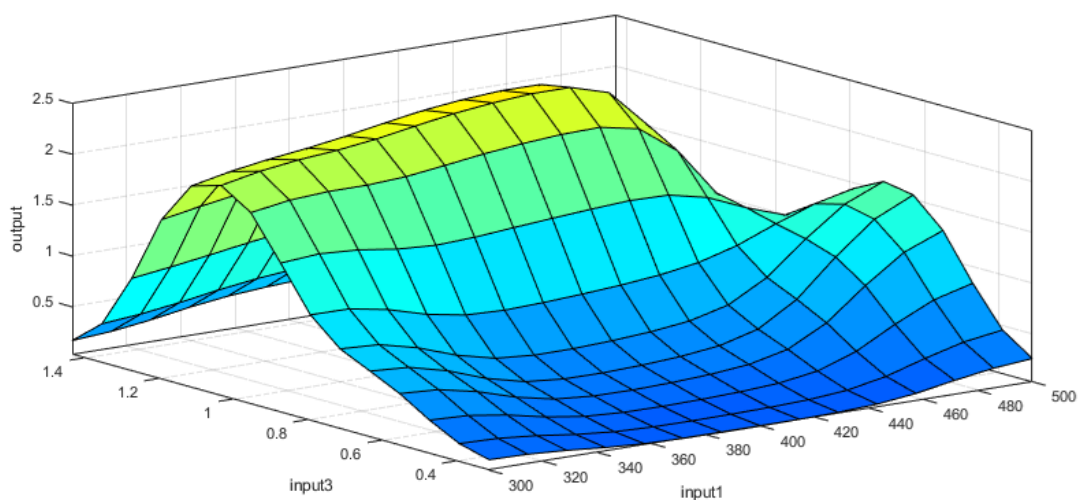
в

а – деформация-температура; б – скорость-деформация; в – скорость-температура

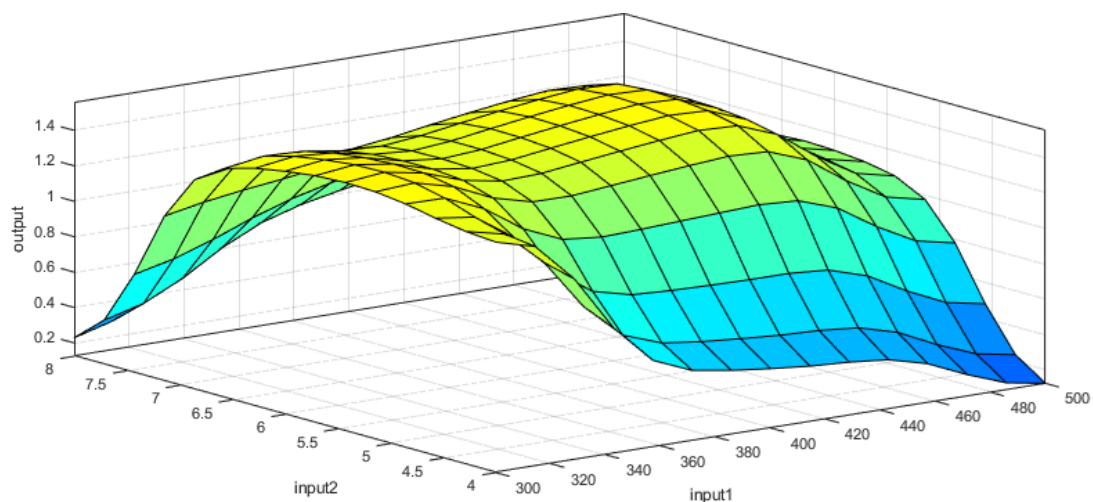
Рисунок 5.6 – Поверхности вывода коэффициента локальности для стали 35 в системе координат (T , °C; ϵ , %; v , c^{-1})



а



б



в

а – деформация-температура; б – скорость-деформация; в – скорость-температура
(Input 1 – T ; Input 2 – v ; Input 3 – ϵ)

Рисунок 5.7 – Поверхности вывода коэффициента локальности для 12X18Н10Т в системе координат (T , °C; ϵ , %; v , c^{-1})

Обучение системы для материала 12X18H10T проходит аналогично вышеописанному алгоритму.

Результат моделирования представляется в виде трехмерной поверхности вывода для двух входных технологических параметров, представленных на рисунках 5.6 и 5.7.

При тестировании полученной ANFIS модели для стали 35 по сплаву 12X18H10T график ошибок показан на рисунке 5.8.

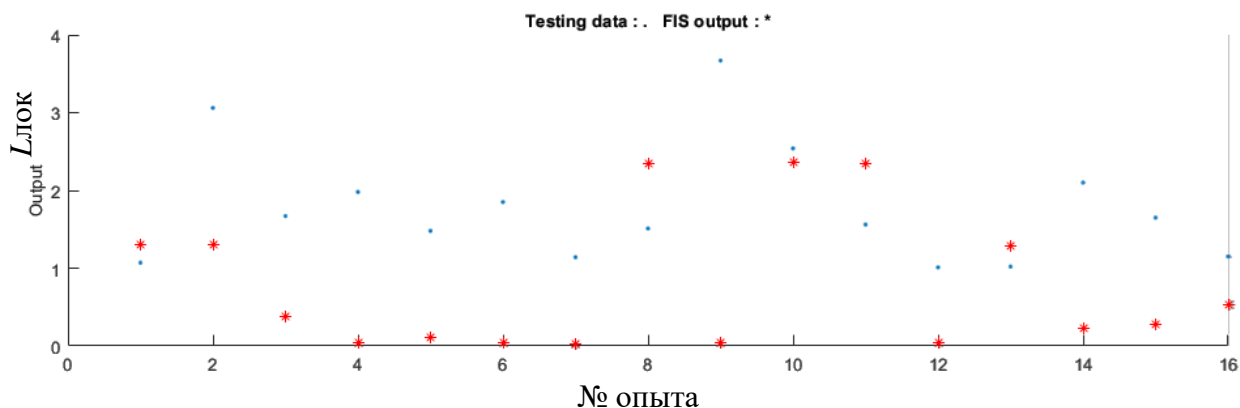


Рисунок 5.8 – Данные по тестированию полученной ANFIS (три функции принадлежности по каждому входу) модели для стали 35, по тестовым данным, по локальности деформирования сплава 12X18H10T. Средняя ошибка 1,5

Тестирование модели ANFIS тренированной для данных 12X18H10T по тестовым данным для стали 35 показано на рисунке 5.9.

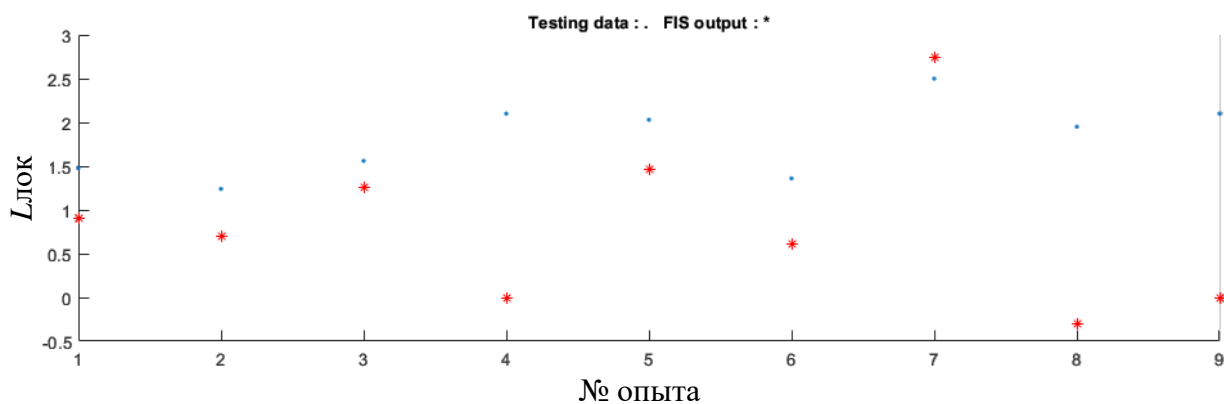


Рисунок 5.9 – Данные по тестированию полученной ANFIS модели для стали 35 по тестовым данным, по локальности деформирования сплава 12X18H10T. Средняя ошибка 1,3

Для модели (четыре функции принадлежности по каждому входу) для стали 35 тестированной по сплаву 12X18H10T, на рисунке 5.10.

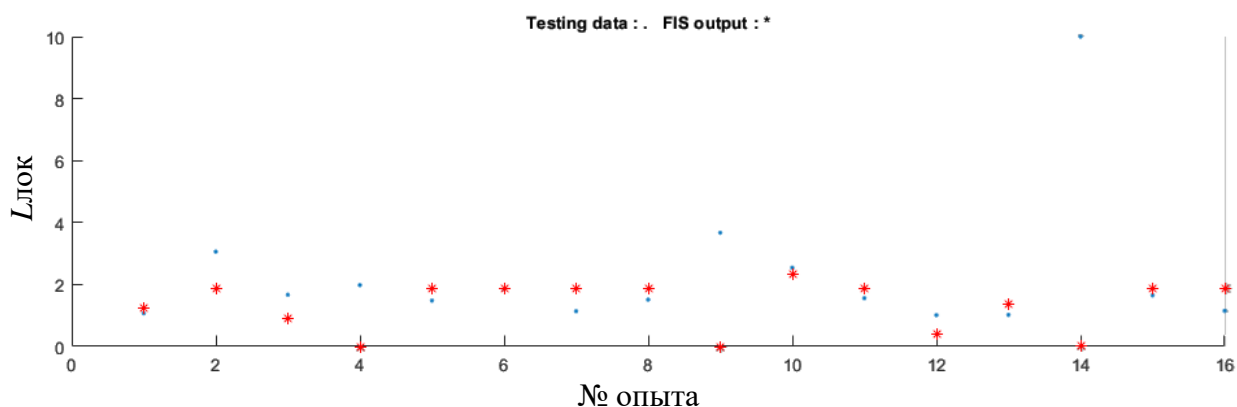


Рисунок 5.10 – Данные по тестированию полученной ANFIS модели для стали 35 по тестовым данным по локальности деформирования сплава 12X18H10T. Средняя ошибка 0,4

На рисунках 5.8-5.10, есть стабильно эксперименты с большой ошибкой, например, для сплава 12X18H10T – это опыты № 4, 6, 9, 14). Следовательно, данные по ним отличаются какой-то систематической ошибкой, которая приводит к значительному расхождению экспериментальных и моделируемых данных [117, 120].

Использование модели с большим количеством функций принадлежности делает более гибким анализ входных данных (число правил вывода возрастает с 27 до 64).

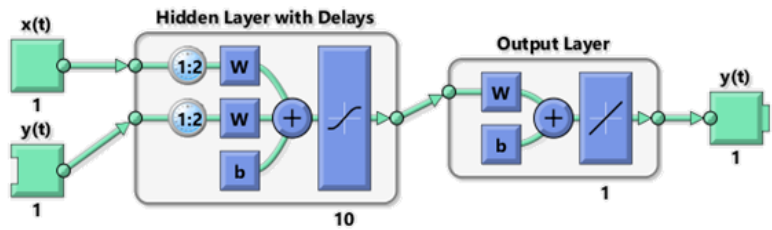
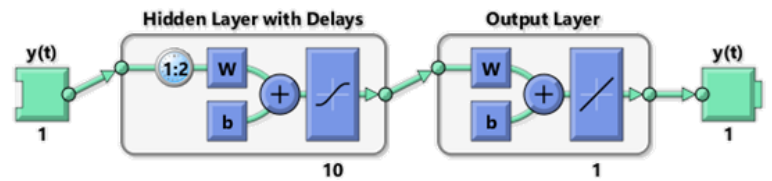
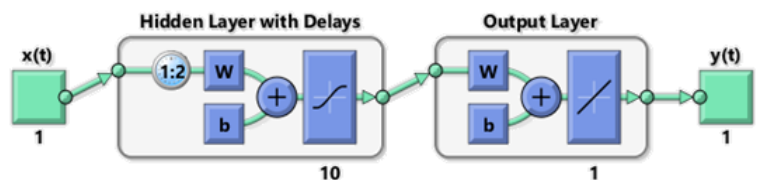
Данный метод моделирования обеспечивает аппроксимацию сложной зависимости с минимальным набором данных.

5.3 Моделирование процесса деформирования при правке растяжением с нагревом при помощи нейронных сетей

Прогноз заданного параметра обеспечивает своевременную реакцию на изменения в ходе обработки. Прогнозирование временной последовательности, которая представляет собой значения деформации или

напряжений в процессе правки растяжением с нагревом, можно провести при помощи нейронных сетей разных типов. Это могут быть рекуррентные нейронные сети для моделирования временных последовательности типа нелинейной авторегрессионной сети с экзогенными входами (NARX), нелинейной авторегрессионной сетью (NAR), а также сеть нелинейные вход-выход, таблица 5.4. Результаты моделирования по прогнозированию временного ряда $y(t)$ в качестве которого взята деформация, полученная при растяжении образца на разрывной машине, показаны в таблице 5.5. Для дополнительного ряда $x(t)$ использовались разницы соседних отсчетов основного ряда $y(t)$.

Таблица 5.4 – Результаты моделирования временной последовательности-деформации

Тип сети	Задача	Структурная схема
NARX	Предсказать $y(t)$ по d прошлым отсчетам $y(t)$ и другому ряду $x(t)$	
NAR	Прогноз $y(t)$ по d прошлым отсчетам $y(t)$	
Нелинейный вход-выход	Предсказать $y(t)$ по d прошлым отсчетам другого ряда $x(t)$	

Данные делились в соотношении: 70% – 19757 отсчетов; по 15% – 4233 отсчетов. 70% – тренировочная выборка; по 15% – валидационная и тестовая выборки. Структура сетей однотипные: 10 нейронов в скрытом слое.

Самый точный прогноз по $y(t)$ у нелинейной авторегрессионной сети NARX, где $y(t)$ – смещение, а $x(t)$ – разницы соседних отсчетов основного ряда $y(t)$.

Таблица 5.5 – Результаты прогнозирования

Тип сети	Формула	Средняя квадратичная ошибка	Точность
NARX	$y(t) = f\left(x(t-1), \dots, x(t-d), y(t-1), \dots, y(t-d)\right)$	$1,11 \cdot 10^{-5}$	0,99995
		$1,51 \cdot 10^{-5}$	0,99992
		$8,7 \cdot 10^{-6}$	0,99989
NAR	$y(t) = f(y(t-1), \dots, y(t-d))$	$8,5 \cdot 10^{-6}$	0,99995
		$1,4 \cdot 10^{-5}$	0,99992
		$2,5 \cdot 10^{-5}$	0,99999
Нелинейный вход-выход	$y(t) = f(x(t-1), \dots, x(t-d))$	$2,78 \cdot 10^{-5}$	0,99986
		$3,3 \cdot 10^{-5}$	0,99983
		$3,05 \cdot 10^{-5}$	0,99984

Примечание: В таблице 11 в колонках: средняя квадратичная ошибка и размах указаны данные по строкам для тренировочной, валидационной и тестовой выборки.

Представлены результаты моделирования коэффициента локальности от технологических входных параметров правки растяжением с нагревом. На рисунке показана структурная схема нейронной сети. Структура сети с прямым распространением сигнала показана на рисунке 5.11.

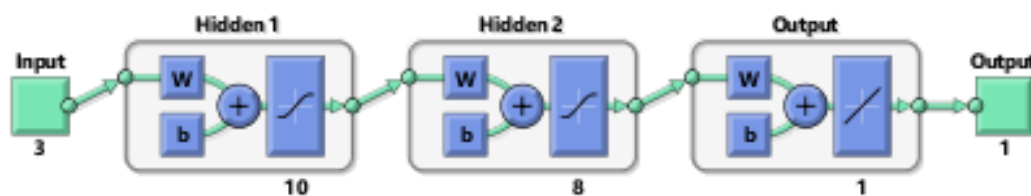


Рисунок 5.11 – Структура двухслойной сети (первый слой – 10 нейронов, второй слой – 8 нейронов)

Порядок работы с данными. После загрузки и объединения в одну матрицу проходит нормализация данных с нулевым средним и единичной дисперсией.

Выбор архитектуры сети (2 слоя, количество нейронов 10 и 8). Выбор метода обучения – Левенберга-Маркварта или обратного распространения ошибки. Выбор функций активации (сигмоидальная функция или

гиперболический тангенс). Количество загруженных исходных данных делилось в соотношении: 70% тренировочные; по 15 % – валидационная и тестирующая выборки. Для данных по локальности для стали 35 результат обучения показан на рисунке 5.12 и 5.13.

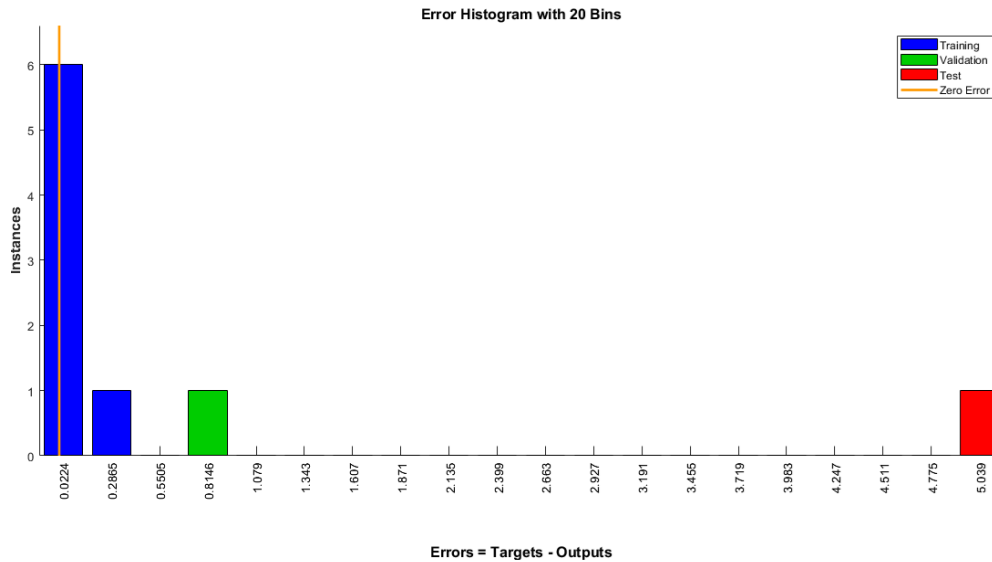


Рисунок 5.12 – Гистограмма ошибок для выборок по стали 35 (Instances – частота, Errors – Ллок.реальный - Ллок.модель)

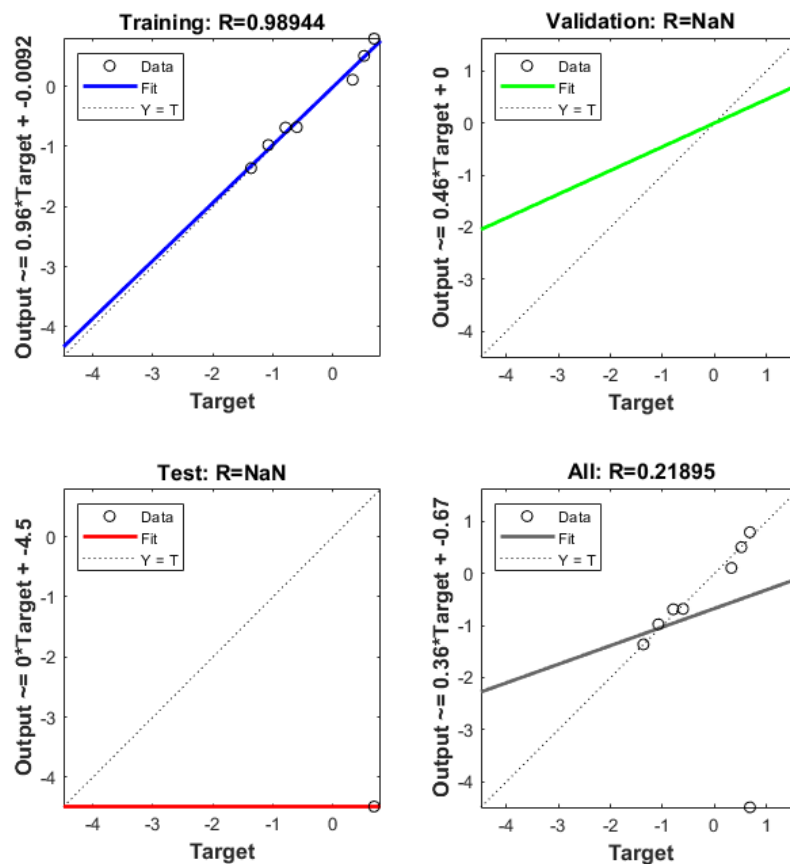


Рисунок 5.13 – Регрессионный график по стали 35 (Target – Ллок.реальный, Output – Ллок.модель)

Результат получается не очень хороший. При точности обучения 0,98 суммарная точность – 0,21. Это связано с малым количеством данных и большой зашумленностью данных, а также систематическими ошибками.

Аналогичные результаты получены для данных по сплаву 12X18Н10Т, на рисунке 5.14 и 5.15.

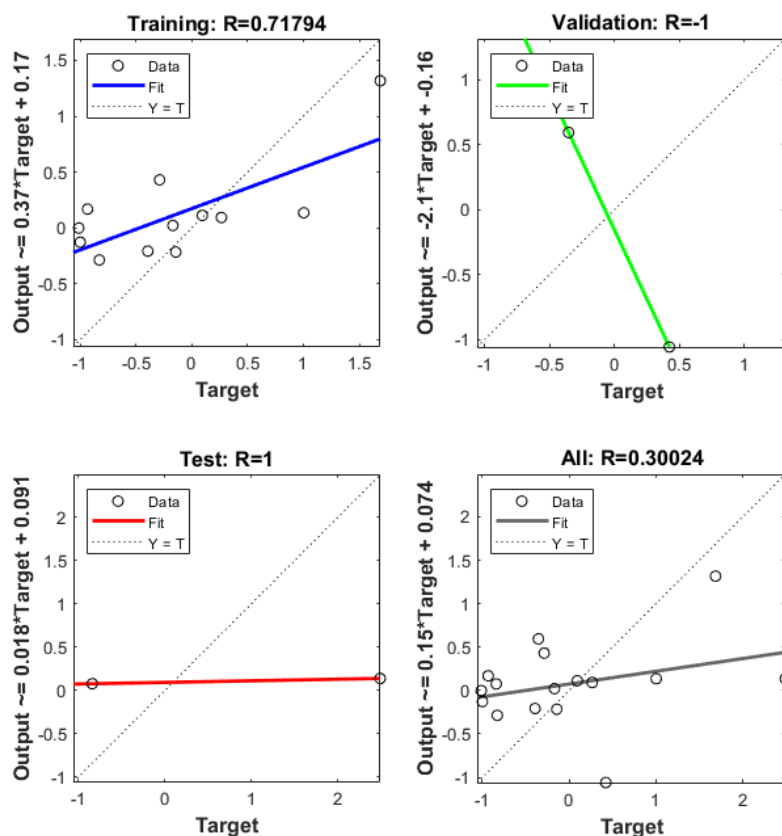


Рисунок 5.14 – Регрессионный график по сплаву 12X18Н10Т (Target – Ллок.реальный, Output – Ллок.модель)

Показаны результаты моделирования процесса нагружения, где входными параметрами являются деформационные характеристики и температура, а выходом является напряжения.

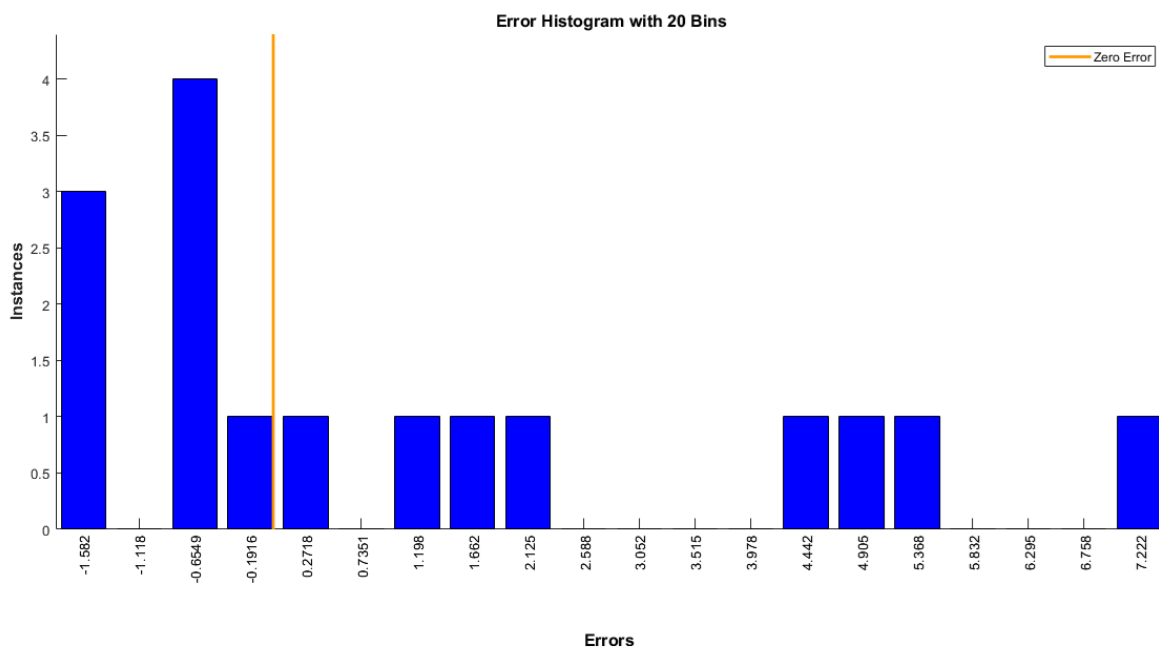


Рисунок 5.15 – Гистограмма ошибок для выборок по сплаву 12X18H10T (Instances – частота, Errors – Ллок.реальный - Ллок.модель)

Нейронная сеть для обработки зависимости напряжений от деформации и температуры по данным реологической модели Ишлинского без упрочнения показана на рисунке 5.16.

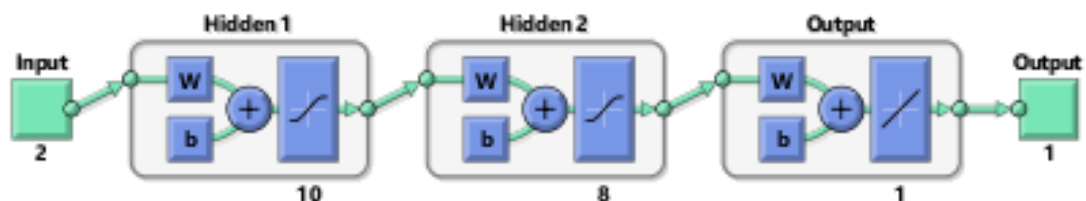
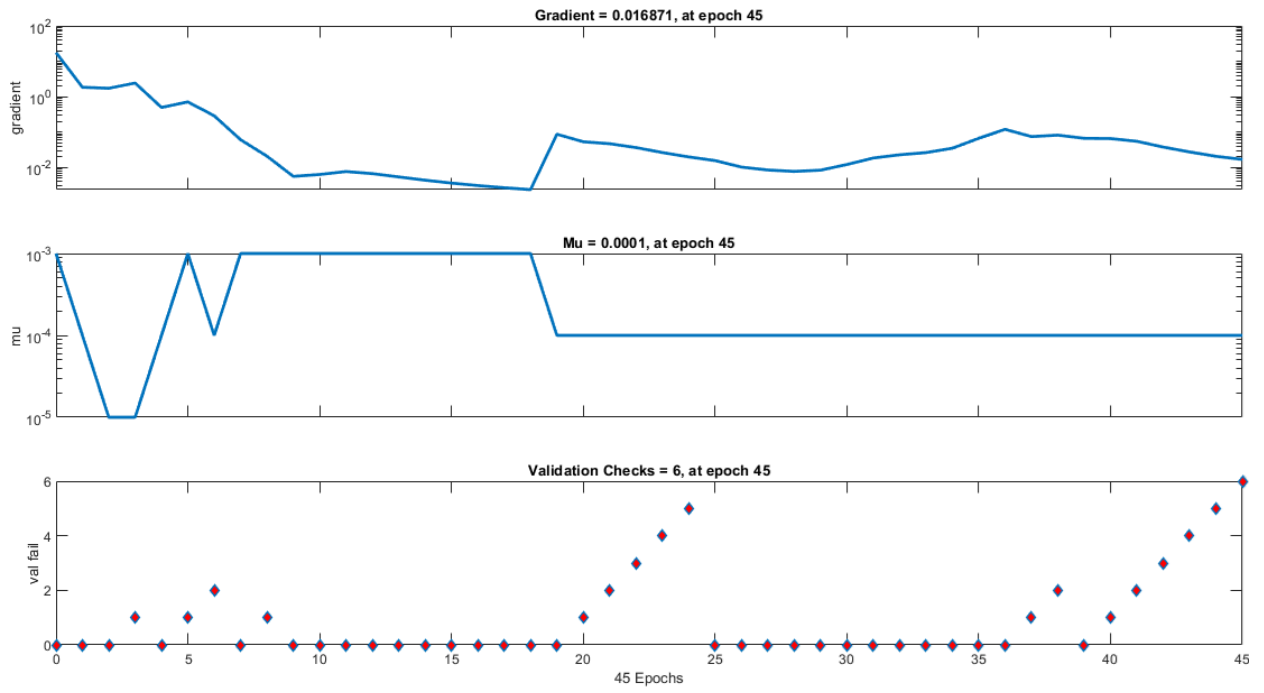


Рисунок 5.16 – Нейронная сеть для моделирования силовой зависимости

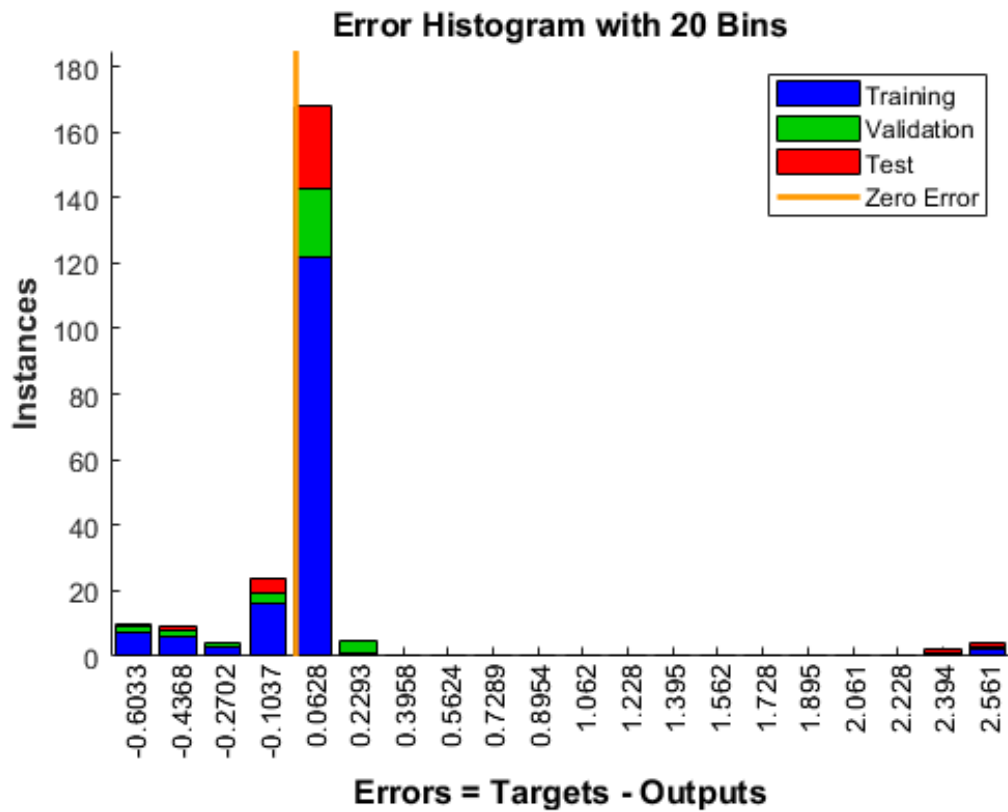
Исходные данные – результаты моделирования в виде двух столбцов: деформация и температура. Выход – напряжение. Данные нормализовались.

Менялись алгоритмы обучения и функция преобразования.

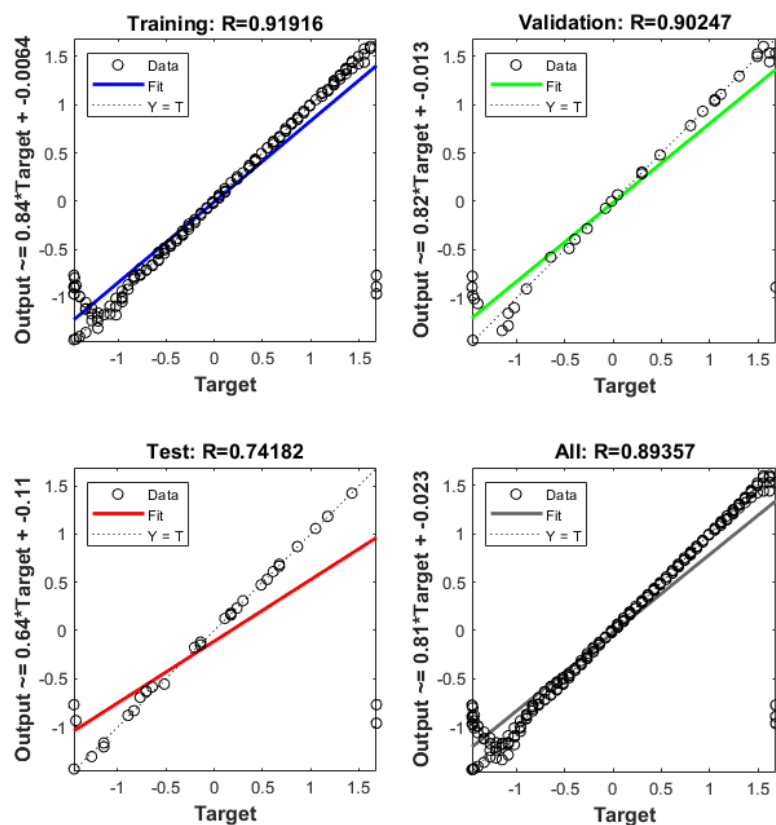
Результат моделирования для варианта сети № 1, указанного в таблице 5.6, показан на рисунке 5.17.



a



6



В

а – ход процесса обучения; б – распределение ошибок по данным;
в –регрессионные графики по выборкам;

Рисунок 5.17 – Результат обучения сети № 1 для моделирования силовой зависимости

Таблица 5.6 – Данные по результатам моделирования нейронными сетями силовой зависимости

Ошибка с максимальной частотой	$R_{\text{тренир.}}$	$R_{\text{валид.}}$	$R_{\text{тест.}}$	$R_{\text{сум.}}$	Алгоритм обучения	Функция преобразования
2 входа						
0,063	0,92	0,90	0,74	0,89	Левенберг	logsig
-0,00281	0,85	0,96	0,96	0,88	Обратного распространения сигнала	logsig
3 входа						
-0,000013	0,99998	0,99995	0,99992	0,99997	Левенберг	tansig
0,00002	0,99998	0,99995	0,99996	0,99997	Левенберг	logsig
—	—	—	—	—	Обратного распространения сигнала	logsig

Как видно из таблицы 5.6, обучение на ограниченном количестве данных (250 точек для двух входов) для обучения с обратным результатом дает худший результат на тренировочной выборке, но намного лучше на тестирующей. В первом случае, скорее всего, идет переобучение, а во втором – лучше обобщение [24, 28].

Для трех входов при числе данных обучении более 600 данные с изменением функции активации существенно не сказывается, а смена алгоритма обучения при проведении максимального количества итераций – 1000, не дало положительного результата [37].

5.4 Кластеризация деформационных параметров при правке растяжением с нагревом

Исследование процессов деформирования может проходить с использованием методов обучения без учителя, в отличие от моделирования процессов на основе нейронных сетей с прямым распространением сигнала, которые относятся к категории методов обучения с учителем. Основной метод – кластеризация.

Основные методы классификации: кластеризация методом k -средних, k -нечетких средних и иерархической классификации. Они относятся к методам обучения без учителя. Это значит, что набор входных данных группируется или разделяется по параметрам, которые имеются у каждого наблюдения [27, 49].

При растяжении образцов для каждой определенной стадии пластического течения формируется определенная картина распределения пластических зон. Параметры, характеризующие распределение этих зон, соответственно для каждой такой стадии должны иметь какие-либо специфические признаки. Тогда при измерении различных характеристик пластической деформации по длине каждый образец можем однозначно

отнести к какой-либо стадии пластического течения по величине деформации и напряжению.

Точность анализа таких данных снижается из-за их дискретного характера измерений. Из-за технологических сложностей непрерывного контроля пластической деформации по длине удлинение замерялось по участкам. Последние эксперименты проведены с использованием системы машинного зрения. Особенностью обучения «без учителя» является, как правило, отсутствие проверки правильности выполненного разделения. В нашем случае подтверждение кластеризации проводится на основе экспериментальных данных.

Кластеризация – это методика определения подгрупп (кластеров) в множестве данных. Данные в каждом кластере должны быть максимально схожие, а в разных кластерах – максимально отличаться. Кластеризация методом k -средних начинается с задания числа кластеров [35]. Можем определить их в количестве трех – для каждой стадии пластического течения или пяти – с учетом переходных участков между стадиями. Если для таких данных будет справедливо соответствие полученных групп при кластеризации стадиям пластического течения, то можно будет использовать информацию о процессе деформирования для повышения надежности процесса с гарантированным выходом на заданную стадию.

Строился график дискретной локализации. Это связано с тем, что деформация измерялась только в определенных точках с заданным шагом. Характер удлинений зависит от исходных неравномерных свойств материала, а также определяется волновым характером распространения пластической волны.

Сначала даны исходные данные в таблице 5.7. Обработанные результаты эксперимента сведены в таблицах 5.8 и 5.9. В последней таблице данные нормированы для исключения влияния масштаба значений на степень влияния на выходной параметр. С целью обособления каждой стадии только по признакам распределения, не связанными непосредственно с

величинами деформаций и напряжений, была сформирована таблица значений, которая первоначально проверялись методом корреляционного анализа.

Результаты измерения параметров растянутых участков приведены в таблице. Для исключения влияния масштабного фактора проведена нормализация данных по формуле:

$$Z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma_i}, \quad (5.4)$$

где x_i – нормируемых параметр;

\bar{x} – среднее значение параметра;

σ_i – квадратичное отклонение, мм.

Таблица 5.7 – Параметры правки растяжением с нагревом с использованием установки

Температура нагрева T , °С	Деформация		Скорость нагружения, мм/с	Показания динамометра			Средняя деформация ср, %	Коэффициент локальности	
	от нагрузки, %	общая, %		после нагружения, Н	после выдержки 30 мин, Н	после охлаждения до 20, Н		$L1=\max/\text{ср}$	$L2=\max/\text{min}$
200	0	0,25	0,053						
200	0	0,25	0,053						
300	0	0,34	0,053			18000	0,5	2,2	5,5
300	0	0,34	0,053			17600	0,41	2	5,13
300	0,76	1,1	0,053	9750	5750	18000	0,94	1,33	2,12
300	0,41	0,8	0,053	6750	4750	17750	0,79	1,52	2,12
300	0,41	0,8	0,053	6250	4750	21500	0,6	3,77	28,25
300	1,08	1,5	0,053	14500	12000	21000	1,51	1,93	2,98
300	1,08	1,5	0,053	18500	17000	27000	0,99	3,89	16,71
300	1,55	2	0,053	16000	13000	21500	2,23	1,94	11,53
300	1,69	2,15	0,00457	17000	14000	23500	2,12	2,46	74,57
300	1,55	2	0,00457	18000	15000	24000	1,63	1,32	2,15
300	3,45	4	0,00457	23500	17000	29500	4,17	1,54	2,45
300	3,45	4	0,00457	23500	17000	29000	4,09	1,22	2,11
300	5,35	6	0,00457	24000	17000	30000	4,43	1,4	3,39
300	5,35	6	0,00457	25000	23000	31000	4,28	1,54	4,25

Таблица 5.8 – Ненормированные данные измерений

<i>F</i>	<i>Vmm</i>	<i>LMAXR</i>	<i>LCPR</i>	Δe_R	<i>e_{minR}</i>	<i>D/dep-emin</i>	<i>D_{dep-emin}</i>	<i>Summa</i>	<i>IQR</i>	<i>skewness</i>	<i>kurtosis</i>	<i>p-value</i>
18000	0,053	55	2,261565	1,08	0,02	1,81374	6,004167	1,250075	0,3475	0,447326	-0,14567	0,8276
17600	0,053	5,09375	1,962465	0,655	0,16	1,919431	10,55	0,7422	0,22	0,385914	-0,6803	0,4117
18000	0,053	2,295082	1,476427	0,79	0,61	1,836735	0,720028	0,669448	0,29	0,481997	0,175782	0,934
17750	0,053	3,287671	1,512711	0,835	0,365	2,483871	5,9675	0,904873	0,325	0,022436	-0,67554	0,7423
21500	0,053	4,823529	1,96615	0,65	0,17	1,962733	1,2719	0,5712	0,23875	0,975596	0,978806	0,1288
21000	0,053	11,8	1,723368	2,7	0,25	1,678322	11,53533	12,8827	1,25	-0,31836	-1,16916	0,181
27000	0,053	22,35294	2,419526	3,63	0,17	1,711249	14,72632	203,9395	2,29	0,381118	-1,44063	0,03361
21500	0,053	9,25	1,667084	3,3	0,4	2,315664	0,5037	22,98392	2,1575	-0,26439	-1,50453	0,06547
23500	0,00457	46	1,881818	4,5	0,1	2,565668	0,167218	28,4848	1,35	0,033517	-0,27598	0,5361
24000	0,00457	2,15	1,322173	1,15	1	2,335652	0,267206	1,9271	0,57	-0,34963	-1,0101	0,3495
29500	0,00457	2,45283	1,547619	3,85	2,65	1,949669	0,357612	10,595	0,4875	1,046889	4,157768	0,0194
29000	0,00457	1,461988	1,183432	1,58	3,42	2,630952	0,160588	2,4795	0,455	-0,06134	0,234033	1
30000	0,00457	3,444444	1,402186	4,4	1,8	1,847082	3,946765	15,8779	0,975	-0,90398	2,327104	0,3127
31000	0,00457	4,177215	1,46227	5,02	1,58	2,591829	5,084017	53,08247	1,6	-0,6541	0,092669	0,3483

Таблица 5.9 – Нормированные данные

<i>F</i>	<i>Vmm</i>	<i>L_{MAXR}</i>	<i>L_{CPR}</i>	<i>Δ_{ε_R}</i>	<i>e_{minR}</i>	<i>D/ε_{cp-emin}</i>	<i>D_{ε_{cp-emin}}</i>	<i>Summa</i>	<i>IQR</i>	<i>skewness</i>	<i>kurtosis</i>	<i>p-value</i>
-1,11384	0,834523	2,485028	1,568769	-0,82922	-0,83209	-0,86426	0,334045	-0,45239	-0,76419	0,632442	-0,1426	1,204517
-1,19448	0,834523	-0,42615	0,734403	-1,08863	-0,70072	-0,56338	1,266631	-0,46188	-0,94154	0,524547	-0,48652	-0,02679
-1,11384	0,834523	-0,58941	-0,62144	-1,00623	-0,27848	-0,7988	-0,75	-0,46324	-0,84417	0,693357	0,064176	1,519523
-1,16424	0,834523	-0,53151	-0,52023	-0,97876	-0,50837	1,043485	0,326523	-0,45884	-0,79549	-0,11406	-0,48345	0,95198
-0,40824	0,834523	-0,44191	0,744682	-1,09168	-0,69134	-0,44011	-0,63679	-0,46508	-0,91546	1,56058	0,580734	-0,86434
-0,50904	0,834523	-0,03496	0,06742	0,159567	-0,61627	-1,24978	1,468774	-0,23499	0,491202	-0,71282	-0,80098	-0,7098
0,700558	0,834523	0,580628	2,009416	0,727206	-0,69134	-1,15604	2,12341	3,335642	1,937859	0,516121	-0,97561	-1,14616
-0,40824	0,834523	-0,1837	-0,08959	0,525785	-0,47553	0,564628	-0,79438	-0,04621	1,753549	-0,61799	-1,01672	-1,05183
-0,00504	-1,1127	1,960032	0,509431	1,258223	-0,75702	1,276348	-0,86341	0,056596	0,630304	-0,09459	-0,22643	0,341507
0,09576	-1,1127	-0,59787	-1,05175	-0,7865	0,087465	0,621531	-0,8429	-0,43974	-0,45469	-0,76776	-0,69866	-0,21094
1,204557	-1,1127	-0,5802	-0,42285	0,861486	1,635692	-0,4773	-0,82436	-0,27774	-0,56945	1,685838	2,625656	-1,18823
1,103757	-1,1127	-0,638	-1,43878	-0,52404	2,358198	1,462201	-0,86477	-0,42941	-0,61466	-0,26125	0,101647	1,714922
1,305357	-1,1127	-0,52236	-0,82855	1,197187	0,838121	-0,76935	-0,08803	-0,17901	0,108673	-1,74171	1,44805	-0,31989
1,506956	-1,1127	-0,47962	-0,66094	1,575613	0,63169	1,350823	0,145275	0,516298	0,978058	-1,3027	0,010712	-0,21449
-4,74263	-1,29644	-0,72328	-4,74007	-1,48842	-0,85085	-6,02768	-0,89772	-0,47575	-1,24757	-0,15348	-0,0489	-1,24566

Для анализа взаимосвязанных параметров получена корреляционная матрица. Матрица корреляционных коэффициентов показана на рисунке 5.18. Параметры, коррелирующие друг с другом исключаются из рассмотрения для предотвращения не коллинеарности при дальнейшей кластеризации.

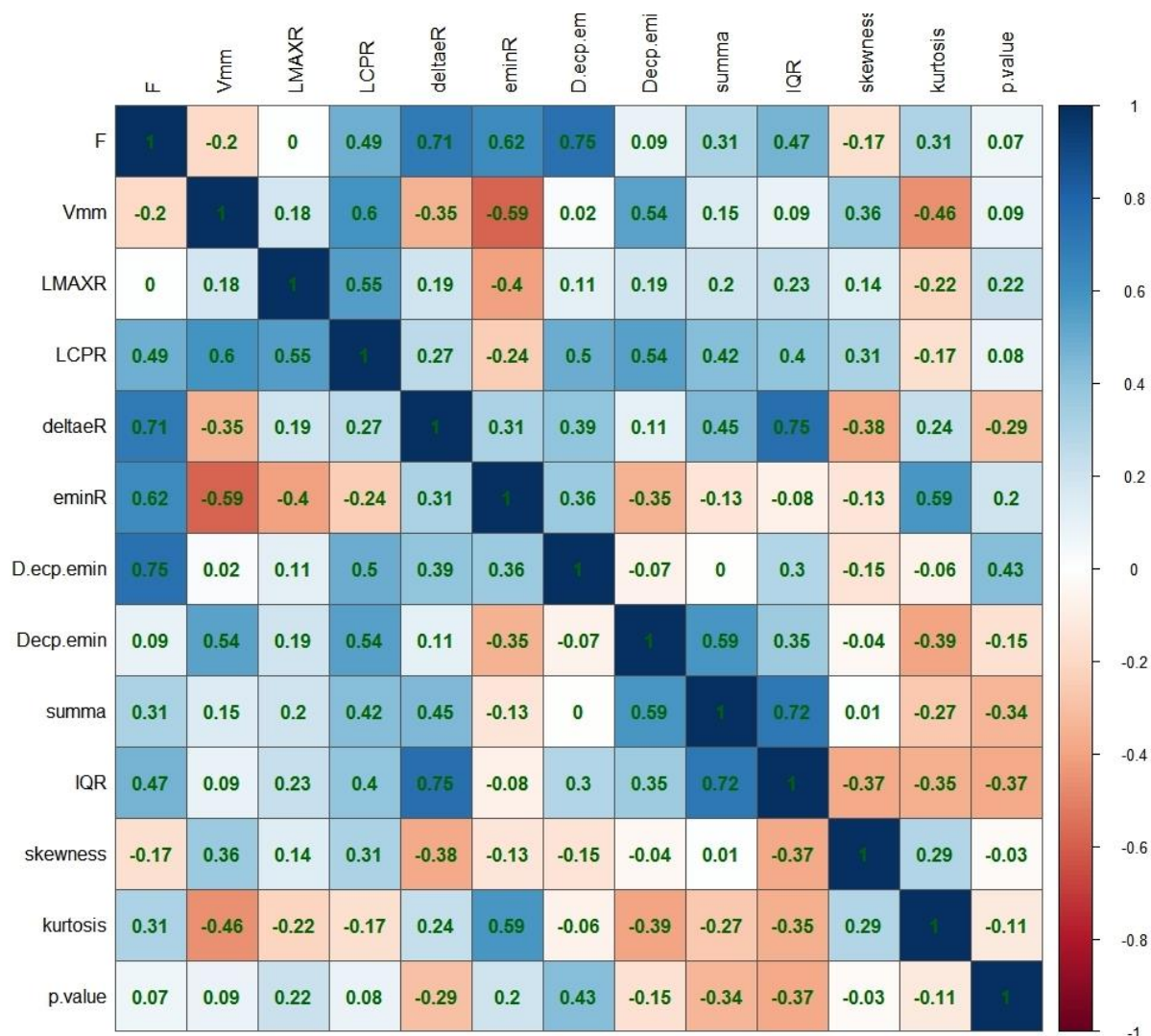


Рисунок 5.18 – Корреляционная матрица параметров

Отбрасываются параметры, которые имеют высокий коэффициент корреляции (например, F , Vmm , $LCPR$, $Decp.emin1$).

Далее методами кластеризации данные разбиваются на однородные группы наблюдений, имеющие сходные значения параметров.

Кластеризация k -средних это способ разделения данных на k непересекающихся кластеров. При кластеризации методов k -средних множество наблюдений X разбивается на подмножества $C_i, i = \overline{1, c}$. Все наблюдения быть распределены по кластерам:

$$U_{i=1, c} C_i = X \quad (5.5)$$

Каждое наблюдение должно относиться только к одному кластеру:

$$C_i \cap C_j = \emptyset, i, j = \overline{1, c}, i \neq j, \quad (5.6)$$

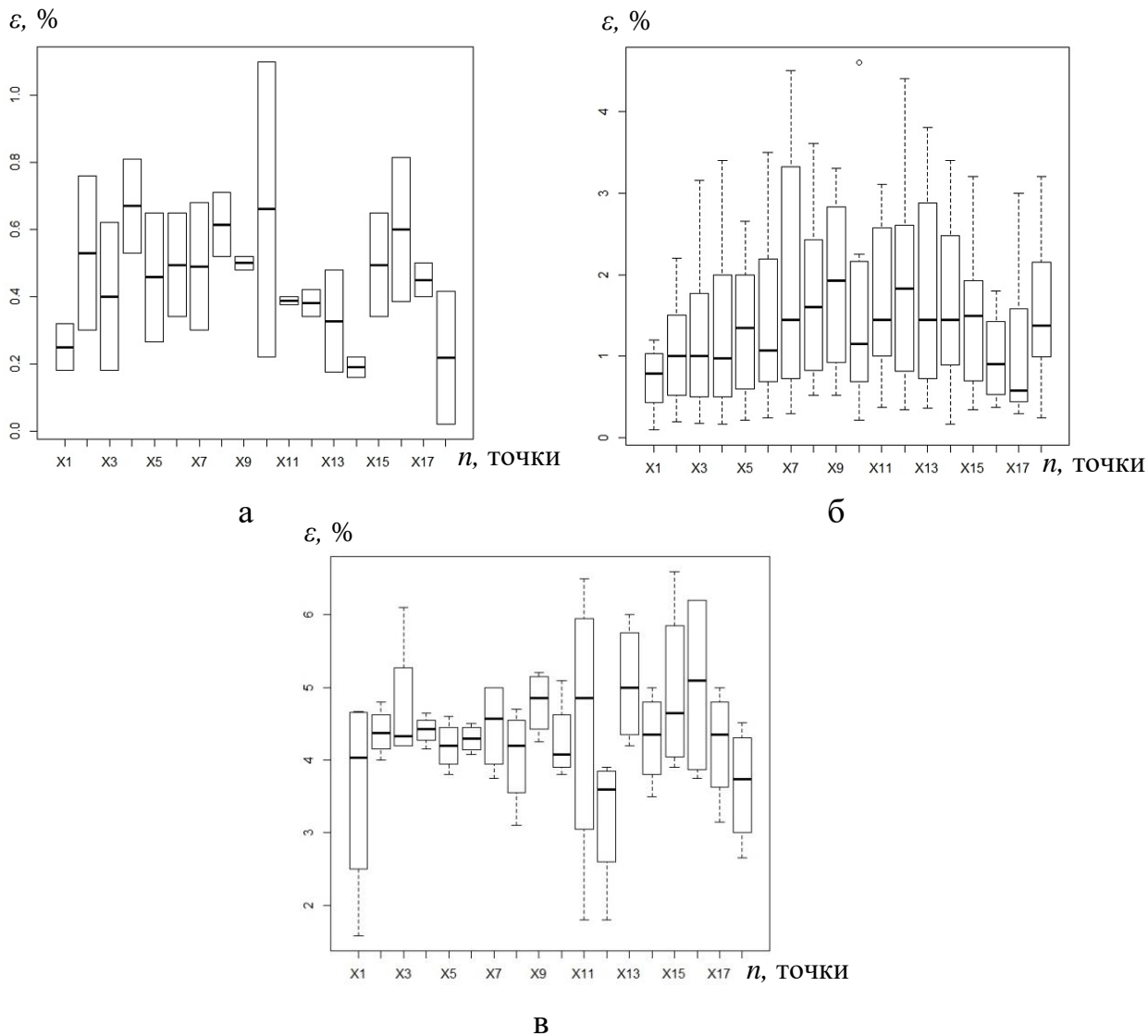
Ни один кластер не может содержать все наблюдения или оставаться пустым:

$$\emptyset \subset C_i \subset X, i = \overline{1, c} \quad (5.7)$$

Вследствие особенностей формирования волн пластического течения по стадиям, характеристики распределения деформаций по длине должны иметь отличительные особенности. Для построения распределения деформаций по участкам вала были сгруппированы в соответствии с этими стадиями. Результаты показаны на рисунке 5.19, в виде графиков распределения деформации по участкам заготовок, где они сгруппированы по стадиям кривой пластического течения, которых достигали деформации заготовок [52, 53].

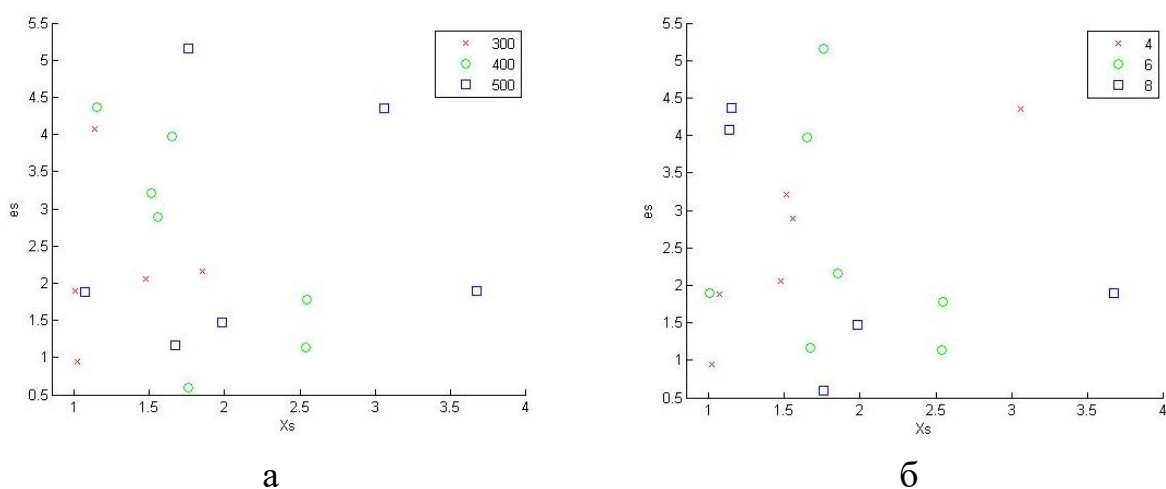
Как видно из рисунков 5.20 и 5.21 наименьший коэффициент локальности получался при различных сочетаниях значений технологических параметров.

Для более полного понимания получены регрессионные зависимости коэффициента локальности K_{Δ} от ε для обоих материалов: стали 35 и сплава 12X18H10T, где из диагностических графиков видно, что эта зависимость близка к линейной, рисунки 5.22 и 5.23.



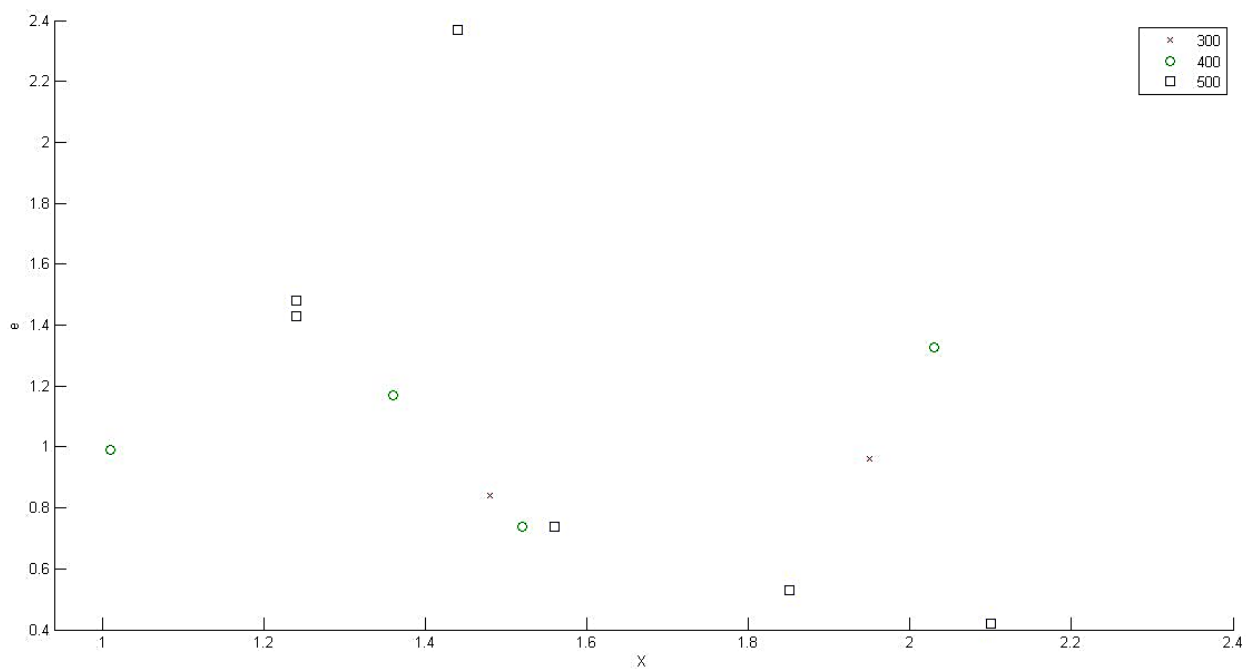
а – первая стадия; б – вторая; в – третья

Рисунок 5.19 – Группирование деформаций по участкам в соответствии со стадиями пластического течения

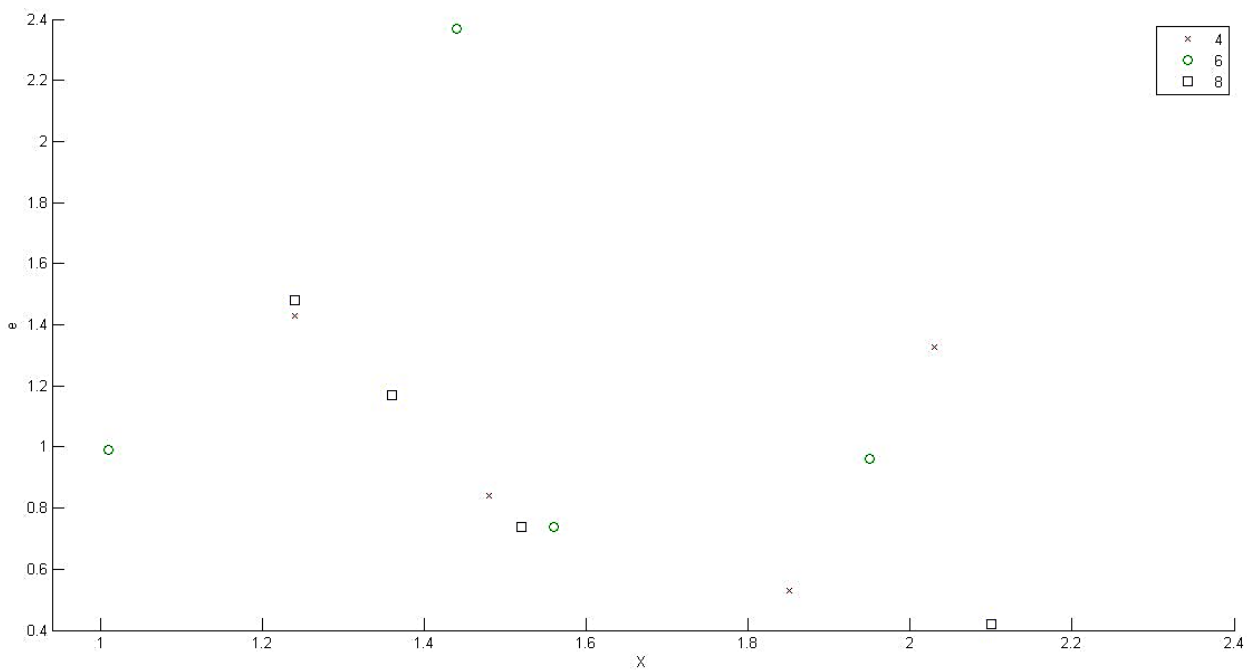


а – группирование по температуре; б – группирование по скорости нагружения

Рисунок 5.20 – Кластеризация локальностей для стали 35



а



б

а – группирование по температуре; б – группирование по скорости нагружения

Рисунок 5.21 – Кластеризация локальностей для 12X18N10T

Из диагностических факторов следует, что нормальность распределения выходной величины – коэффициента локальности нарушается при крайних значениях. По неравномерному распределению остатков видно, что при больших значениях параметра величина дисперсии возрастает.

lm(Коэффициент.локальности.КСП ~ Величина.деформации...)

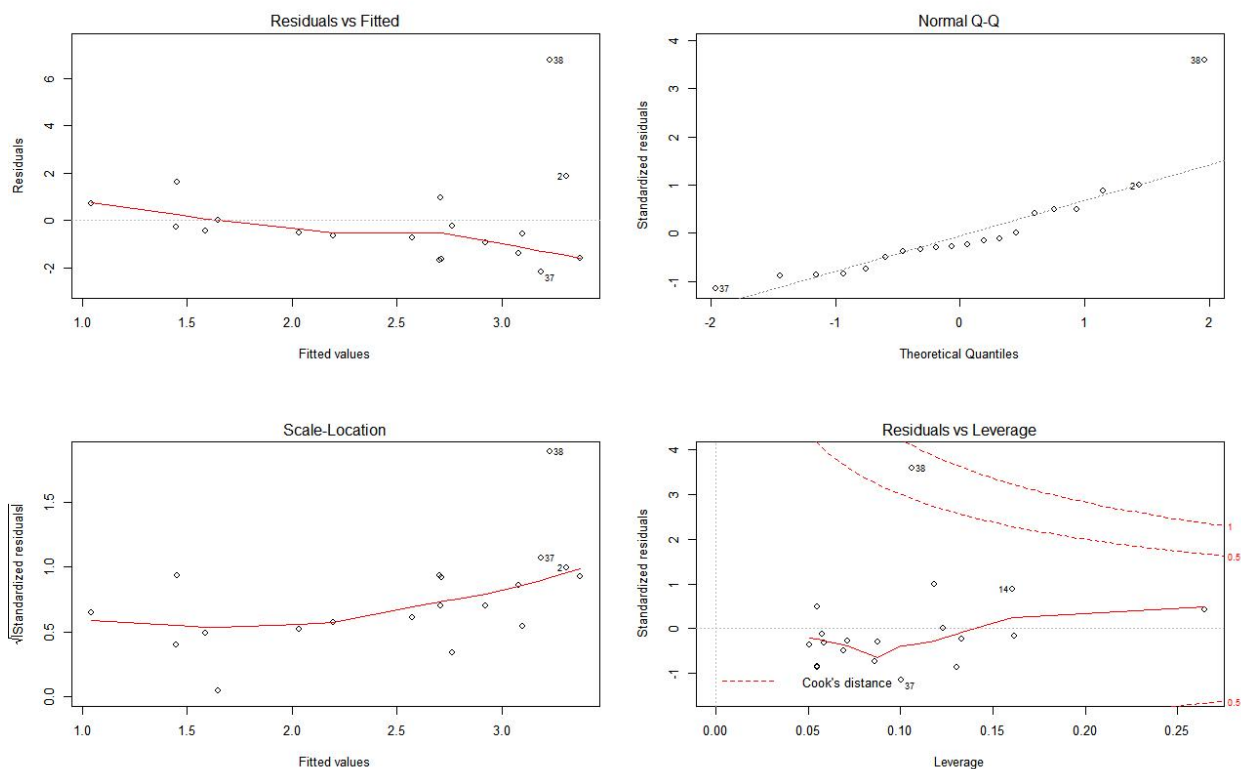


Рисунок 5.22 – Результаты моделирования для стали 35

lm(Коэффициент.локальности.КСП ~ e)

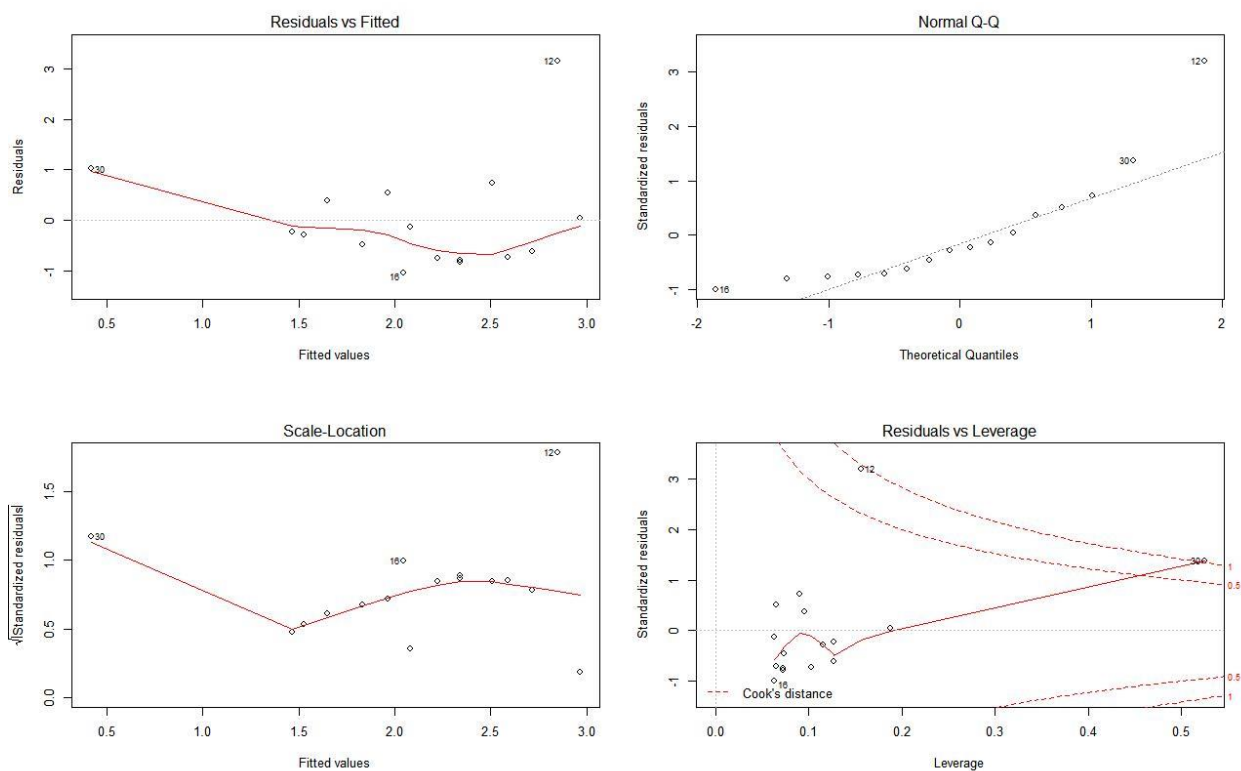


Рисунок 5.23 – Результаты моделирования для 12X18Н10Т

Для данных в таблице 5.10 проведена кластеризация по трем кластерам методом k -средних. Из результатов в таблице 5.11 и рисунка 5.24 видно группирование данных по возрастающим показателям нагрузки P и деформации e_{CPR} .

Таблица 5.10 – Исходные данные

L_{max}	$P, Н$	$V, мм/с$	$e_{CPR}, \%$	$Kurtosis$
55	18000	0,053	0,486389	-0,14567
5,13	17600	0,053	0,415294	-0,6803
2,12	18000	0,053	0,948235	0,175782
2,12	17750	0,053	0,793278	-0,67554
28,25	21500	0,053	0,417059	0,978806
2,98	21000	0,053	1,711765	-1,16916
16,71	27000	0,053	1,570556	-1,44063
11,53	21500	0,053	2,219444	-1,50453
74,57	23500	0,00457	2,444444	-0,27598
2,15	24000	0,00457	1,626111	-1,0101
2,45	29500	0,00457	4,2	4,157768
2,11	29000	0,00457	4,225	0,234033
3,39	30000	0,00457	4,421667	2,327104
4,25	31000	0,00457	4,513529	0,092669

Таблица 5.11 – Результаты кластеризации

L_{max}	$P, Н$	$V, мм/с$	e_{CPR}	$Kurtosis$	Кластер
25,34354	22354,56	0,033995	1,68036	-0,56482	1
16,04206	17877,12	0,052934	0,670768	-0,33728	2
4,702933	29497,99	0,010443	3,997065	1,35042	3

Кластеризация по признакам, непосредственно относящимся к стадиям кривой нагружения по данным из таблицы 5.12, видны центры группирования, соответствующие стадии кривой пластического течения, таблица 5.13 и 5.14.

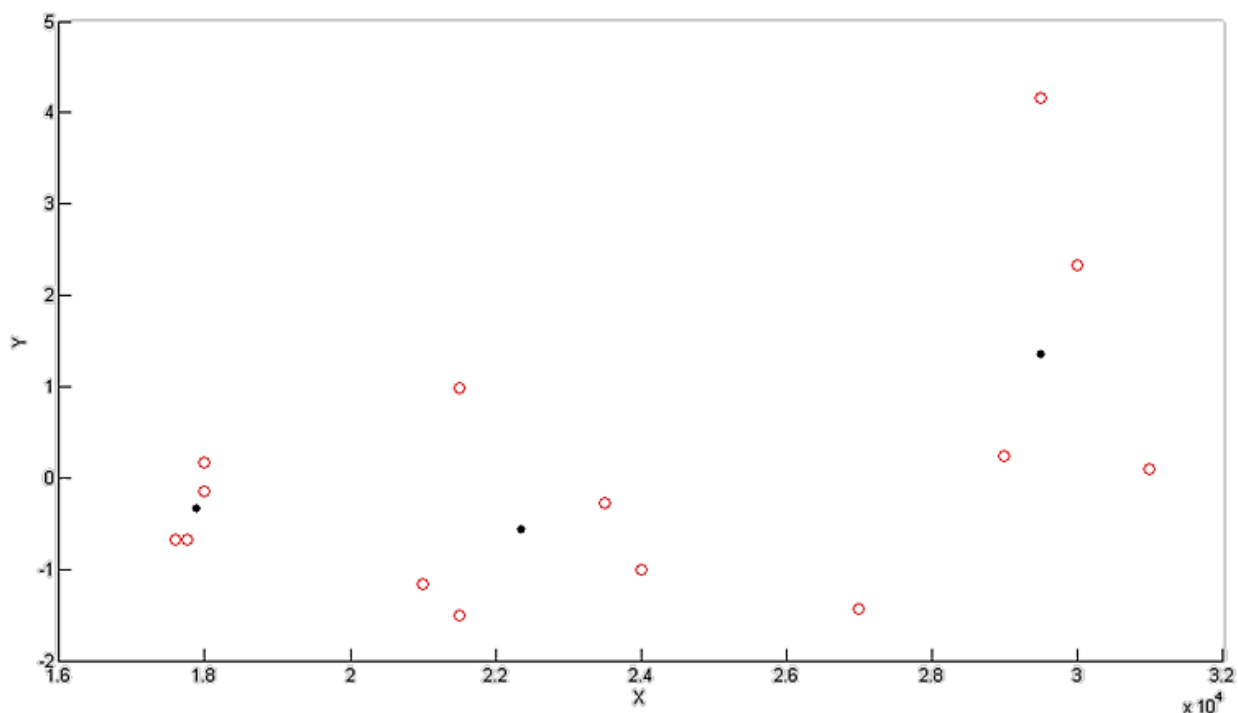


Рисунок 5.24 – Кластеризация в координатах 2 и 5 параметров из таблицы 15

Таблица 5.12 – Данные по нагружению и деформации

$P, Н$	$e_{ср}, \%$	$e_{max}, \%$	Кластер
18000	0,486389	1,1	1
17600	0,415294	0,815	1
18000	0,948235	1,4	1
17750	0,793278	1,2	1
21500	0,417059	0,82	2
21000	1,711765	2,95	2
27000	1,570556	3,8	3
21500	2,219444	3,7	2
23500	2,444444	4,6	2
24000	1,626111	2,15	2
29500	4,2	6,5	3
29000	4,225	5	3
30000	4,421667	6,2	3
31000	4,513529	6,6	3

Для нечеткой кластеризации результаты приблизительно те же, что и для предыдущего метода кластеризации.

Таблица 5.13 – Центры K -means

P, H	e_{cp}	e_{max}
29300	4	6
22300	4	3
17837	4	1

Таблица 5.14 – Нечеткая кластеризация (центры кластеров)

P, H	e_{cp}	e_{max}
29497,9979850262	3,99707068367545	5,78701515941492
17877,1054813851	0,670757094437416	1,14611207657963
22354,6482729880	1,68041107511022	2,86589822388372

Если группировать данные по образцам только по величине деформации в каждом конкретном опыте для стадий пластического течения получим следующую таблицу 5.15.

Таблица 5.15 – Группирование образцов по стадиям пластического течения

Образец	Step1	Step2	Step3
1 образец	1	1	1
2 образец	1	1	1
3 образец	2	1	1
4 образец	2	1	1
5 образец	2	1	1
6 образец	2	1	2
7 образец	2	1	2
8 образец	2	2	2
9 образец	2	2	2
10 образец	2	2	2
11 образец	3	3	3
12 образец	3	3	3
13 образец	3	3	3
14 образец	3	3	3

Первоначальное распределение по группам по экспериментальной кривой текучести:

Step1 – с учетом температурной и упругой деформации;

Step2 – с учетом температурной деформации;

Step3 – без учета температурной и упругой деформации.

Иерархический метод кластеризации не требует предварительного задания числа кластеров, а результат представляется в виде дендрограммы. Она показывает степень близости отдельных объектов и кластеров в виде древовидной схемы или графа [54, 57].

Иерархическим анализом получены следующие дендрограммы, показанные на рисунках 5.25-5.28 и полые при использовании различных мер близости параметров и с различными наборами данных.

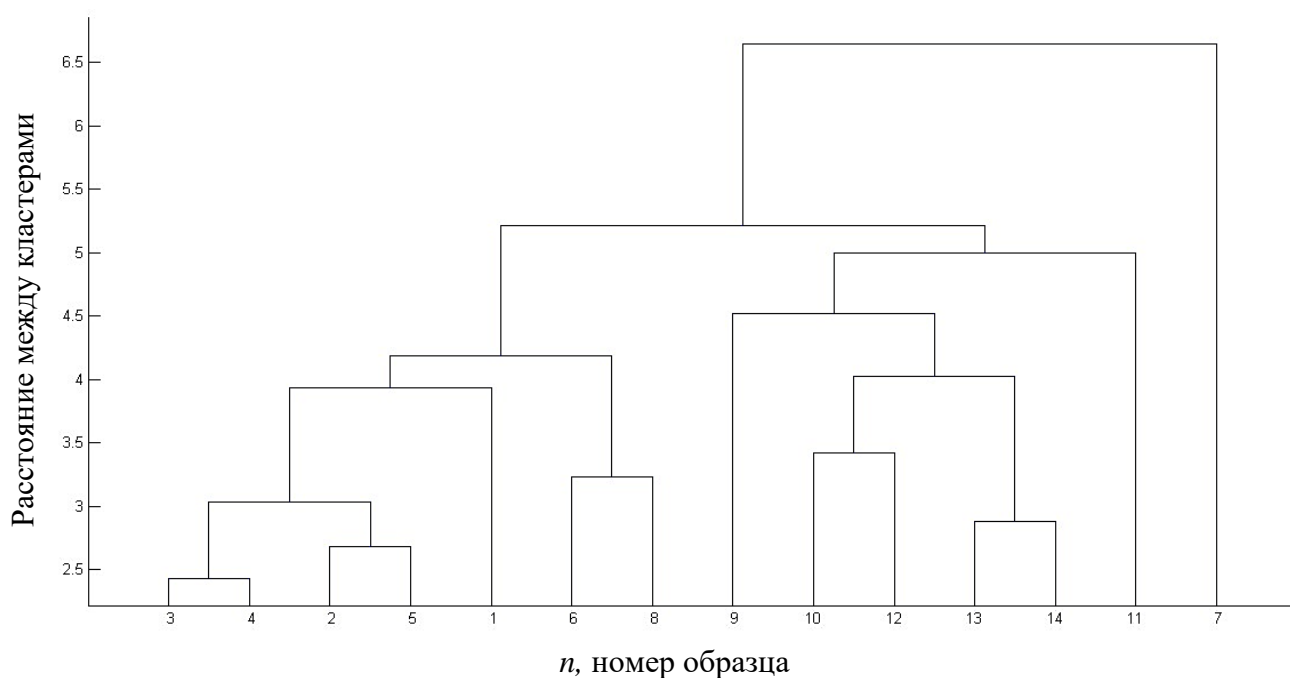


Рисунок 5.25 – Дендрограмма для полного набора данных: средняя связь

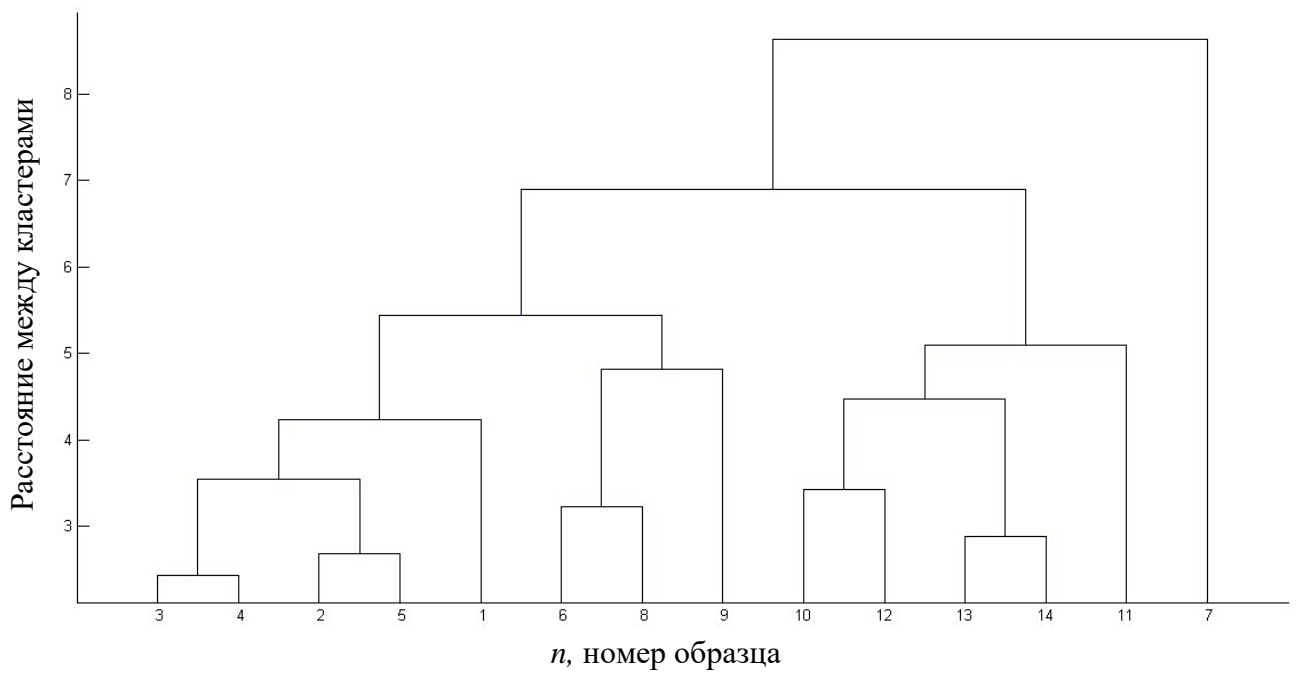
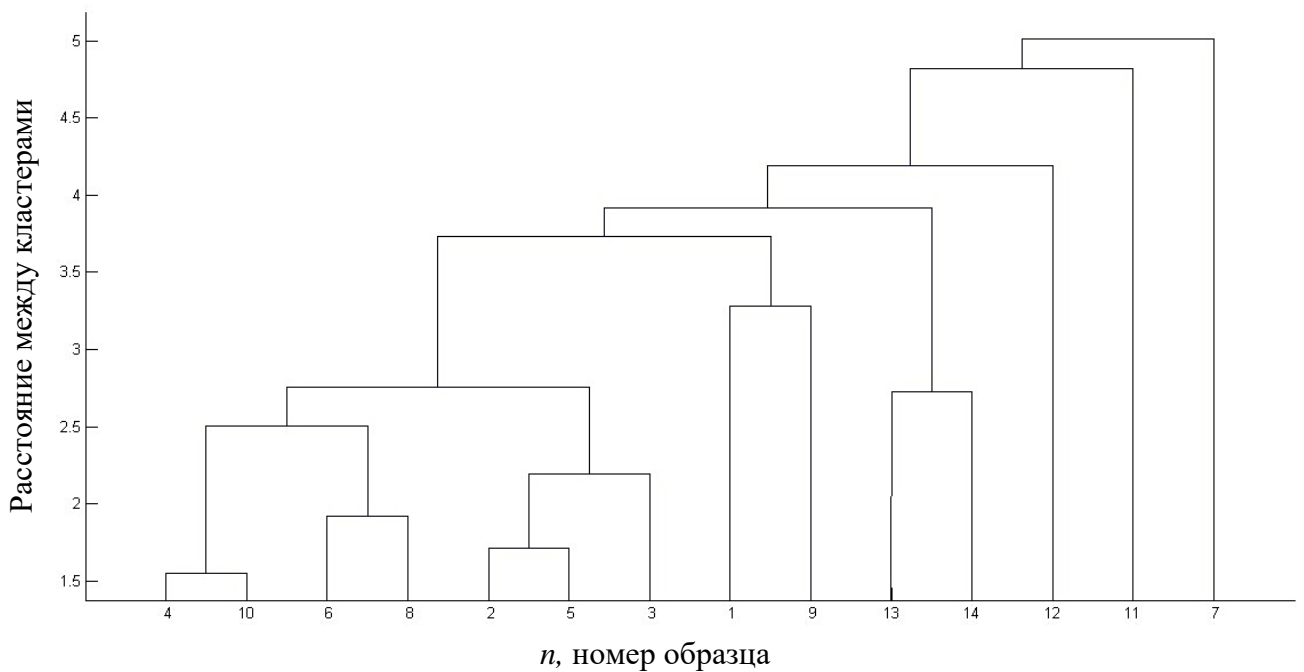
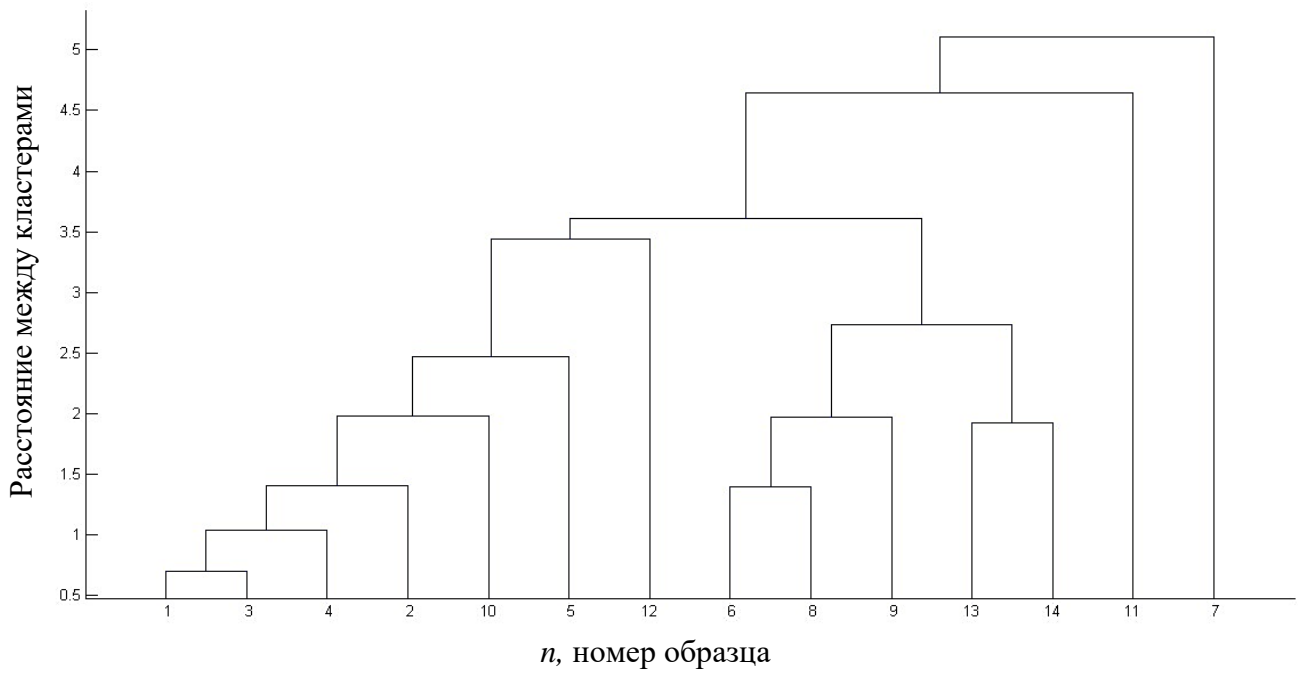


Рисунок 5.26 – Дендрограмма для полного набора данных: полная связь

Оставляем параметры только распределения: Δe_R , e_{minR} , $Summa$, IQR , $skewness$, $kurtosis$, $p-value$.



а



б

Рисунок 5.27 – Дендрограмма для сокращенного набора данных

Если оставить только коэффициенты: L_{MAXR} , L_{CPR} , $D/_{esp-min}$, $D_{esp-min}$.

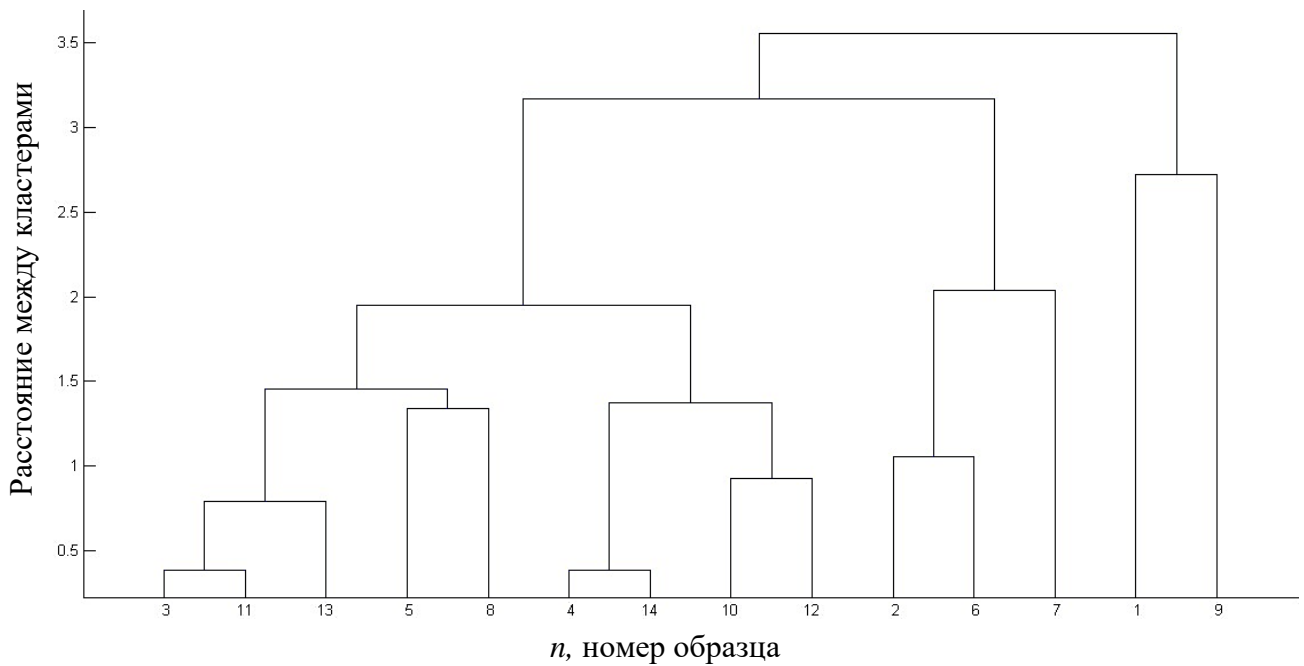


Рисунок 5.28 – Дендрограмма для сокращенного набора данных

Выводы по главе 5

Предложен метод моделирования зависимостей и процессов, основанный на построении аппроксимирующих моделей в виде гибридных нейронных сетей, обучаемых на выборках реальных процессов. Произведена обработка результатов экспериментальных исследований с получением сформированных правил, на основании которых возможно извлечение новой информации для дальнейшей работы, разработки алгоритмов управления процессом.

Моделирование результатов исследования по локализации деформации по коэффициенту локальности как отношение средней деформации к максимальной от температурно-скоростных факторов показали наиболее оптимальное сочетание параметров для обработки (300°C, минимальная скорость нагружения $1,7 \cdot 10^{-4}$ – $2,5 \cdot 10^{-4}$ с⁻¹ и диапазон деформаций 1,0 – 2,0% для 12X18Н10Т, и 400°C, скорость нагружения $2,5 \cdot 10^{-4}$ – $3,3 \cdot 10^{-4}$ с⁻¹ и диапазон деформаций 1,2 – 1,4 % для стали 35). Получена модель прогнозирования силового нагружения на основе LSTM с точностью 92% и классификации с точностью 83%.

Также на основе нейро-нечеткой сети ANFYS смоделировано определение коэффициентов локальности от входных технологических параметров

ГЛАВА 6. ВЛИЯНИЕ ПРАВКИ РАСТЯЖЕНИЕМ С НАГРЕВОМ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБРАБОТКИ МАЛОЖЕСТКИХ ВАЛОВ

6.1 Обеспечение прямолинейности правкой растяжением с нагревом

Такая характеристика исходной заготовки маложесткого вала как прямолинейность оси вала является ключевой с точки зрения обеспечения точности размеров, расположения и их стабильности в после операционный период. Естественно на точность влияет и схема установка и режимы резания. Но, при прочих равных условиях, прямолинейность оси вала является критически важным параметром по операционной точности.

Правка растяжением с нагревом является наиболее эффективным способом обеспечения этого параметра. При этом обеспечивается выравнивание пластических деформаций.

Ниже описывается эксперимент по определению послеоперационного коробления оси маложесткого вала с учетом исходной кривизны заготовки перед переходом.

Смещения вала фиксировались в пяти сечениях при помощи бесконтактного датчика Bently Nevada, рисунок 6.1. Последовательность переходов состояла из протачивания с различной глубиной резания.

В таблице 6.1 представлены результаты контроля смещений оси вала в пяти точках, расположенных на расстоянии 40 мм вдоль заготовки.

Фиксировались исходные смещения заготовки и после переходов. При этом смещения после перехода считались входными погрешностями для последующего. Некоторые последовательности переходов по обтачиванию перемежались вылеживанием вала в течение времени от 24 до 372 часов, по истечении которых регистрировались положения сечений вала. Из-за процессов релаксации напряжений происходило самопроизвольное коробление заготовок.



Рисунок 6.1 – Схема контроля оси вала датчиком Bently Nevada

В таблице 6.1: тип обработки обозначен: 1 – обтачивание; 2 – вылеживание вала. Время: 0 – для обтачивания; в часах – для вылеживания вала. r_0 – исходное смещение оси вала, мм; t – глубина резания, мм; R_0 – смещение оси вала после обработки, мм.

Таблица 6.1 – Данные по короблению оси мало жесткого вала

№ точки	Номер прохода	Тип обработки	Время, час	r_0 , мм	t , мм	R_0 , мм
1	1	1	0	-5	0,55	-3,5
2	1	1	0	-8	0,55	-3
3	1	1	0	-6	0,55	2,5
4	1	1	0	-65	0,55	-4,2
5	1	1	0	-32	0,55	-23
1	2	1	0	-3,5	0,7	-10
2	2	1	0	-3	0,7	-23
3	2	1	0	2,5	0,7	-2
4	2	1	0	-4,2	0,7	6
5	2	1	0	-23	0,7	0,5
1	3	2	48	-10	0	-10
2	3	2	48	-23	0	-23
3	3	2	48	-2	0	-1
4	3	2	48	6	0	9
5	3	2	48	0,5	0	1

Продолжение таблицы 6.1 в приложении А.

Для данных из таблицы 6.1 получить регрессионную зависимость не удалось. Распределения смещений показаны на рисунках. На рисунке 6.2 показана зависимость смещений от вида обработки. Как видно и точение, и послеоперационное вылеживание приводят примерно к одинаковым результатам.

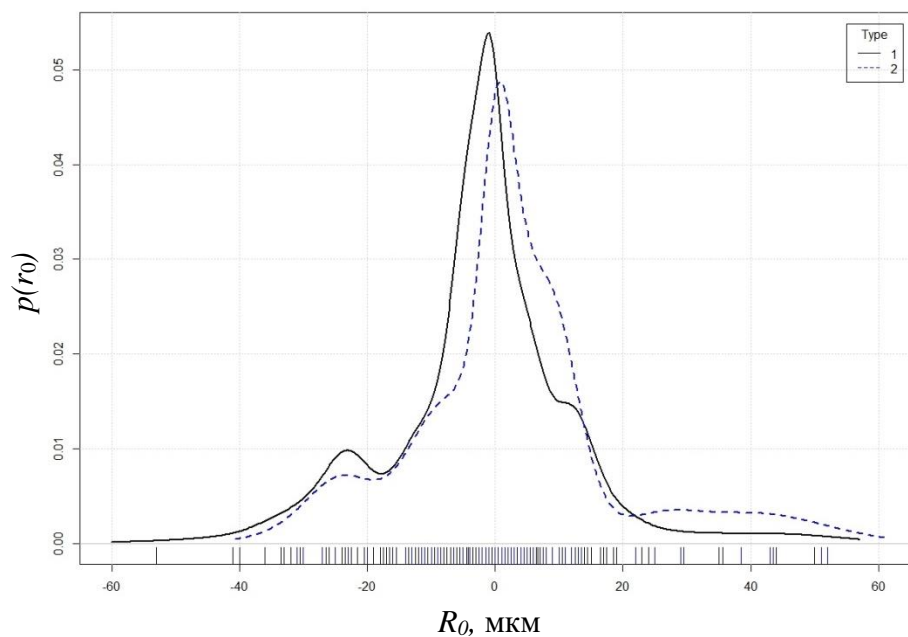


Рисунок 6.2 – Плотность распределения смещений после точения (1) и после вылеживания (2)

На рисунке 6.3 показано распределение смещений в виде бокс-плота («Ящик с усами») на котором показаны размах, выбросы (пронумерованы), границы между первым и четвертым квартилями в виде прямоугольника и медиана. Для крайних точек размах и медиана оказываются меньше, чем для промежуточных точек, что очевидно. Отклонения во второй и четвертой точках максимальны и противоположны относительно нулевого уровня. Следует отметить, что контроль смещений осуществлялся для двух взаимно перпендикулярных плоскостей. Одна плоскость была плоскостью максимального прогиба для образца. Повторные замеры осуществлялись для точек, лежащих в указанных плоскостях.

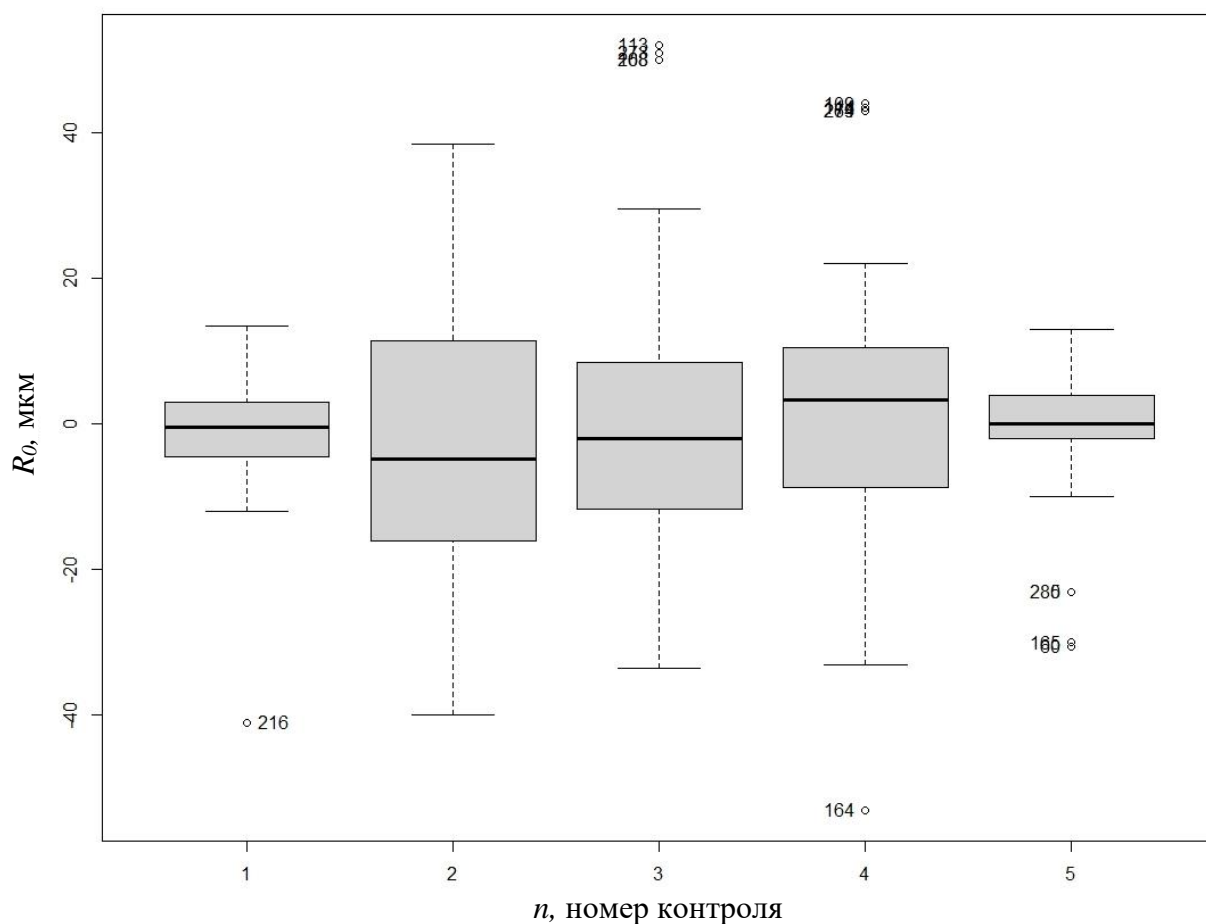


Рисунок 6.3 – Распределение смещений по точкам вала

На рисунке 6.4 показаны графики остатков для модели вида:

$$R_0 = a + br_0 + ct, \quad (6.1)$$

где R_0 – смещение после обработки, мм;

r_0 – смещение до обработки, мм;

t – глубина резания, мм;

a, b, c – коэффициенты модели.

Результаты показали статистическую незначимость данной модели, но на графиках влияния и остатков (погрешность между предсказанным моделью результатом и экспериментальным значением) по компонентам видно, что тренд по влиянию исходного смещения восходящий для конечного смещения. Чем больше исходное смещение, тем больше конечное.

По глубине резания тренд не значительный, но виден увеличивающийся разброс смещений с ростом глубины резания. Для нулевого значения (вылеживания) размах получается поменьше, чем для точения.

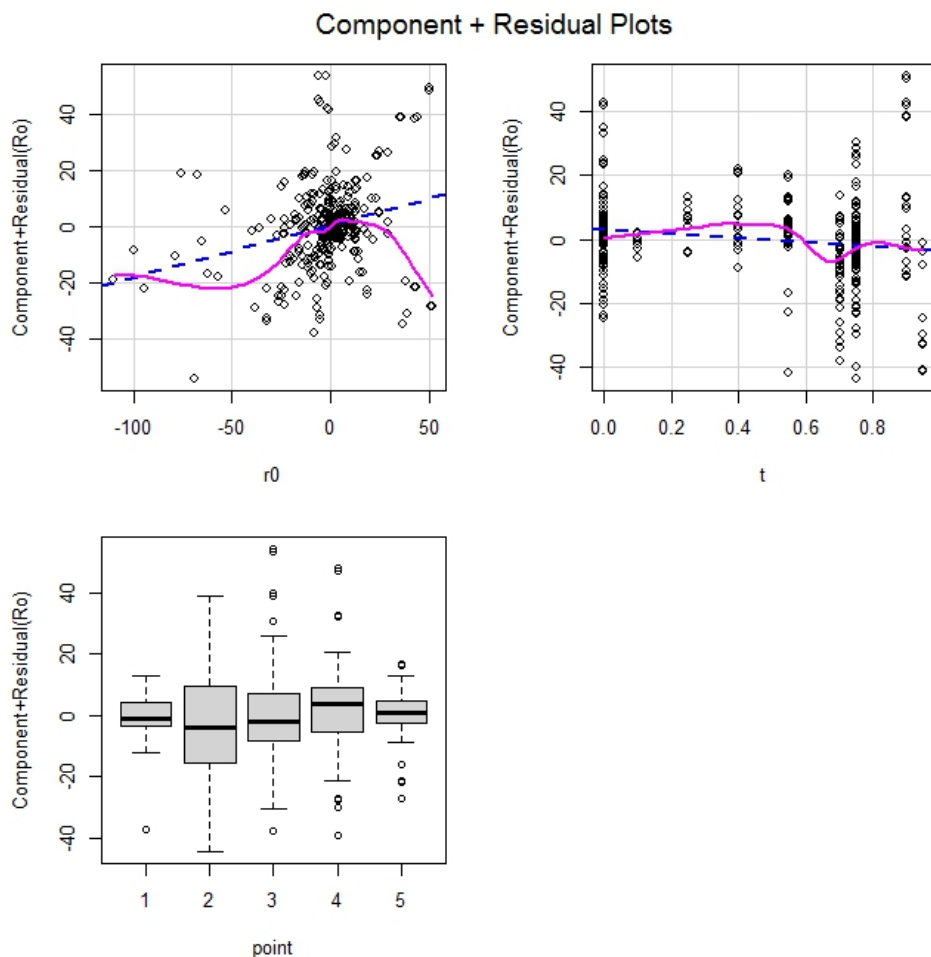


Рисунок 6.4 – График влияния и остатков модели (1)

Для использования полученных данных была обучена нейросетевая двухслойная модель прямого распространения сигнала. В промежуточном слое (16 нейронов) использовалась сигмоидная функция активации, в выходном – линейный нейрон.

Графики результатов обучения по обучающей выборке (75% данных), валидационной выборке для предотвращения переобучения (15%) и тестовой выборке данных для проверки модели (10%) показаны на рисунке 6.5. Как видно для тестовой выборки погрешность составила 20%. С учетом того, что

на смещения оси вала оказывает множество не учтенных в данном исследовании факторов, результат является положительным.

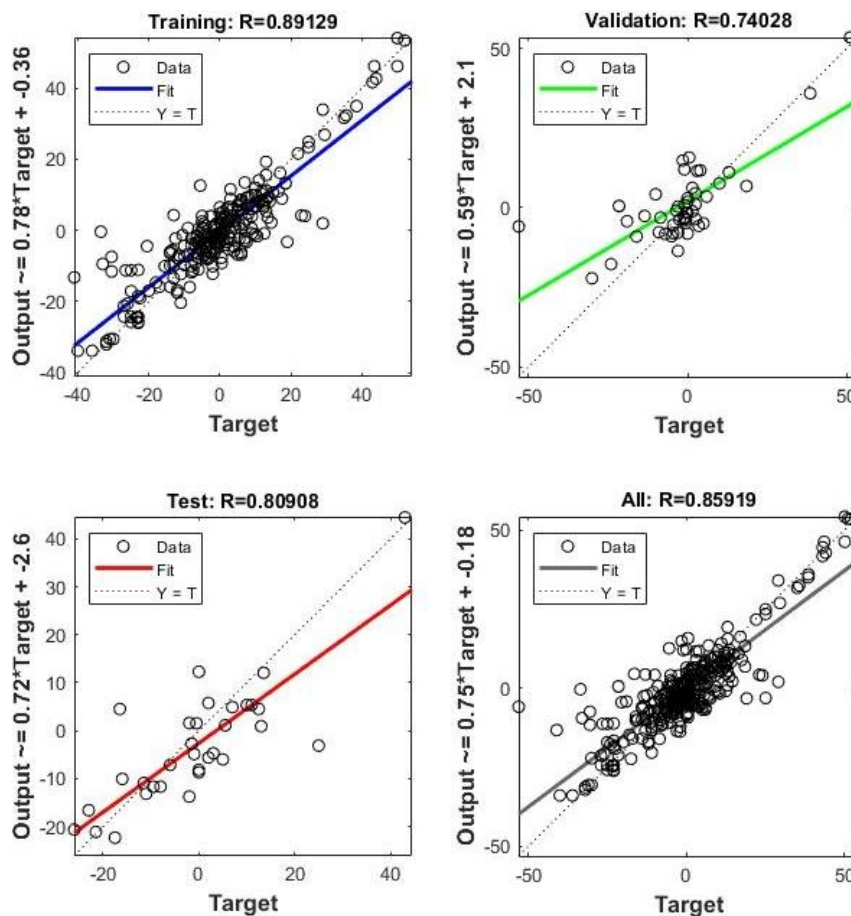


Рисунок 6.5 – Результаты обучения сети по прогнозированию смещений оси вала

Исходя из проведенного исследования по короблению оси вала, с учетом начального отклонения от прямолинейности, была проведена серия экспериментов, в которых определяли влияние параметров правки растяжением с нагревом на конечные коробления вала. В данном случае эта операция правка растяжением с нагревом обеспечивает аналог правки оси заготовки. Образцы из 12Х18Н10Т длиной 350 мм и диаметром 10 мм имели начальную величину искривления. Затем после правки растяжением с нагревом проводили измерение остаточного смещения в поперечном направлении оси вала. Измерения проводили при установке вала в центрах и измерении смещения f_0 (до обработки) и F_{iso} (после) по центру вала

индикатором с погрешностью 0,001 мм. Данные получены для холодной заготовки, нагретой до 100°C и 300°C, при трех скоростях растяжения. Но так как основные исследования по обеспечению эффективности правки растяжением с нагревом проводились при 300°C и при минимальной скорости деформации, при которых наблюдается максимальная равномерность деформирования, основные исследования приводились именно на этих режимах. Варьируемым параметром является деформация.

Коэффициент уточнения по правке растяжением с нагревом равен

$$K = \frac{f_0}{F_{iso}}, \quad (6.2)$$

Таблица 6.2 – Результаты правки оси валов при помощи правки растяжением с нагревом

f_0 , мм	V , с ⁻¹	T , °C	e , %	K	F_{iso} , мм
0,5	0,001	300	0,02	1,4	0,357143
0,8	0,001	300	0,02	2	0,4
1,1	0,001	300	0,02	2,5	0,44
1,4	0,001	300	0,02	2,9	0,482759
1,7	0,001	300	0,02	3,5	0,485714
2	0,001	300	0,02	4	0,5
2,3	0,001	300	0,02	3,2	0,71875
2,7	0,001	300	0,02	3	0,9
3	0,001	300	0,02	3	1
3,3	0,001	300	0,02	3	1,1
2	0,001	300	0,4	2	1
2	0,001	300	0,6	2,4	0,833333
2	0,001	300	0,8	2,5	0,8
2	0,001	300	1,6	3,5	0,571429
2	0,001	300	2	4	0,5
2	0,001	300	2,4	4,2	0,47619
2	0,001	300	4	4,5	0,444444
2	0,001	300	6	5	0,4
2	50	300	2	3,4	0,588235
2	0,1	300	2	3,7	0,540541
2	0,001	300	2	4	0,5
2	50	20	2	2,9	0,689655
2	0,1	20	2	3,3	0,606061
2	0,001	20	2	3,7	0,540541
2	50	100	2	3,1	0,645161
2	0,1	100	2	3,4	0,588235
2	0,001	100	2	3,8	0,526316

Получена регрессионная зависимость вида

$$F_{iso} = a + bf_0 + ce, \quad (6.3)$$

Модель с полученными коэффициентами

$$F_{iso} = 0,155533 + 0,27723f_0 - 0,06103e, \quad (6.4)$$

Модель имеет уровень значимости p -value: 0,00000009811

Для коэффициента уточнения аналогичная зависимость выглядит как

$$K = 1,841 + 0,453f_0 + 0,395e, \quad (6.5)$$

Кроме этого, также была получена модель на основе нейронной сети, аналогичной как для смещения точек оси вала, только количество нейронов скрытого слоя 10, так как меньше данных для обучения и меньше вектор входных параметров.

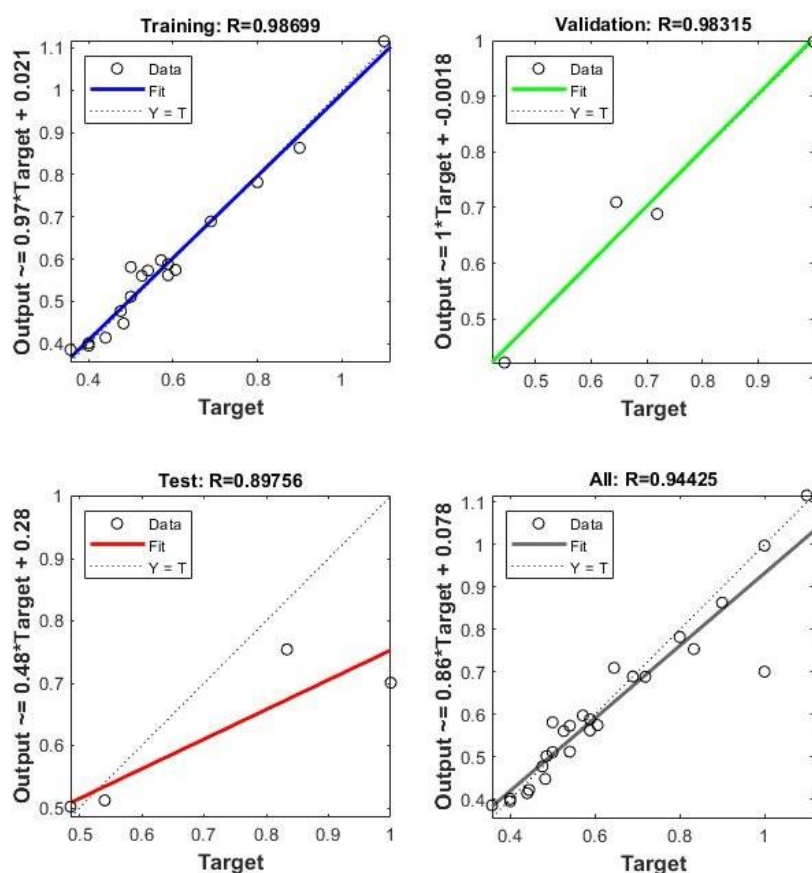


Рисунок 6.6 – Результаты обучения нейронной сети для искривления оси вала после правки растяжением с нагревом

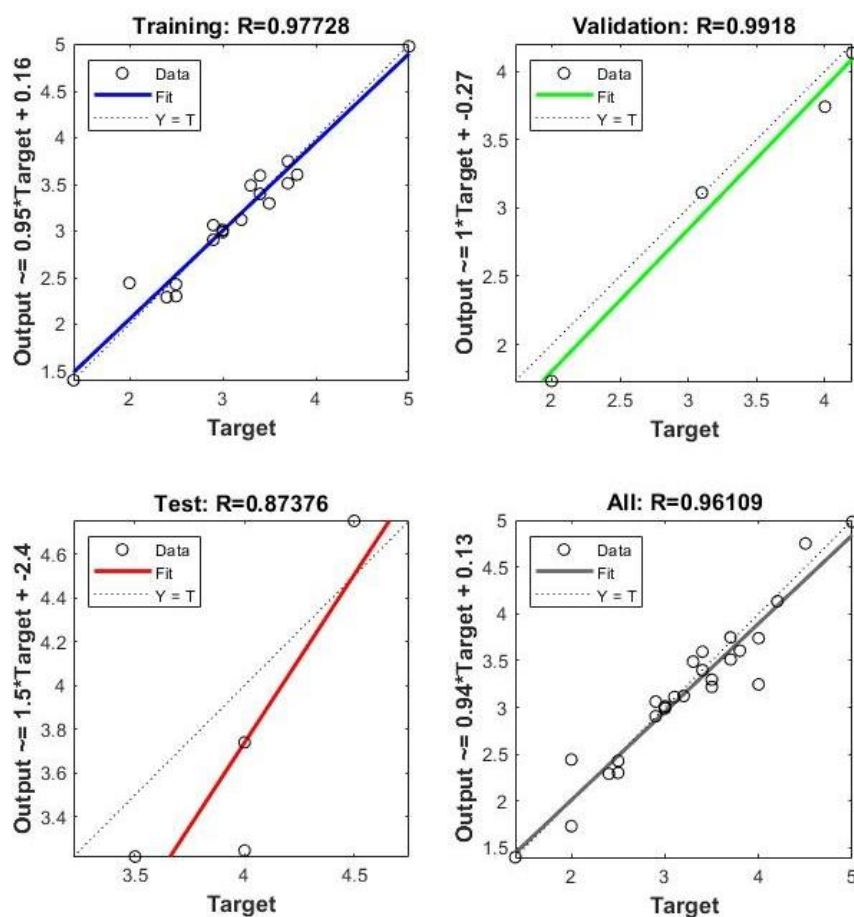


Рисунок 6.7 – Результаты обучения нейронной сети для коэффициента уточнения искривления оси вала после правки растяжением с нагревом

6.2 Влияние правки растяжением с нагревом на конструкторско-технологические параметры заготовки

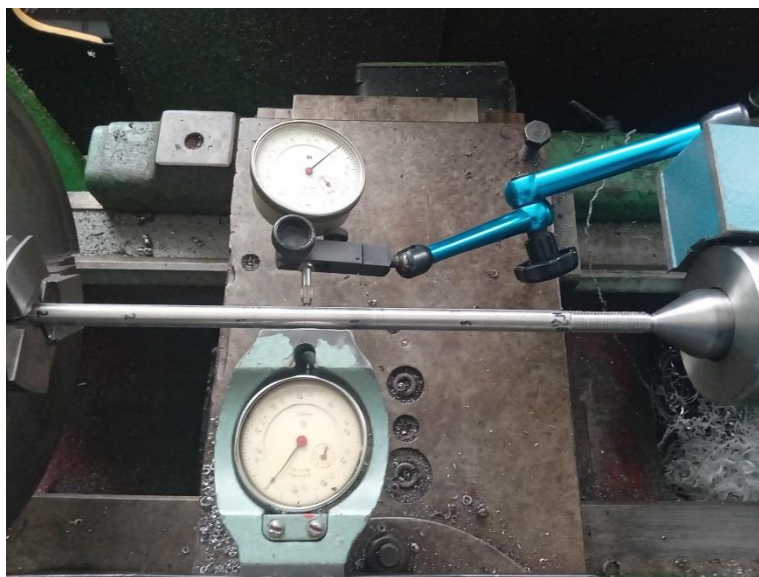
Главная проблема при обработке маложестких валов (МЖВ) – большие деформации. Упругие деформации возникают вследствие действия сил резания, центробежных сил и сил тяжести, которые вносят основную долю в общую погрешность обработки. Эти деформации имеют и статический и динамический характер, что определяет их влияние на всю группу геометрических показателей – от точности размеров до шероховатости. К ним можно отнести также деформацию от релаксации технологических остаточных напряжений, которая протекает в межоперационный и в эксплуатационный периоды. От перераспределения остаточных напряжений возникает коробление заготовки при снятии припуска. Возникающие в

процессе обработки МЖВ значительные динамические деформации имеют различную природу происхождения – вынужденные, автоколебания, параметрические. Все это приводит к потере точности, повышению шероховатости и волнистости обработанной поверхности, снижению стойкости инструмента, неравномерности снимаемого припуска, что определяет неравномерную картину распределения остаточных напряжений. Эти факторы определяют недостатки традиционного технологического процесса изготовления МЖВ – многопереходную обработку на заниженных режимах, большое количество операций, стабилизирующих или снижающих уровень остаточных технологических напряжений (термо- и виброобработка, старение). Из-за этого широко применяются средства и методы повышения жесткости технологической системы, в первую очередь – подсистемы заготовка – опоры. Также известно большое количество вариантов систем управления процессом резания. Все это или увеличивает трудоемкость процесса по времени или напрямую ведет к дополнительным затратам на средства повышения жесткости, системы управления и т.д. Основным критерием эффективности технологического процесса изготовления МЖВ является степень обеспечения стабильности формы и размеров детали в эксплуатационный период, который зависит от конструктивных особенностей детали, определяется уровнем и однородностью остаточных технологических напряжений.

Однородность остаточных технологических напряжений напрямую зависит от однородности пластических деформаций и равномерности температурного поля, что рассматривалось в предыдущих разделах.

Кроме этого, процесс деформирования за счет упрочнения приводит к повышению непосредственно жесткости самой заготовки. Так как коэффициент жесткости определяется помимо модуля упругости, в котором и отражается изменение напряженного состояния материала заготовки, соотношением конструктивных параметров l^3/d^4 . Показатель степени для диаметра определяется моментом инерции сечения вала.

До и после правки растяжением с нагревом каждый образец устанавливался в патроне и поджимался задним центром. Усилия зажима патрона и поджима центром обеспечивались максимально стабильными. Положение образца было одинаковым в круговом направлении за счет совмещения разметочных рисок поперечных плоскостей и риски на одном из кулачков патрона. Последний ориентировался всегда в горизонтальной области одинаково.



а



б

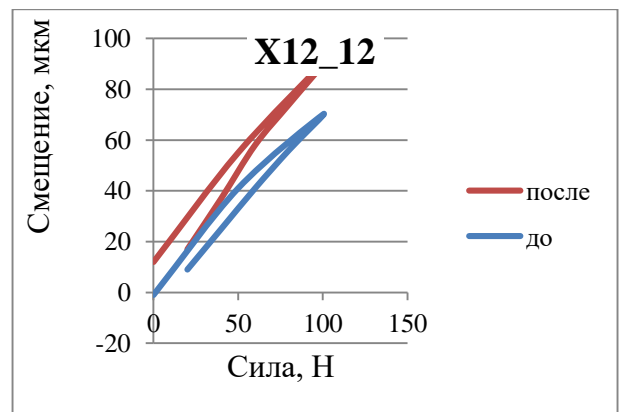
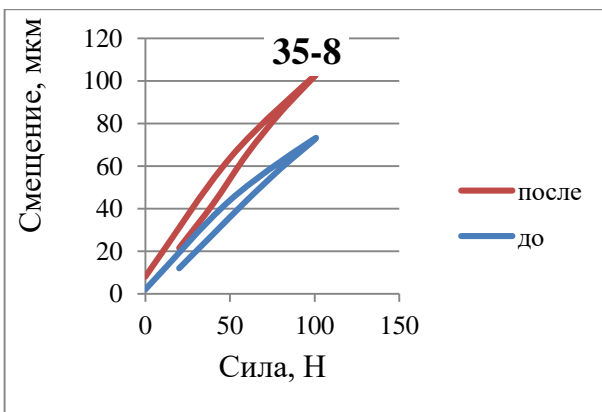
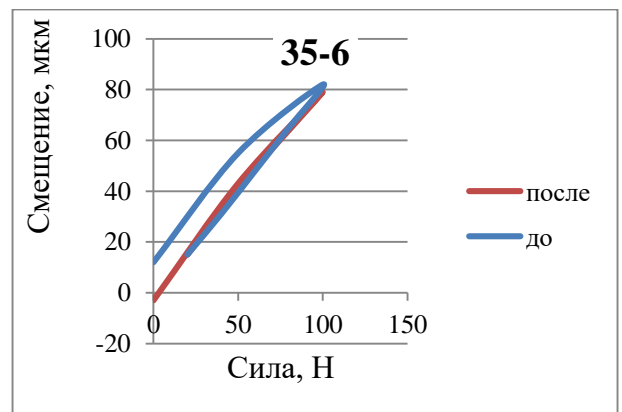
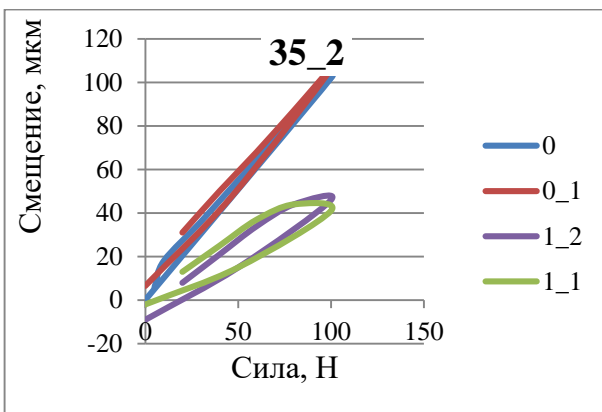
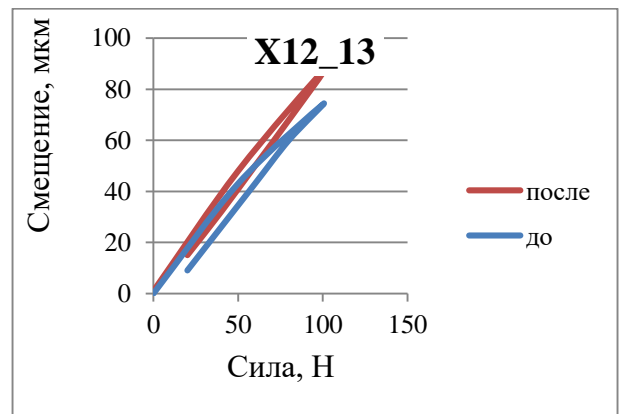
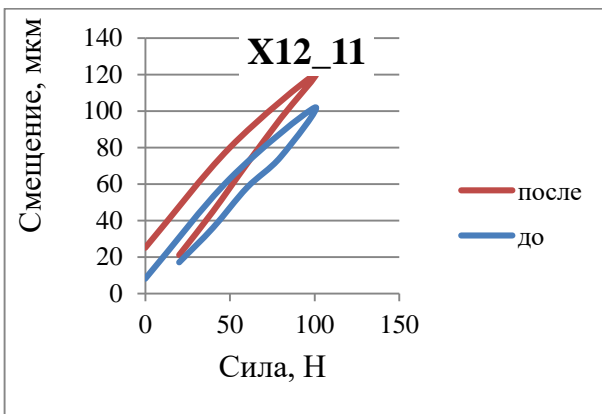
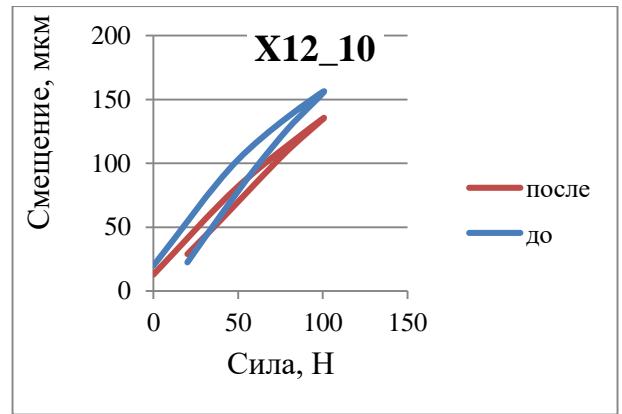
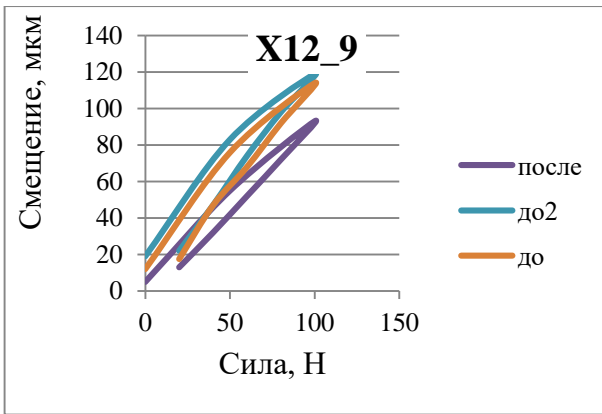


в

а – статическая жесткость; б – ориентирование кулачка; в – смещение оси вала

Рисунок 6.8 – Схемы измерения

Результаты измерения жесткости показаны на рисунке 6.9.



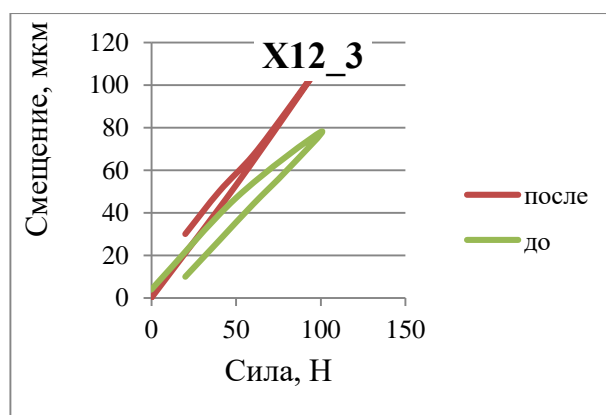


Рисунок 6.9 – Графики нагружения образцов

Результаты измерений по жесткости сведены в таблицу 6.3. Зеленым отмечено изменение относительной жесткости образцов в сторону повышения. Относительный коэффициент жесткости определялся по отношению силы нагружения, выраженной в показателях индикатора пружинного динамометра к величине смещения на индикаторе.

Таблица 6.3 – Изменение жесткости образцов до и после правки растяжением с нагревом

Образец	Абсолютное удлинение, мм	Относительная деформация ϵ , %	Относительный коэффициент жесткости до правки растяжением с нагревом	Относительный коэффициент жесткости до правки растяжением с нагревом	Изменение коэффициента жесткости
X12_5	0,4	0,17	0,87	1,58	1,81
X12_6	0,5	0,2			
X12_3	9,35	3,6	1,2	0,86	0,72
X12_2	4,8	2	1	1,5	1,5
35_2	3,35	1,4	1	2	2
X12_10	2	0,8	0,55	0,67	1,22
X12_9	0,85	0,4	0,75	1	1,33
X12_11	1,6	0,7	0,92	0,75	0,81
X12_12	4,55	2,17	1,33	1	0,75
X12_13	0,7	0,3	1,3	1,09	0,84
35_6	1,05	0,5	1	1,28	1,28
35_8			1,2	0,86	0,72
35_7	2,95	1,4			

Повышение жесткости обеспечивается за счет упрочнения. То есть деформация должна пройти достаточно большая. Но если превышает критический уровень этой деформации, изменение соотношения l^3/d^4 приводит к снижению жесткости.

Данное исследование имеет значительное возмущение на итоговый результат в виде влияния схемы установки заготовки вала.

Но выявленная тенденция в повышении жесткости при правильно выбранных параметрах правки растяжением с нагревом отразится на точности обработки за счет снижения погрешности от упругих деформаций заготовки. Хотя рациональная схема установки предполагает использование дополнительных опор – люнетов, увеличение собственной жесткости заготовки несомненно отразится на увеличении точности.

Характерным признаком повышения упругих свойств материала вследствие его упрочнения является изменение собственных частот образца.

Для определения собственных частот образцы закреплялись на упругом подвесе на пьезоснимателе. Этот датчик через усилитель подавал сигнал о вибрационном нагружении подвеса на АЦП L-Card. Образец подвешивался по крайним ближайшим резьбовым проточкам. Во время трех ударов с задержкой около 1 с между ними проводилась регистрация колебаний образца. Далее сигнал подвергался частотному разложению в спектр. Определялись первые 8 гармоник колебаний.

Изображение исходного сигнала и спектра показаны на рисунке 6.10.

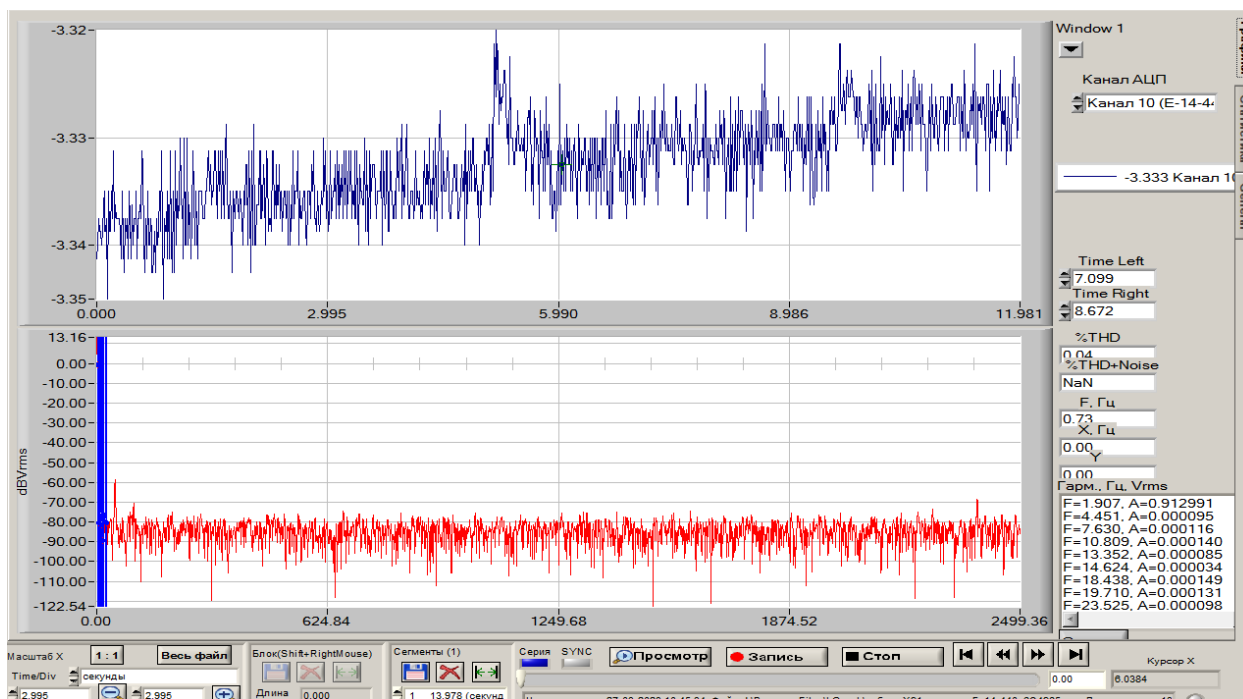
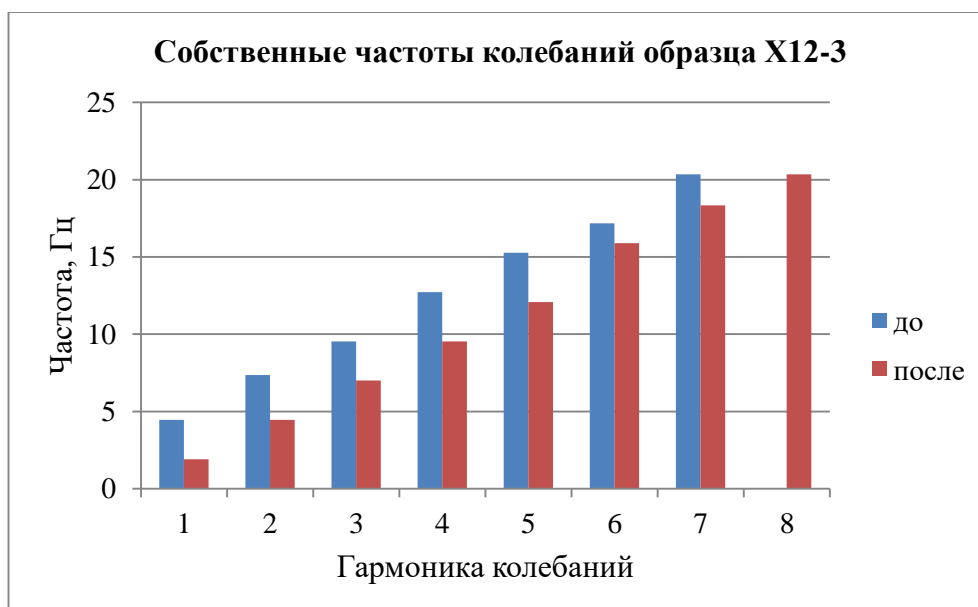


Рисунок 6.10 – Сигнал и его спектр при определении собственной частоты колебаний образцов

Результаты полученных изменений спектра собственных колебаний показаны на рисунке 6.11. Для образца из 12Х18Н10Т №3 который имел максимальное удлинение (9 мм), спектр свидетельствует об общем уменьшении всех гармоник колебаний.



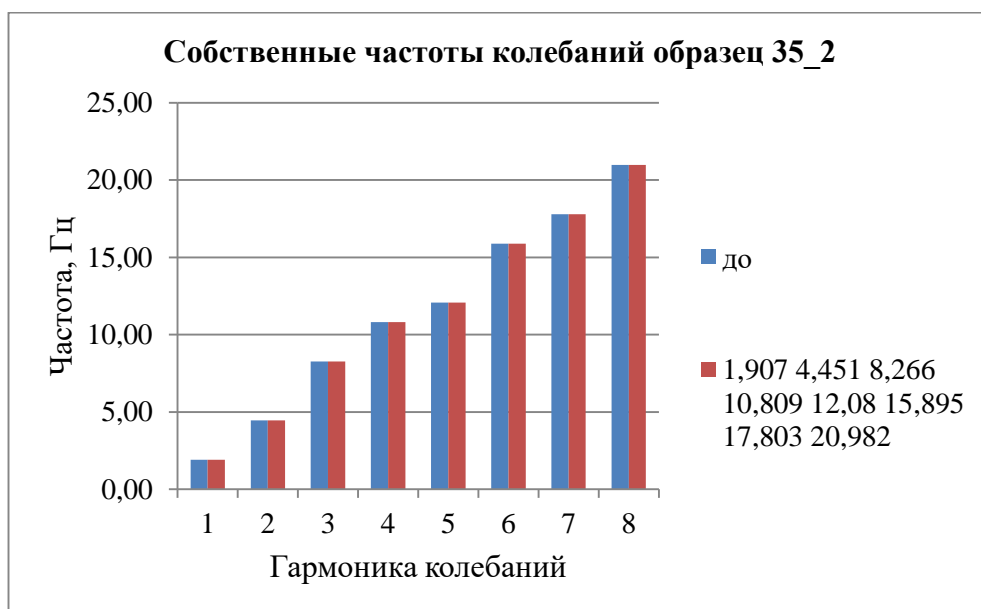
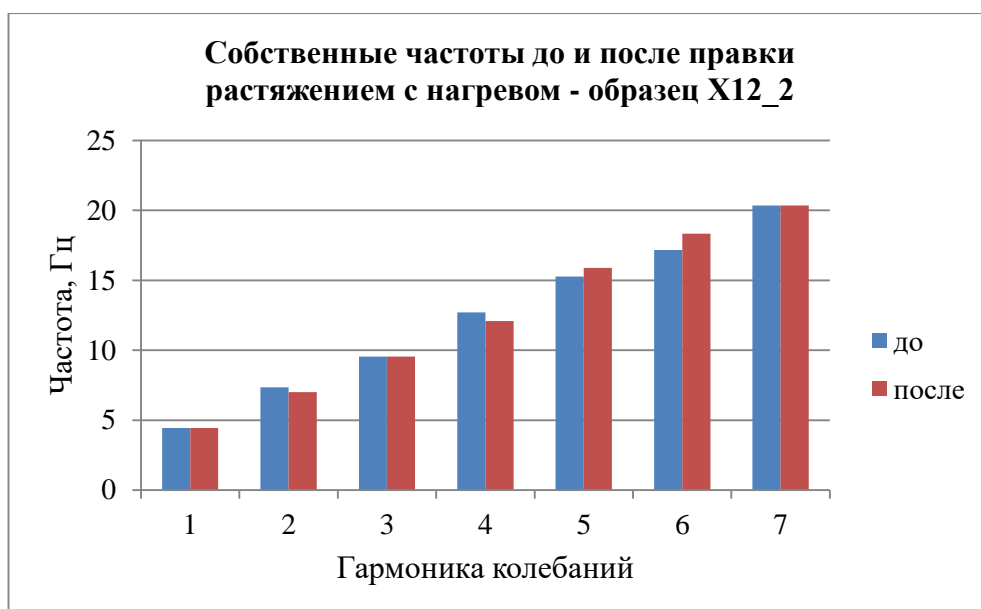


Рисунок 6.11 – Спектр собственных частот образцов

Для образцов из 12X18H10T №2 и стали 35 №2 наблюдалось повышение жесткости. В спектре для 12X18H10T №2 это отразилось на увеличении 5 и 6 гармоник, для образца 35 №2 спектр имеет абсолютно идентичный состав.

Проводилась обработка партии валов (16 штук) из сплава 12X18H10T диаметром 20 мм и длиной 320 мм до температуры 300°C с растяжением с нагревом до деформации для всей партии постоянной величины 0,003% и

дополнительной составляющей индивидуальной для каждой заготовки с учетом ее исходной кривизны.

Сравнивались данные с показателями для аналогичной партии заготовок без правки растяжением с нагревом, проводилась обработка черновым точением на аналогичных режимах для двух видов заготовки.

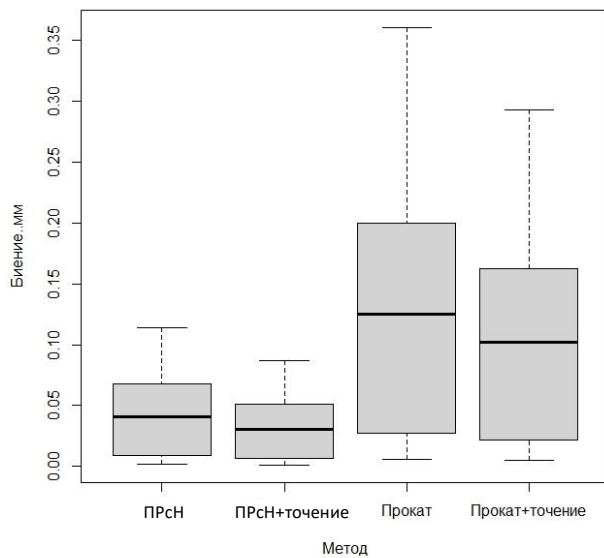


Рисунок 6.12 – Биение для проката с правкой с точением и прокат с точением (базовый вариант)

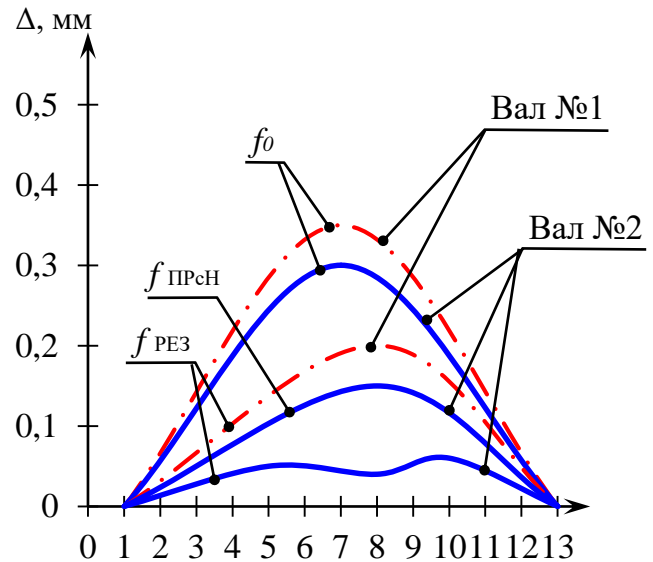


Рисунок 6.13 – Примеры биения для валов обработанных по двум вариантам технологии

6.3 Технологические рекомендации по использованию правки растяжением с нагревом

Порядок проведения следующий:

1. Определяется необходимое усилие для деформирования и область деформации, где наступает переход от зоны плато к области линейного упрочнения.

2. Заготовка проходит контроль по диаметру и биению. Для контроля диаметра выбирается три сечения по длине и в каждом проводится контроль по три раза. Значение диаметра принимается среднее арифметическое. Для контроля биения заготовка кладется на две призмы по крайним участкам и

индикаторным приспособлением проводится контроль биения в нескольких сечениях по длине, включая середину вала.

3. Обрабатываются две крайние шейки – нарезается резьба под захват. До 20 мм плашкой, выше резьбовым резцом за два установка с минимальным вылетом заготовки. Длина резьбы равна 2,2 высоты фиксирующей гайки.

4. Определение необходимой температуры обработки (отпуск или нормализация).

5. Определение температурной деформации заготовки:

$$\Delta L_t = \alpha \Delta T L, \quad (6.6)$$

где α – коэффициент линейного расширения, $1/^\circ\text{C}$;

ΔT – изменение температуры, $^\circ\text{C}$.

6. Определение деформации для компенсации прогиба:

$$\Delta L_f = \frac{f^2 \pi^2}{4L}, \quad (6.7)$$

где f – стрела прогиба вала (отклонение от соосности, определяемое на предварительном этапе), мм.

7. Определение величины деформации рабочей зоны заготовки между захватами с учетом рабочей температуры с использованием реологической модели. Использовать для расчета данные по модулю упругости E , МПа и пределу текучести σ_t МПа с учетом температуры.

8. Оценка дополнительной контактной и конструкторской деформации силового контура установки с учетом рабочего напряжения и соответствующего осевого усилия. Масштабирование установки для образцов от 20 мм диаметром и длиной 500 мм, до установки до 60 мм и длиной 1,5 м.

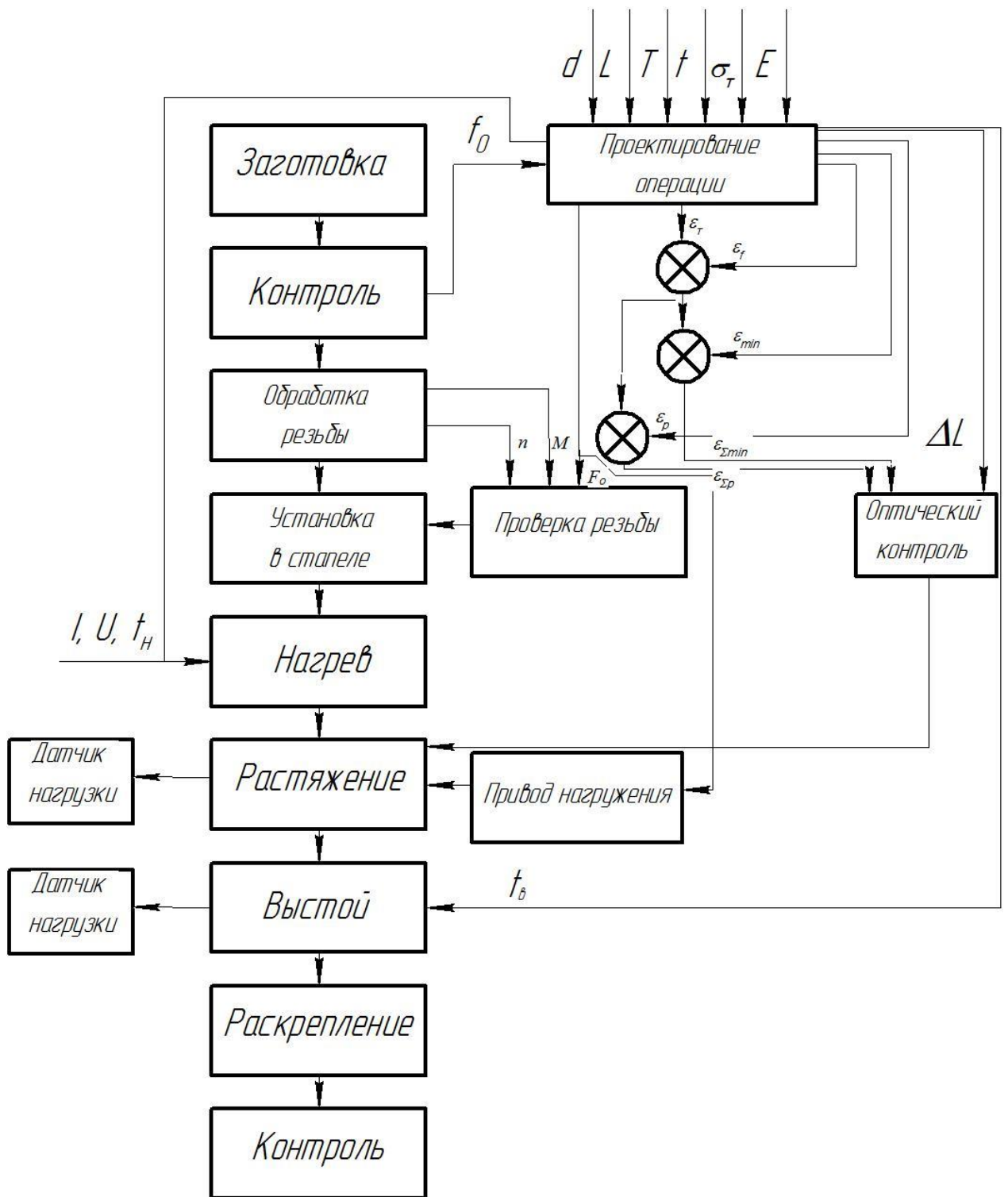


Рисунок 6.14 – Алгоритм проведения правки растяжением с нагревом

Два гидравлических цилиндра каждый усилием 400000 Н. Рабочая зона 1,5 м. Рабочий ход подвижного захвата 350 мм. Скорость деформации в диапазоне 10^{-2} - 10^{-5} сек⁻¹. Сферические шайбы под захваты для компенсации несоосности на верхнем и нижнем захватах.

Трех секционный нагрев отдельными секциями по 500 мм длиной. Модульность и экономия электроэнергии. Скорость нагрева 30 °С/мин.

Входные данные для расчета: длина заготовки L , мм; диаметр средний d , мм; материал и его параметры (модуль упругости E , МПа; предел текучести σ_T , МПа; коэффициент линейного расширения α , 1/°С)

Дополнительные расчетные данные приведены в приложении А.

По ГОСТ 2590-2006 на горячекатаные заготовки допустимая кривизна составляет 0,5% до 25, 0,4% свыше 25 мм и 0,2% от длины заготовки по требованию заказчика.

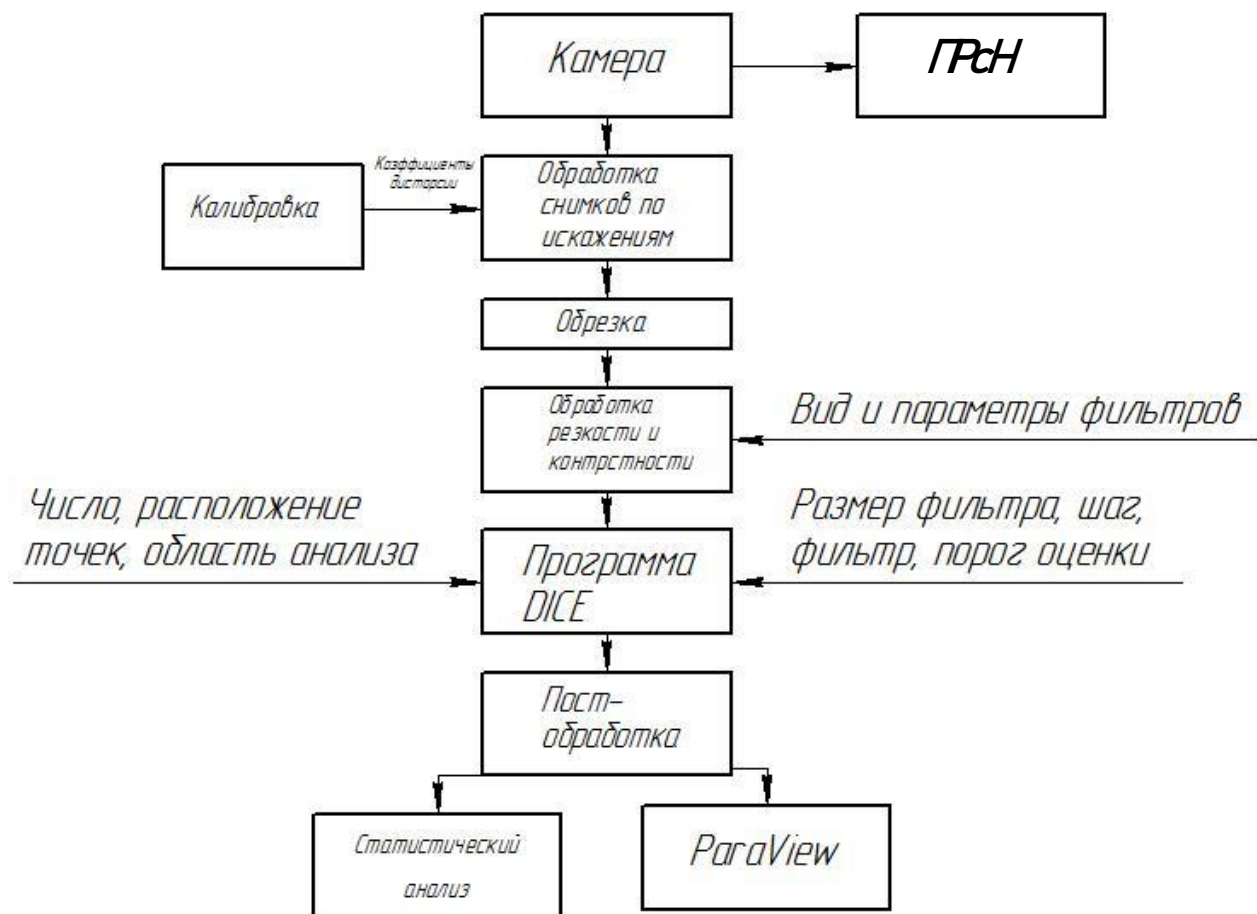
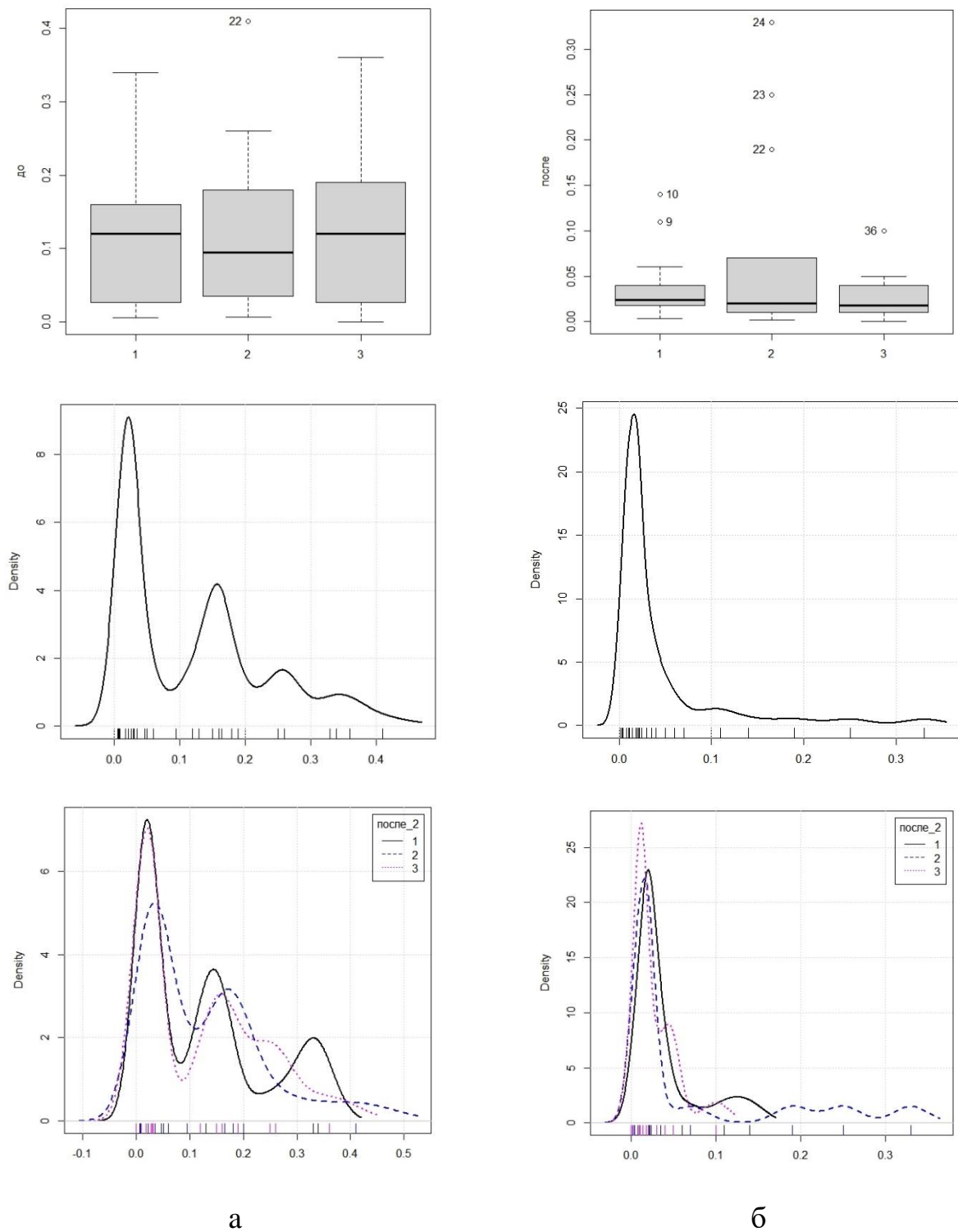


Рисунок 6.15 – Схема анализа деформации методом ЦКИ



а – до правки растяжением с нагревом; б – после правки растяжением с нагревом

Рисунок 6.16 – Кривизна (мм) и биение вала (бок-плот по сечениям, плотность распределения биения общая и по сечениям)

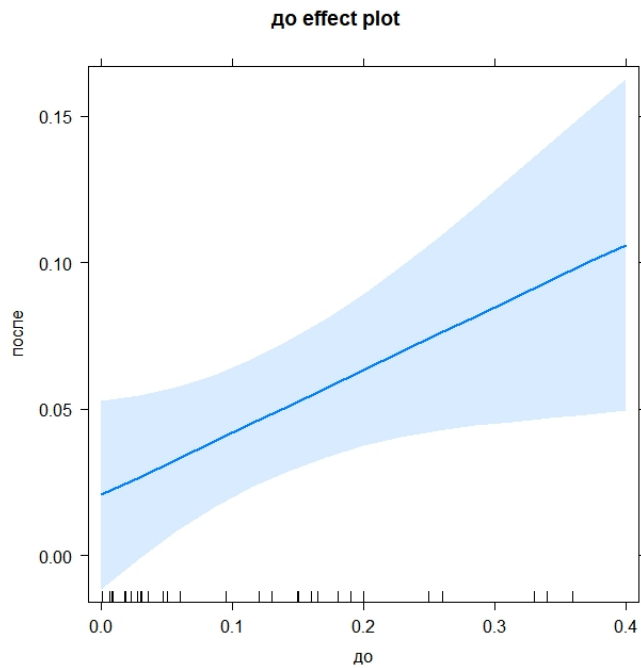


Рисунок 6.17 – Зависимость коэффициента уточнения для биения для правки растяжением с нагревом

Пример поведения вала с исходной кривизной между переходами по точению.

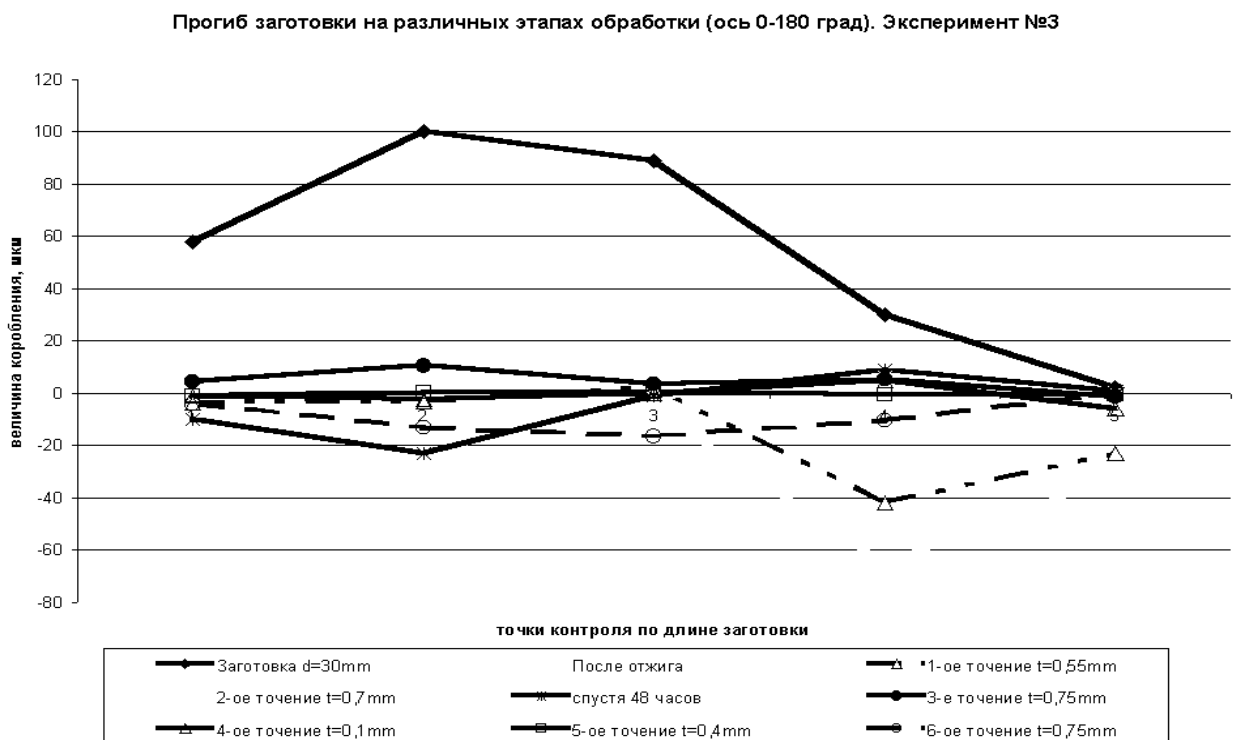


Рисунок 6.18 – Коробление вала между переходами

Результаты диссертационного исследования внедрены в технологический процесс на машине для правки с нагревом с гидравлическим приводом, в производственных условиях промышленного предприятия ООО «Токарка» (г. Тольятти). Внедрение осуществлено на заготовительном этапе технологического процесса, что подтверждено актами внедрения. Применение разработки позволило стабилизировать геометрию и прямолинейность цилиндрических заготовок, что привело к сокращению числа проходов обработки, снижению процента брака по параметрам точности и получению годового экономического эффекта в размере 230 тыс. рублей.

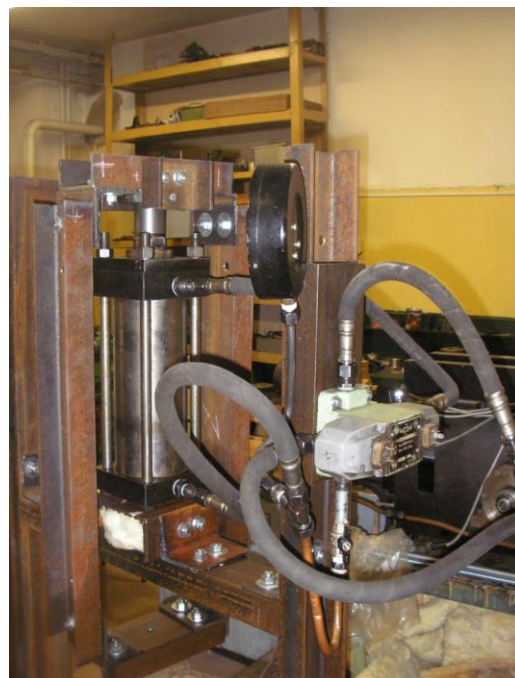


Рисунок 6.19 – Машина для правки с нагревом с гидравлическим приводом

Вертикально установленный стапель в раме из швеллеров, выполненный из материала с коэффициентом линейного расширения, большим, чем у детали с резьбой на обоих концах, резьбовой механизм фиксации детали с обоих концов. Цилиндрических тяг с резьбой на внутренней и наружной поверхности, причем по внутренней резьбе фиксируют деталь, а по наружной - гайку для силового замыкания. Верхняя часть соединена с гидравлическим приводом.

6.4 Технико-экономические показатели и эффективность правки растяжением с нагревом

Эффективность правки растяжением с нагревом заключается в том, что она позволяет сократить процент брака в результате изготовления мало жесткого вала. При этом время подготовки заготовки под правку растяжением с нагревом и сама операция меньше, чем много переходная обработка по обтачиванию вала. Это связано с комплексным изменением заготовки и по прямолинейности, повышению жесткости вследствие упрочнения и формированию равномерной деформации.

Для вычисления эффективности правки растяжением с нагревом, необходимо использовать формулу расчета ожидаемой прибыли, которая учитывает снижение процента брака:

$$П_{ож} = Э_{уг} = \left[C_{пол(БАЗ)} - \frac{Б_{Р(БАЗ)} - Б_{Р(ПР)}}{100} \cdot C_{пол(ПР)} \right] \cdot П_{г}, \quad (6.8)$$

где $C_{пол(БАЗ)}$, $C_{пол(ПР)}$ – полная себестоимость изготовления единицы детали, соответственно по базовому и проектному вариантам; $Б_{Р(БАЗ)}$, $Б_{Р(ПР)}$ – процент брака изделия до и после совершенствования процесса, соответственно; $П_{г}$ – программа выпуска изделий.

Процесс правки растяжением с нагревом является сложным физико-механическим процессом с множеством влияющих параметров (рисунок 6.20).

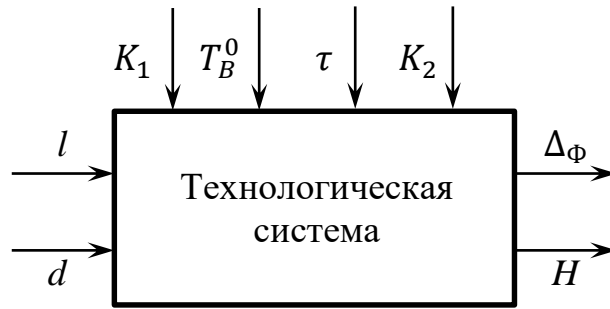


Рисунок 6.20 – Объект регулирования правки растяжением с нагревом

Если оценить погрешность формы в продольном сечении $\Delta\Phi$, то зависимость может быть:

$$\Delta\Phi = \beta_0 K_1^{\beta_1} T_B^{\beta_2} K_2^{\beta_3} \tau^{\beta_4} l^{\beta_5} d^{\beta_6}, \quad (6.9)$$

где $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6$ – показатели степени для зависимости; K_1 – скорость нагрева; T_B – температура выдержки; K_2 – скорость охлаждения; τ – время выдержки на рабочей температуре; l и d – длина и диаметр заготовки.

На схеме на рисунке 6.20, H – это твердость после правки растяжением с нагревом. Длительность процесса правки растяжением с нагревом определяется преимущественно временем нагрева (рисунок 6.21 – отрезок 0-а), выстоя (а-б) и охлаждения (b-с).

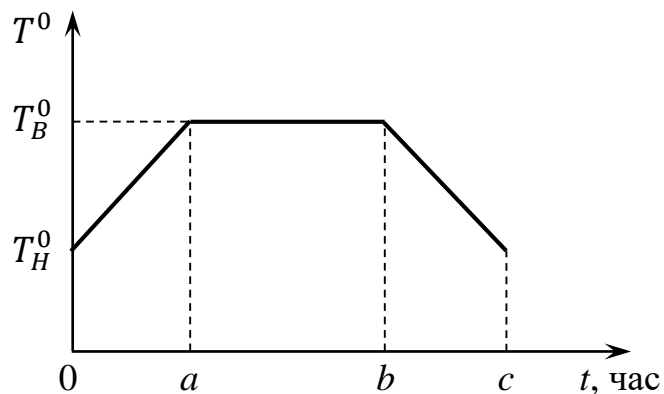


Рисунок 6.21 – Типовой график температуры для правки растяжением с нагревом

При этом происходит изменение напряженного состояния за счет различных процессов.

Затраты на правку растяжением с нагревом:

$$\theta_{T^0} = E_{T^0} \cdot t_{T^0}, \quad (6.10)$$

где E_{T^0} – стоимость минуты работы установки правки растяжением с нагревом; t_{T^0} – время термообработки. Время правки растяжением с нагревом t_{T^0} из рисунка 6.20:

$$t_{T^0} = 0a + ab + bc, \quad (6.11)$$

$$0a = \frac{T_B^0 - T_H^0}{K_1}, \quad (6.12)$$

$$ab = \tau, \quad (6.13)$$

$$bc = \frac{T_B^0 - T_H^0}{K_2}, \quad (6.14)$$

$$t_{T^0} = \frac{T_B^0 - T_H^0}{K_1} + \tau + \frac{T_B^0 - T_H^0}{K_2} \quad (6.15)$$

Технологическое ограничение по геометрии:

$$\Delta_{\Phi} \leq \Delta_{\Phi \text{доп}} \quad (6.16)$$

Выводы по главе 6

Приведены результаты исследования влияния правки растяжением с нагревом на эффективность общего технологического процесса изготовления маложестких деталей. Кроме обеспечения равномерного распределения деформаций, происходит обеспечение максимальной прямолинейности оси заготовки. С учетом полученных зависимостей, включая нейросетевое моделирование, величины прогиба вала от конструкторско-технологических параметров, можно спрогнозировать уровень точности конкретного процесса

с учетом количества переходов и глубины резания.

Использование правки растяжением с нагревом обеспечивает исправление исходной кривизны, что также выявлено в ходе экспериментальных исследований. Установлено снижение биения заготовок в 1,4-4,0 раза за счет пластического деформирования с учетом начальной погрешности формы. Обеспечение деформаций при правке растяжением с нагревом в определенном диапазоне приводит к повышению жесткости заготовок из-за упрочнения в 1,1-1,2 раза при реализации первой и второй стадий пластического течения обеспечивает снижение упругих деформаций при последующей обработке, что повышает точность точения на 10-17%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с целью работы по повышению точности геометрии маложестких валов с обеспечением равномерного распределения деформаций при правке растяжением с нагревом на основе учета взаимосвязи особенностей локализации пластических деформаций со стадиями пластического течения, были выполнены следующие задачи:

1. Проведена систематизация технологий, способов, влияющих факторов по формированию прямолинейности оси маложестких деталей и обоснована перспективность создания класса установок для правки растяжением с нагревом с одновременным нагревом заготовок цилиндрической формы в рамках заготовительного этапа их обработки.

2. Разработана математическая модель процесса деформирования при правке растяжением с нагревом с учетом изменения температуры и нагружения. Расчет распределенной реологической модели без и с упрочнением проводился для сталей 40X и 12X18H10T в диапазоне от 20 до 700 °С.

3. Разработана методика комплексной оценки равномерности деформаций по длине осесимметричного вала на основе оптического метода контроля распределения деформаций в процессе нагружения с точностью контроля смещений до 0,025 мм на длине заготовки до 350 мм (рабочая зона до 300 мм). Определены критерии оценки степени локализации и оценки равномерности распределения деформации.

4. Исследованы и выявлены особенности локализации пластической деформации, с учетом стадий пластического течения на основе статистического анализа равномерности удлинений, полученных методом оптического контроля. Коэффициенты локальности деформаций по участкам заготовки меняются от 1,25 стадии линейного упрочнения до 2,6 стадии параболического упрочнения, характеризуя возрастание локальности деформаций на отдельных участках заготовки.

5. Разработан алгоритм контроля стадий пластического течения по особенностям сигнала силового нагружения путем обучения и применения нейросетевой модели с целью выхода на стадию нагружения, обеспечивающую максимально равномерную и полную проработку материала заготовки при правке растяжением с нагревом. Получена модель прогнозирования силового нагружения на основе LSTM с точностью 92% и классификации с точностью 83%.

6. Разработаны рекомендации для обеспечения однородности деформаций на установках для правки растяжением с нагревом в рамках заготовительного этапа процесса изготовления маложестких цилиндрических заготовок. Использование правки растяжением с нагревом обеспечивает исправление исходной кривизны, снижение биения заготовок в 1,4-4,0 раза за счет пластического деформирования с учетом начальной погрешности формы. Повышение жесткости заготовок из-за упрочнения в 1,1-1,2 раза при реализации первой и второй стадий пластического течения обеспечивает снижение упругих деформаций при последующей обработке, что повышает точность точения на 10-17%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобровский, А. В. Устройство для термосиловой обработки маложестких валов / А. В. Бобровский, Д. А. Расторгуев, В. Г. Шляхтина, К. О. Семенов // Патент на изобретение RU 2623972 С. – 29.06.2017.
2. Воронов, Д. Ю. Обзор существующих и перспективные тенденции развития технологий изготовления маложестких длинномерных валов [Текст] / Д. Ю. Воронов, Н. Ю. Логинов, И. В. Шевелев // Научные труды Sworld. – 2012. – т. 8. № 3. – С. 8-12.
3. Воронов, Д. Ю. Оборудование для проведения термосиловой обработки и обработки холодом [Текст] / Д. Ю. Воронов, А. В. Попов // Инновации в науке. – 2015. – № 51-1. – С. 172-178.
4. Воронов, Д. Ю. Описание методики экспериментальной обработки маложестких длинномерных деталей и описание устройства для их реализации [Текст] / Д. Ю. Воронов, К. А. Репин, И. В. Шевелев // Теплофизические и технологические аспекты повышения эффективности машиностроительного производства : труды IV международной научно-технической конференции (Резниковские чтения). – 2015. – С. 189-192.
5. Воронов, Д. Ю. Перспективные тенденции совершенствования технологических процессов изготовления маложестких деталей [Текст] / Д. Ю. Воронов, К. А. Репин // Проблемы проектирования и автоматизации в машиностроении : сб. науч. тр. ЗАО «ОНИКС». – Ирбит, 2015. – С. 52-60.
6. Воронов, Д. Ю. Система автоматического управления термосиловой обработки многоступенчатых маложестких валов [Текст] / Д. Ю. Воронов, О. И. Драчев // Проблемы проектирования и автоматизации машиностроительных производств, серия «Управление качеством технологических процессов в машиностроении». – Тольятти, 2013. – С. 68-76.
7. Григорьев, А. К. Структурообразование при пластической деформации металлов / А. К. Григорьев, Н. Г. Колбасников, С. Г. Фомин // СПб.: Издательство С.-Петербургского университета. – 1992. – 244 с.

8. Драчев, А. О. Термосиловая обработка ступенчатых осесимметричных деталей [Текст] / А. О. Драчев, О. И. Драчев, Г. В. Тараненко, В. А. Тараненко, А. В. Свиць // Автоматизация: проблемы, идеи, решения : материалы междунаро. науч.-техн. конф. – 2009. – С. 18-21.

9. Драчев, О. И. Бессиловая и термосиловая обработка высокоточных деталей. / О. И. Драчев // Старый Оскол: ТНТ. – 2019. – 244 с.

10. Драчев, О. И. Метод снижения коробления мало жестких валов [Текст] / О. И. Драчев, А. В. Бобровский, Д. Ю. Воронов // Машиностроитель. – 2001. – № 6. – С. 20-23.

11. Драчев, О. И. Моделирование упруго-пластических деформаций при термосиловой обработке [Текст] / О. И. Драчев, Д. А. Расторгуев, М. В. Старостина // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2012. – № 3. – С. 80-85.

12. Драчев, О. И. Определение качества холодноправленных осесимметричных деталей [Текст] / О. И. Драчев, В. Г. Митрофанов, А. Г. Схиртладзе // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2004. – С. 6-8.

13. Драчев, О. И. Повышение точности и стабильности форм высокоточных не жестких деталей на основе управления температурно-силовым режимом при обработке [Текст] / О. И. Драчев, А. А. Кутин, В. Г. Митрофанов // Вестник машиностроения. – 2000. – № 6. – С. 16-19.

14. Драчев, О. И. Повышение эффективности обработки мало жестких валов при комбинированном термосиловом нагружении [Текст] / О. И. Драчев, Д. А. Расторгуев, М. В. Старостина // Металлообработка. – 2012. – № 3 (69). – С. 30-35.

15. Драчев, О. И. Пути технологического воздействия на стабильность форм мало жестких осесимметричных заготовок [Текст] / О. И. Драчев, Э. Е. Хенкина // Технол. и Автоматиз. Машиностр. – 1991. – № 48. – С.13-16.

16. Драчев, О. И. Способ термосиловой обработки длинномерных осесимметричных деталей / О. И. Драчев, Д. А. Расторгуев, О. А. Расторгуева, А. О. Драчев // Патент на изобретение RU 2387719 C1. –

27.04.2010. Заявка № 2008140809/02 от 14.10.2008.

17. Драчев, О. И. Способ термосиловой обработки длинномерных осесимметричных деталей и устройство для его осуществления / О. И. Драчев, К. А. Репин // Патент на изобретение RU 2645235 С1. – 19.02.2018. Заявка № 2016143289 от 02.11.2016.

18. Драчев, О. И. Способ термосиловой обработки длинномерных осесимметричных деталей и устройство для его осуществления / О. И. Драчев, Д. Ю. Воронов, К. А. Репин // Патент на изобретение 2615852 С. – 11.04.2017. Заявка № 2015105155 от 16.02.2015.

19. Драчев, О. И. Способ термосиловой обработки длинномерных осесимметричных деталей и устройство для его осуществления / О. И. Драчев, Д. Ю. Воронов, К. А. Репин // Патент на изобретение RU 2575510 С2. – 20.02.2016. Заявка № 2014108656/02 от 05.03.2014.

20. Драчев, О. И. Технология изготовления малоожестких осесимметричных деталей / О. И. Драчев // М.: Политехника. – 2005. – 289 с.

21. Драчев, О. И. Устройство для термосиловой обработки осесимметричных деталей / О. И. Драчев, Д. А. Расторгуев, А. О. Драчев // Патент на изобретение RU 2381281 С1. – 10.02.2010. Заявка № 2008139995/02 от 08.10.2008.

22. Зенкевич, О. К. Метод конечных элементов в технике [Текст] / О. К. Зенкевич // Москва: Мир. – 1975. – 541 с.

23. Зуев, Л. Б. Автоволновая пластичность: Локализация и коллективные моды / Л. Б. Зуев // М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2019. – 208 с.

24. Зуев, Л. Б. Автоволны локализации пластического течения. скорость распространения, дисперсия и энтропия / Л. Б. Зуев, С. А. Баранникова // Физика металлов и металловедение. – 2011. – Т. 112. – № 2. – С. 115-123.

25. Зуев, Л. Б. Автоволновая модель пластического течения / Л. Б. Зуев // Физическая мезомеханика. – 2011. – Т. 14. – № 3. – С. 85-94.

26. Зуев, Л. Б. О волновом характере пластического течения.

Макроскопические автоволны локализации деформации / Л. Б. Зуев // Физическая мезомеханика. – 2006. – Т. 9. – № 3. – С. 47-54.

27. Кабаков, Р. И. R в действии. Анализ и визуализация данных на языке R / Р. И. Кабаков // ДМК Пресс. – 2014. – 588 с.

28. Коновалов, А. В. Экспериментальная база и методика идентификации определяющих соотношений упруговязкопластичной среды / А. В. Коновалов, А. С. Смирнов // Физико-химическая кинетика в газовой динамике – 2010. – Т. 9. – № 1. – С. 198-201.

29. Креопалова, Г. В. Оптические измерения. / Г. В. Креопалова, Н. Л. Лазарева, Д. Т. Пуряев // М.: Машиностроение. – 1987. – 264 с.

30. Любутин, П. С. Измерение деформации на мезоуровне путем анализа оптических изображений поверхности нагруженных твердых тел / П. С. Любутин, С. В. Панин // Прикладная математика и техническая физика. – 2006. – Т. 47. – № 6. – С. 158-164.

31. Любутин, П. С. Развитие метода корреляции цифровых изображений для изучения процессов деформации и разрушения конструкционных материалов / П. С. Любутин, С. В. Панин, В. В. Титков, А. В. Еремин, Р. Сундер // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2019. – № 1. – С. 88-109.

32. Мураткин, Г. В. Процессы образования и снижения технологических остаточных деформаций нежестких деталей / Г. В. Мураткин // Металлообработка. – 2019. – № 6 (114). – С. 17-26.

33. Надеждин, К. Д. Визуальные методы определения деформаций и напряжений на поверхности испытуемых конструкций / К. Д. Надеждин, Л. М. Шарнин, А. П. Кирпичников // Вестник Технологического университета. – 2016. – Т. 19. – № 12. – С. 143-146.

34. Николенко, С. Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей: 16+ / С. Николенко, А. Кадури, Е. Архангельская // Санкт-Петербург. – 2021. – 476 с.

35. Олдендерфер, М. С. Кластерный анализ. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ / М. С. Олдендерфер, Р. К. Блэшфилд // М.: Финансы и статистика. – 1989. – 215 с.

36. Панин, С. В. Автоматический выбор размера ядра корреляции в задаче оценки деформации материалов методом корреляции цифровых изображений / С. В. Панин, В. В. Титков, П. С. Любутин // Вычислительные технологии. – 2015. – Т. 20. – № 2. – С. 65-78

37. Панин, С. В. Верификация метода оценки деформации на мезоуровне, основанного на построении полей векторов перемещений участков поверхности / С. В. Панин, П. С. Любутин // Физическая мезомеханика. – 2005. – Т. 8. – № 2. – С. 69-80.

38. Полянский, В. А. Моделирование полос локализации пластической деформации "шахматная доска" с учетом статистического разброса параметров зерен поликристалла / В. А. Полянский, А. К. Беляев, А. И. Грищенко, А. М. Лобачев, В. С. Модестов, А. В. Пивков, Д. А. Третьяков, Л. В. Штукин, А. С. Семенов, Ю. А. Яковлев // Физическая мезомеханика. – 2017. – Т. 20. – № 6. – С. 40-47.

39. Реков, А. М. Плотность распределения деформаций в плоскости образца ВТ1-00 при растяжении / А. М. Реков, Д. И. Вичужанин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2018. – № 3. – С. 53-60.

40. Расторгуев, Д. А. Нейросетевая модель процесса термосиловой обработки [Текст] / Д. А. Расторгуев // Проблемы проектирования и автоматизации в машиностроении – 2016 : сб. науч. тр. – Ирбит, 2016. – С. 206-216.

41. Расторгуев, Д. А. Определение деформаций цилиндрических образцов оптическим способом с использованием метода цифровой корреляции изображений / Д. А. Расторгуев, К. О. Семенов // Frontier Materials & Technologies. – 2022. – № 2. – С. 74-83.

42. Расторгуев, Д. А. Особенности локализации деформации при

термосиловой обработке / Д. А. Расторгуев, К. О. Семенов // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2021. – № 2 (56). – С. 26-34.

43. Расторгуев, Д. А. Способ и устройство для управления термосиловой обработкой / Д. А. Расторгуев, К. О. Семенов // Патент на изобретение 2768412 С1. – 24.03.2022. Заявка № 2021116691 от 07.06.2021.

44. Расторгуев, Д. А. Способ термосиловой обработки длинномерных осесимметричных деталей и устройство для его осуществления / Д. А. Расторгуев, О. И. Драчев, Д. Ю. Воронов // Патент на изобретение RU 2254383 С1. – 20.06.2005. Заявка № 2003136837/02 от 19.12.2003.

45. Расторгуев, Д. А. Технологическое обеспечение равномерности пластической деформации при термосиловой обработке / Д. А. Расторгуев, К. О. Семенов, Р. Р. Дёма, Р. Н. Амиров, Е. Ф. Романенко, О. Р. Латыпов, П. А. Матвеев // Технология металлов. – 2021. – № 8. – С. 24-32.

46. Расторгуев, Д. А. Устройство для термосиловой обработки осесимметричных деталей / Д. А. Расторгуев, К. О. Семенов // Патент на изобретение RU 2632748 С. – 09.10.2017. Заявка № 2016102938 от 28.01.2016.

47. Расторгуев, Д. А. Устройство для термосиловой обработки осесимметричных деталей / Д. А. Расторгуев, О. И. Драчев, О. А. Расторгуева // Патент на изобретение RU 2381282 С1. – 10.02.2010. Заявка № 2008140009/02 от 08.10.2008.

48. Расторгуев, Д. А. Формирование распределения упруго-пластических деформаций в стержнях в результате действия волновых процессов» [Текст] / Д. А. Расторгуев, К. О. Семенов // Вектор науки ТГУ. – 2015. – № 3-1 (33-1). – С. 100-105.

49. Самойлова, А. Ю. Методика расчета значений реологических параметров сверхпластичных материалов / А. Ю. Самойлова, В. Р. Ганиева, Ф. У. Еникеев, А. А. Круглов // Письма о материалах. – т. 2. – №4 (8) – 2012. – С. 240-244.

50. Семенов, К. О. Моделирование процесса деформирования при

термосиловой обработке / К. О. Семенов, Д. А. Расторгуев // сборник научных статей V международной научной конференции в 2-х частях. НПП МЕДПРОМДЕТАЛЬ ООО Газпром трансгаз Казань. – Казань. – 2021. – С. 77-81.

51. Семенов, К. О. Повышение стабильности геометрических параметров мало жестких деталей при термосиловой обработке [Текст] / К. О. Семенов, Д. А. Расторгуев // Научные исследования: от теории к практике: материалы II международной научно-практической конференции. – ЦНС «Интерактив плюс». – Чебоксары, 2015. – С. 196-197.

52. Семенов, К. О. Расчет усилий комплексного нагружения при термосиловой обработке / К. О. Семенов, Д. А. Расторгуев // Инновационные технологии, экономика и менеджмент в промышленности. Сборник научных статей VI международной научной конференции. – Волгоград. – 2021. – С. 114-117.

53. Семенов, К. О. Этапы термосиловой обработки мало жестких длинномерных деталей [Текст] / К. О. Семенов, Д. А. Расторгуев // Технические науки – от теории к практике : сб. ст. по материалам XLII международной научно-практической конфер. – № 1 (38). – Изд. «СибАК». – Новосибирск, 2015. – С. 30-37.

54. Смирнов, А. С. Моделирование сопротивления деформации металломатричного алюминиевого композита 15% SiC/Al при высоких температурах / А. С. Смирнов, А. В. Коновалов, О. Ю. Муйземнек // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 11-1. – С. 22-25.

55. Смирнов, О. М. Реологические модели как основной элемент моделирования процессов обработки металлов давлением / О. М. Смирнов, С. А. Тулупов, М. А. Цепин // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. – 2008. – №2. – С. 45-52.

56. Теплякова, Л. А. Закономерности локализации деформации на крупномасштабных уровнях в стали со структурой отпущенного мартенсита /

Л. А. Теплякова, Э. В. Козлов, Л. Н. Игнатенко, Н. А. Попова, Н. Ф. Касаткина, В. А. Давыдова // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2000. – Т. 5. – № 2-3. – С. 221-223.

57. Третьякова, Т. В. Закономерности и схематизация процессов локализации пластического течения при испытании плоских образцов алюминиево-магниевого сплава / Т. В. Третьякова, В. Э. Вильдеман // Физическая мезомеханика. – 2017. – Т. 20. – № 2. – С. 71-78.

58. Третьяков, М. П. Опытное изучение закономерностей закритического поведения с учетом неоднородности деформирования образца / М. П. Третьяков, В. Э. Вильдеман // Математическое моделирование в естественных науках. – 2016. – Т. 1. – С. 549-553.

59. Agin, G. J. Computer vision systems for industrial inspection and assembly / G. J. Agin // Computer 13. – 1980. – No.5. – pp. 11-20.

60. Al-Haik, M. S. Prediction of nonlinear viscoelastic behavior of polymeric composites using an artificial neural network / M. S. Al-Haik, M. Y. Hussaini, H. Garmestani // International Journal of Plasticity. – 2006. – 22. – pp. 1367-1392.

61. Arash, J. The Use of genetic algorithm and neural network to predict rate-dependent tensile flow behavior of AA5182-O sheets / J. Arash, S. Iman Sari, E. G. Daniel, R. Taamjeed, J. W. Michael // Materials and Design. – 2016. – pp. 262-273.

62. Becker, T. Error estimations of 3D digital image correlation measurements / T. Becker, K. Splitthof, T. Siebert, P. Kletting // Proceedings of SPIE 6341. – 2006. – No.1. – 63410F-6.

63. Belloni, V. py2DIC: A New Free and Open Source Software for Displacement and Strain Measurements in the Field of Experimental Mechanics / V. Belloni, R. Ravanelli, A. Nascetti, M. Di Rita, D. Mattei, M. Giovanni Crespi // Sensors. – 2019. – Vol. 19. – P. 1-19.

64. Bewerse, C. Local and global strains and strain ratios in shape memory alloys using digital image correlation. / C. Bewerse, K. R. Gall, G. J. McFarland,

P. Zhu, L. C. Brinson // Mater Sci Eng A. – 2013. – 568. – pp. 134-42.

65. Blaber, J. Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software / J. Blaber, B. Adair, A. Antoniou // Experimental Mechanics. – 2015. – Vol. 55. – P. 1105-1122.

66. Bomarito, G. F. Increasing accuracy and precision of digital image correlation through pattern optimization / G. F. Bomarito, J. D. Hochhalter, T. J. Ruggles, A. H. Cannon // Optics and Lasers in Engineering. – 2017. – Vol. 91. – P. 73-85.

67. Bosse, S. Learning Damage Event Discriminator Functions with Distributed Multi-instance RNN/LSTM Machine Learning – Mastering the Challenge / S. Bosse // Procedia Manufacturing. – 2020. – 52. – pp. 193-202.

68. Bröcker, C. An enhanced concept of rheological models to represent nonlinear thermoviscoplasticity and its energy storage behavior / C. Bröcker, A. Matzenmiller // Continuum Mech. Thermodyn. – 2015. – 27. – pp. 325-347.

69. Bruck, H. Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction / H. Bruck, S. McNeill, M. Sutton, W. Peters // Experimental Mechanics 29. – 1989. – No.3. – pp. 261-267.

70. Buluswar, S. D. Color machine vision for autonomous vehicles / S. D. Buluswar, B. A. Draper // Int. J. Eng. Appl. Artif. Intell. – 1998. – 1. – pp. 245-256.

71. Candocia, FM. Super-resolution of images based on local correlations. / FM. Candocia, JC. Principe // IEEE Trans Neural Netw. – 1999. – 10(2) : 372–80.

72. Cesar, A. S. A Review: Optical Methods That Evaluate Displacement / A. S. Cesar // Advancement of Optical Methods & Digital Image Correlation in Experimental Mechanics. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. – 2019. – Vol. 3. – P. 23-52.

73. Chen, Y. Multiscale recurrence analysis of long-term nonlinear and nonstationary time series / Y. Chen, Y. Hui // Chaos Solitons & Fractals. – 45. – 2012. – pp. 978-987.

74. Chu, T. C. Applications of digital image-correlation techniques to

experimental mechanics / T. C. Chu, W. F. Ranson, M. A. Sutton // *Experimental Mechanics* 25. – 1985. – pp. 232-244.

75. Dantec. Digital Image Correlation System (Q-400) / Dantec // Available at: <http://www.dantecdynamics.com>. Accessed – 27 February. – 2012.

76. Dong, Y. L. A Review of Speckle Pattern Fabrication and Assessment for Digital Image Correlation / Y. L. Dong, B. A. Pan // *Experimental Mechanics*. – 2017. – Vol. 57. – P. 1161-1181.

77. Eraslan, A. N. A computational procedure for estimating residual stresses and secondary plastic flow limits in nonlinearly strain hardening rotating shafts. / A. N. Eraslan, W. A. Mack // *Forschung im Ingenieurwesen*. – March 2005. – Volume 69. – Issue 2. – pp. 65-75.

78. Freeman, W. T. Computer vision for computer games / W. T. Freeman, K. Tanaka, J. Ohta, K. Kyuma // *Proceedings of the Second International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition, Killington, VT, USA*. – 1996. – pp. 100-105.

79. Freeman, W. T. Computer vision for interactive computer graphics / W. T. Freeman // *IEEE Computer Graphics and Applications* 18. – 1998. – No.3. – pp. 42-53.

80. Fukuda, Y. Cost-effective vision-based system for monitoring dynamic response of civil engineering structures. / Y. Fukuda, M. Q. Feng, M. Shinozuka // *Struct. Control Health Monit.* – 2010. – 17. – pp. 918-936.

81. Furuta, T. The mechanism of strength and deformation in Gum Metal. / T. Furuta, S. Kuramoto, J. W. Morris, N. Nagasako, E. Withey, D. C. Chrzan // *Scr Mater.* – 2013. – 68. – pp. 767-72.

82. Garcia, G. Temporal signals to images: Monitoring the condition of industrial assets with deep learning image processing algorithms / G. Garcia // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*. – 2021. – 236. – pp. 617-627.

83. Gavrus, E. An inverse analysis using a finite element model for identification of rheological parameters / E. Gavrus, J. L. Massoni, Chenot //

Journal of Materials Processing Technology. – 1996. – 60. – pp. 447-454.

84. Garcia, D. A combined temporal tracking and stereo-correlation technique for accurate measurement of 3D displacements: application to sheet metal forming / D. Garcia, J. Orteu, L. Penazzi // Journal of Materials Processing Technology 125-126. – 2002. – pp. 736-742.

85. Golasiński, K. Investigation of strain rate sensitivity of Gum Metal under tension using digital image correlation / K. Golasiński, E. Pieczyska, M. Maj, M. Staszczak, P. Świec, T. Furuta, S. Kuramoto // Archives of Civil and Mechanical Engineering. – 2020. – Vol. 20. – P. 1-14.

86. GOM, ARAMIS Software. Available at: <http://www.gom.com/3dsoftware/aramis-software.html>. Accessed – 27 February. – 2012.

87. Groover, M. P. Industrial robotics: technology, programming, and applications / M. P. Groover // McGraw-Hill. – 1986.

88. Gruening, A. Residual Stress State in Tools Used for Thermomechanical Metal Forming Processes. / A. Gruening, M. Lebsanft, B. Scholtes // Engineering Applications of Residual Stress. Part of the series Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. – 2011. – Volume 8. – pp. 39-45.

89. G'Sell, C. Experimental characterization of deformation damage in solid polymers under tension, and its interrelation with necking / C. G'Sell, J. M. Hiver, A. Dahoun // International Journal of Solids and Structures. – 2002. – Vol. 39. – № 13-14. – P. 3857-3872.

90. Han, T. A novel adversarial learning framework in deep convolutional neural network for intelligent diagnosis of mechanical faults / T. Han // Knowl. Based Syst. – 2019. – 165. pp. 474-487.

91. Haralick, R. M. Computer and Robot Vision / R. M. Haralick, L. G. Shapiro // Addison-Wesley. – 1991. – Vol. 1.

92. Hartley, R. I. Triangulation. Computer Vision & Image Understanding / R. I. Hartley, P. Sturm // – 1997. – 68. – No.2. – pp. 146-157.

93. Hartley, R. Multiple view geometry in computer vision / R. Hartley, A.

Zisserman // 2nd edn. Cambridge University Pres. Cambridge. – 2004.

94. Helm, J. D. Improved three-dimensional image correlation for surface displacement measurement / J. D. Helm, S. R. McNeill, M. A. Sutton // Opt. Eng. 35. – 1996. – No.7. – pp. 1911-1920.

95. Hu, W. A survey on visual surveillance of object motion and behaviors / W. Hu, T. Tan, L. Wang, S. Maybank // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews 34. – 2004. – No.3. – pp. 334-352.

96. Hung, P.-C. In-plane strain measurement by digital image correlation / P.-C. Hung, A. S. Voloshin // J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng. XXV. – 2003. – No.3. – pp. 215-221.

97. Jiantao, L. Prediction of the flow stress of high-speed steel during hot deformation using a BP artificial neural network / L. Jiantao, C. Hongbing, T. Y. Hsu (Xu Z.), R. Xueyu // Journal of Materials Processing Technology. – 2000. – pp. 200-205.

98. Jiroušek, O. Evaluation of strain field in microstructures using micro-CT and digital volume correlation. / O. Jiroušek, I. Jandejsek, D. Vavřík // J Instrum. – 2011. – 6(01) : C01039.

99. Joseph, S. H. Markings for image-based deformation measurement on a torsion test machine / S. H. Joseph // Strain. – 2009. – Vol. 45. – P. 139-148.

100. Juan, D. Investigation of the Influence Factors on Distortion in Induction-Hardened Steel Shafts Manufactured from Cold-Drawn Rod. / D. Juan, E. Jeremy, R. Alexandre da Silva, M. N. Rafael, Z. Hans Werner // Metallurgical and Materials Transactions A. – November 2015. – pp. 1-12.

101. Kahn-Jetter, Z. Three-dimensional displacement measurements using digital image correlation and photogrammic analysis / Z. Kahn-Jetter, T. Chu // Experimental Mechanics 30. – 1990. – No.1. – pp. 10-16.

102. Kammers, AD. Self-assembled nanoparticle surface patterning for improved digital image correlation in a scanning electron microscope. / AD. Kammers, S. Daly // Exp Mech. – 2013. – 53(8). – pp. 1333-41.

103. Khandekar, A. V. Application of fuzzy axiomatic design principles for

selection of non-traditional machining processes. / A. V. Khandekar, S. Chakraborty // *Int J Adv Manuf Technol.* – 2016. – 83. – pp. 529-543.

104. Kim, T. Y. Predicting residential energy consumption using CNN-LSTM neural networks / T. Y. Kim, C. Sung-Bae // *Energy.* – 2019.

105. Kleffner, D. A. On the perception of shape from shading / D. A. Kleffner, V. S. Ramachandran // *Perception & Psychophysics* 52. – 1992. – pp. 18-36.

106. Kuramoto, S. Elastic properties of Gum Metal. / S. Kuramoto, T. Furuta, J. Hwang, K. Nishino, T. Saito // *Mater Sci Eng A.* – 2006. – 442. – pp. 454-7.

107. Le, Q. Study of the location of testing area in residual stress measurement by Moiré interferometry combined with hole-drilling method. / Q. Le, X. HuiMin, Z. RongHua, W. Dan, C. ZhiGang, Z. ShiKun // *Science China Physics, Mechanics and Astronomy.* – April 2014. – Volume 57. – Issue 4. – pp. 708-715.

108. Luo, H. Integration of Multi-Gaussian fitting and LSTM neural networks for health monitoring of an automotive suspension component / H. Luo // *Journal of Sound and Vibration.* – 2018.

109. Luo, P. Accurate measurement of three-dimensional deformations in deformable and rigid bodies using computer vision / P. Luo, Y. Chao, M. Sutton, W. Peters // *Experimental Mechanics* 33. – 1993. – No.2. – pp. 123-132.

110. Luo, P.-F. Application of stereo vision to three-dimensional deformation analyses in fracture experiments / P.-F. Luo, Y. J. Chao, M. A. Sutton // *Opt. Eng.* 33. – 1994. – No.3. – pp. 981-990.

111. Machado, G. Membrane curvatures and stress-strain full fields of axisymmetric bulge tests from 3DDIC measurements. Theory and validation on virtual and experimental results. / G. Machado, D. Favier, G. Chagnon // *Exp Mech.* – 2011. – 52. – pp. 865-880.

112. Marei, M. Cutting tool prognostics enabled by hybrid CNN-LSTM with transfer learning / M. Marei, W. Li // *The International Journal of Advanced*

Manufacturing Technology. – 2021. – 118. pp. 817-836.

113. Matheus, B. A. M. Oberg. A novel to perform a thermoelastic analysis using digital image correlation and the boundary element method / B. A. M. Oberg Matheus, F. de Oliveira Daniel, N. V. Goulart Jhon, T. M. Anflor. A Carla // International Journal of Mechanical and Materials Engineering. – 2020. – Vol. 15. – P. 1-13.

114. Matthies, L. Obstacle detection for unmanned ground vehicles: a progress report / L. Matthies, A. Kelly, T. Litwin, G. Tharp // Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles '95 Symposium. – 1995. – pp. 475-486.

115. Matumoto, S. Development of threedimensional displacement measurement method using CCD cameras / S. Matumoto, Y. Miwata, T. Kuwabata // JSAE Review 16. – 1995. – No.1. – 105.

116. Matumoto, S. 3D full-field deformation monitoring of fiber composite pressure vessel using 3D digital speckle correlation method / S. Matumoto, Y. Miwata, T. Kuwabata // Polymer Testing 25. – 2006. – No.1. – pp. 42-48.

117. Miikki, K. An open-source camera system for experimental measurements / K. Miikki, A. Karakoc, M. Rafiee, Lee D. Weon, J. Vapaavuori, J. Tersteegen, L. Lemetti, J. Paltakari // SoftwareX. – 2021. – Vol. 14. – P. 1-9.

118. Musiał, S. Stress field determination based on digital image correlation results. / S. Musiał, M. Nowak, M. Maj // Arch Civ Mech Eng. – 2019. – 19(4) . – pp. 1183-93.

119. Nayar, S. K. Shape from focus system / S. K. Nayar // IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 1992. – pp. 302-308.

120. Nowak, M. Determination of coupled mechanical and thermal fields using 2D digital image correlation and infrared thermography: numerical procedures and results. / M. Nowak, M. Maj // Arch Civ Mech Eng. – 2018. – 18. – pp. 630-44.

121. Ozkok, F. O. Convolutional neural network analysis of recurrence plots for high resolution melting classification / F. O. Ozkok, C. Mete // Computer

methods and programs in biomedicine. – 2021. – 207 : 106139.

122. Pan, B. A fast digital image correlation method for deformation measurement. / B. Pan, K. Li // Opt Lasers Eng. – 2011. – 49(7) : 841-7.

123. Pan, B. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review. / B. Pan, K. Qian, H. Xie, A. Asundi // Meas Sci Technol. – 2009. – 20 : 062001.

124. Pantazopoulos, G. Failure and fracture analysis of austenitic stainless steel marine propeller Shaft. / G. Pantazopoulos, S. Papaefthymiou // Journal of Failure Analysis and Prevention. – 2015. – pp. 1-6.

125. Peters, W. H. Digital image techniques in experimental stress analysis / W. H. Peters, W. F. Ranson // Opt. Eng. 21. – 1982. – pp. 427-431.

126. Peters, W. H. Whole-field experimental displacement analysis of composite cylinders / W. H. Peters, M. A. Sutton, W. F. Ranson, W. P. Poplin, D. M. Walker // Experimental Mechanics 29. – 1989. – No.1. – pp. 58-62.

127. Press, W. H. Numerical Recipes in C++: The Art of Scientific Computing / W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, B. P. Flannery // 2nd edn. Cambridge University Press. – 2002.

128. Pun, T. Image analysis and computer vision in medicine / T. Pun, G. Gerig, O. Ratib // Comput Med Imaging Graph 18. – 1994. – No.2. – pp. 85-96.

129. Rastogi, P. K. Digital speckle pattern interferometry and related techniques / P. K. Rastogi // Wiley. – 2001.

130. Rastorguev, D. A. Estimation of efforts complex loading at thermopower processing / D. A. Rastorguev, K. O. Semenov // «Applied Sciences and technologies in the United States and Europe: common challenges and scientific findings» : Papers of the 5th International Scientific Conference. – New York, USA. – 2014. – P. 132-135.

131. Rastorguev D. A. Evaluation of the uniformity of plastic deformation under tension / D. A. Rastorguev // В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. – 2020. – P. 12071.

132. Rastorguev, D. A. Simulation and forecasting of wire tool piles fatigue endurance by using neural networks / D. A. Rastorguev, A. V. Zotov, A. V. Bobrowskii // *Procedia Engineering*. – 2017. – P. 1443-1451.

133. Rastorguev, D. A. Simulation of deformation at thermal power processing / D. A. Rastorguev, K. O. Semenov // «European Applied Sciences: modern approaches in scientific researches» : Papers of the 8th International Scientific Conference. – Stuttgart, Germany. – 2014. – P. 89-92.

134. Remagnino, P. Video-based surveillance systems: computer vision and distributed processing / P. Remagnino // Springer. – 2002.

135. Rémi, H. Consideration of residual stress and geometry during heat treatment to decrease shaft bending. / H. Rémi, B. Cyrille, B. Régis, S. Edoardo // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – June 2014. – Volume 72. – Issue 9. – pp. 1455-1463.

136. Reu, P. L. DIC Challenge: Developing Images and Guidelines for Evaluating Accuracy and Resolution of 2D Analyses. / P. L. Reu, E. Toussaint, E. Jones, H. A. Bruck, M. Iadicola, R. Balcaen, D. Z. Turner, T. Siebert, P. Lava, M. Simonsen // *Exp. Mech.* – 2017. – 58. – pp. 1067-1099.

137. Rezaie, A. Comparison of Crack Segmentation Using Digital Image Correlation Measurements and Deep Learning / A. Rezaie, R. Achanta, M. Godio, K. Beyer // *Construction and Building Materials*. – 2020. – P. 261.

138. Saito, T. Multifunctional alloys obtained via a dislocation free plastic deformation mechanism. / T. Saito, T. Furuta, J. H. Hwang, S. Kuramoto, K. Nishino, N. Suzuki, R. Chen, A. Yamada, K. Ito, Y. Seno, T. Nonaka, H. Ikehata, N. Nagasako, C. Iwamoto, Y. Ikuhara, T. Sakuma // *Science*. – 2003. – 300. – pp. 464-7.

139. Scrivens, W. A. Development of patterns for digital image correlation measurements at reduced length scales / W. A. Scrivens, Y. Luo, M. A. Sutton, S. A. Collette, M. L. Myrick, P. Miney, P. E. Colavita, A. P. Reynolds, X. Li // *Experimental Mechanics* 47. – 2006. – No.1. – pp. 63-77.

140. Schreier, H. W. Advances in light microscope stereo vision / H. W.

Schreier, D. Garcia, M. A. Sutton // *Experimental Mechanics* 44. – 2004. – No.3. – pp. 278-288.

141. Semenov, K. O. Current state of science in the development of technologies thermopower processing of low-rigid details / K. O. Semenov // *International Scientific Review of the Problems and Prospects of Modern Science and Education International : V International Science Conference.* – United Kingdom, London. – 2015. – P. 40-44.

142. Semenov, K. O. The study of the force parameters of complex loading during thermal-force processing / K. O. Semenov, D. A. Rastorguev // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. – Krasnoyarsk, Russia. – 2020. – C. 22014.

143. Sherstinsky, A. Fundamentals of Recurrent Neural Network (RNN) and Long Short-Term Memory (LSTM) network / A. Sherstinsky // *Physica D: Nonlinear Phenomena.* – 2020. – 404 : 132306.

144. Sutton, M. A. Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications / M. A. Sutton, J. J. Orteu, H. Schreier // *Springer.* – 2009. – 321 p.

145. Sutton, M. A. Recent Progress in Digital Image Correlation: Background and Developments since the 2013 W M Murray Lecture / M. A. Sutton, F. Matta, D. C. Rizos, R. Ghorbani, S. Rajan, D. Hilton Mollenhauer, H. Schreier, A. O. Lasprilla // *Experimental Mechanics.* – 2017. – Vol. 57. – P. 1-30.

146. Sutton, M. A. Systematic errors in digital image correlation caused by intensity interpolation / M. A. Sutton, H. W. Schreier, J. R. Braasch // *Optical Engineering.* – 2000. – Vol. 39. – P. 2915-2921.

147. Sutton, M. Advances in two-dimensional and three-dimensional computer vision / M. Sutton, S. McNeill, J. Helm, Y. Chao // *In: Photomechanics, Topics in Applied Physics* (P. K. Rastogi, Ed.). – Springer, Berlin. – 2000. – pp. 323-372.

148. Sutton, M. A. Image correlation for shape, motion and deformation

measurements: basic concepts, theory and applications / M. A. Sutton, J.-J. Orteu, H. Schreier // Springer, New York. – 2009.

149. Synnergren, P. A stereoscopic digital speckle photography system for 3-D displacement field measurements / P. Synnergren, M. Sjodahl // Optics and Lasers in Engineering 31. – 1999. – No.6. – pp. 425-443.

150. Tang, Z. Large deformation measurement scheme for 3D digital image correlation method. / Z. Tang, J. Liang, Z. Xiao, C. Guo // Opt Lasers Eng. – 2012. – 50(2) : 122–30.

151. Thomas Georg Karl, H. Distortion Analysis in the Manufacturing of Cold-Drawn and Induction-Hardened Components. / H. Thomas Georg Karl, R. Alexandre da Silva, N. Rafael Menezes // Metallurgical and Materials Transactions A. – December 2013. – Volume 44. – Issue 13. – pp. 5806-5816.

152. Tian, L. Application of digital image correlation for long-distance bridge deflection measurement. / L. Tian, B. Pan, Y. Cai, H. Liang, Y. Zhao // Proc SPIE-Int Soc Opt Eng Nanotechnol. – 2013.

153. Tiwari, V. Application of 3D image correlation for full-field transient plate deformation measurements during blast loading. / V. Tiwari, MA. Sutton, SR. McNeill, S. Xu, X. Deng, WL. Fourney, D. Bretall // Int J Impact Eng. – 2009. – 36(6) : 862–74.

154. Tolga, A. Exact solution of rotating FGM shaft problem in the elastoplastic state of stress. / A. Tolga, N. E. Ahmet // Archive of Applied Mechanics. – October 2007. – Volume 77. – Issue 10. – pp. 745-765.

155. Tournas, L. Displacement monitoring at the micron level using digital photogrammetry / L. Tournas, M. Tsakiri, M. Kattis // 3rd IAG. 12th FIG Symposium. – Baden, Austria. – 2006.

156. Tsai, R. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses / R. Tsai // IEEE Journal of Robotics and Automation 3. – 1987. – No.4. – pp. 323-344.

157. Turner, D. Z. An overview of the gradient-based local DIC formulation for motion estimation in DICe / D. Z. Turner // Sandia Report. – 2016. – P. 1-6.

158. Vendroux, G. Submicron deformation field measurements: Part 2. Improved digital image correlation / G. Vendroux, W. G. Knauss // *Experimental Mechanics* 38. – 1998. – No.2. – pp. 86-92.

159. Vorontsov, V. A. Superelastic load cycling of Gum Metal. / V. A. Vorontsov, N. G. Jones, K. M. Rahman, D. Dye // *Acta Mater.* – 2015. – 88. – pp. 323-33.

160. Wei-jian, Y. Analysis on damage and rheological characteristics of deep surrounding rock of shaft engineering. / Y. Wei-jian, Z. Yan // *Journal of Coal Science and Engineering (China)*. – March 2010. – Volume 16. – Issue 1. – pp. 29-34.

161. Winiarski, B. Micron-scale residual stress measurement by micro-hole drilling and digital image correlation. / B. Winiarski, P.J. Withers // *Exp Mech.* – 2012. – 52(4). – pp. 417-28.

162. Wu, Y. A hybrid LSTM-KLD approach to condition monitoring of operational wind turbines / Y. Wu, M. Xiandong // *Renewable Energy*. – 2022.

163. Xia, S. Diffraction Assisted Image Correlation: A Novel Method for Measuring Three-Dimensional Deformation using Two-Dimensional Digital Image Correlation. / S. Xia, A. Gdoutou, G. Ravichandran // *Exp Mech.* – 2013. – 53. – pp. 755-765.

164. Xu, W. Multi-Scale Convolutional Gated Recurrent Unit Networks for Tool Wear Prediction in Smart Manufacturing / W. Xu, H. Miao, Z. Zhao, J. Liu, C. Sun, R. Yan // *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. – 2021. – 34.

165. Xue, B. Data-driven prognostics method for turbofan engine degradation using hybrid deep neural network / B. Xue, Z. Xu, X. Huang, P. Nie // *Journal of Mechanical Science and Technology*

166. Yang, H. Spatiotemporal Differentiation of Myocardial Infarctions / H. Yang, C. Kan, G. Liu, Y. Chen // *Automation Science and Engineering, IEEE Transactions*.

167. Yano, T. Study of the nanostructure of Gum Metal using energy-filtered transmission electron microscopy. / T. Yano, Y. Murakami, D. Shindo, S.

Kuramoto // *Acta Mater.* – 2009. – 57. – pp. 628-33.

168. Yoneyama, S. Lens distortion correction for digital image correlation by measuring rigid body displacement / S. Yoneyama, H. Kikuta, A. Kitagawa, K. Kitamura // *Opt. Eng.* 45. – 2006. – No.2. – 023602.

169. Yong-Jin, C. Multi-stage forging process design of steering system output shaft for reduction of energy consumption. / C. Yong-Jin, L. Sang-Kon, L. In-Kyu, C. Yong-Jae, L. Jae-Wook, C. Jung-Woo, J. Myeong-Sik // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing.* – June 2015. – Volume 16. – Issue 7. – pp. 1455-1460.

170. Yoshida, S. Observation of optical interferometric band structure representing plastic deformation front under cyclic loading. / S. Yoshida, H. Ishii, K. Ichinose, K. Gomi, K. Taniuchi // *Japanese Journal of Applied Physics.* – 2004. – 43. – pp. 5451-5454.

171. Zhao, R. Deep learning and its applications to machine health monitoring / R. Zhao, R. Yan, Z. Chen, K. Mao, P. Wang, R. X. Gao // *Mechanical Systems and Signal Processing.* – 2019. – 115. – pp. 213–237.

172. Zhao, R. Machine health monitoring with LSTM networks / R. Zhao, J. Wang, R. Yan, K. Mao // *10th International Conference on Sensing Technology (ICST).* – 2016.

173. Zhang, J. Recurrent neural networks with long term temporal dependencies in machine tool wear diagnosis and prognosis / J. Zhang // *SN Applied Sciences.* – 2019.

174. Zhang, R. Shape-from-shading: a survey / R. Zhang, P.-S. Tsai, J. E. Cryer, M. Shah // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 21. – 1999. – No.8. – pp. 690-706.

175. Zhang, Z. A flexible new technique for camera calibration / Z. Zhang // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 22. – 2000. – No.11. – pp. 1330-1334.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А.1 – Физико-механические свойства 12Х18Н10Т от температуры

Температура, °С	Модуль упругости $E \cdot 10^{-5}$, МПа	Предел текучести σ_T , МПа	Предел текучести σ_B , МПа	Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^{-6}$ 1/°С
20	2,05	315	560	16,5
100	2,02	280	450	16,8
200	1,97	250	420	17
300	1,90	235	410	17,3
400	1,81	220	400	17,6
500	1,73	190	390	18,1

Таблица А.2 – Усилие для деформирования валов при разных температурах

Температура, °С	Усилие, Н			
	Диаметр, мм			
	15	20	30	40
20	55636,88	98910	222547,5	395640
100	49455	87920	197820	351680
200	44156,25	78500	176625	314000
300	41506,88	73790	166027,5	295160
400	38857,5	69080	155430	276320
500	33558,75	59660	134235	238640

Таблица А.3 – Температурная деформация валов различной длины при разных температурах

Температура, °С	Температурное удлинение, мм			
	Длина, мм			
	100	250	500	750
100	0,164	0,41	0,82	1,23
200	0,328	0,82	1,64	2,46
300	0,492	1,23	2,46	3,69
400	0,656	1,64	3,28	4,92
500	0,82	2,05	4,1	6,15

Таблица А.4 – Дополнительная деформация валов с учетом их исходной кривизны

Исходная кривизна f , мм	Температурное удлинение, мм			
	Длина, мм			
	100	250	500	750
0,05	0,164	0,41	0,82	1,23
0,1	0,328	0,82	1,64	2,46
0,15	0,492	1,23	2,46	3,69
0,3	0,656	1,64	3,28	4,92
0,5	0,82	2,05	4,1	6,15

Таблица А.5 – Деформация заготовки до начала пластического течения (минимальная)

Температура, °С	ε , %	Удлинение, мм				
		Длина, мм				
		100	200	300	400	500
20	0,001537	0,153659	0,307317	0,460976	0,614634	0,768293
100	0,001386	0,138614	0,277228	0,415842	0,554455	0,693069
200	0,001269	0,126904	0,253807	0,380711	0,507614	0,634518
300	0,001237	0,123684	0,247368	0,371053	0,494737	0,618421
400	0,001215	0,121547	0,243094	0,364641	0,486188	0,607735
500	0,001098	0,109827	0,219653	0,32948	0,439306	0,549133

Таблица А.6 – Деформация заготовки до начала линейного участка (рабочая)

Температура, °С	ε , %	Удлинение, мм				
		Длина, мм				
		100	200	300	400	500
20	0,0053	0,53	1,06	1,59	2,12	2,65
100	0,0045	0,45	0,9	1,35	1,8	2,25
200	0,0034	0,34	0,68	1,02	1,36	1,7
300	0,0031	0,31	0,62	0,93	1,24	1,55
400	0,0025	0,25	0,5	0,75	1	1,25
500	0,00215	0,215	0,43	0,645	0,86	1,075

Продолжение таблицы 6.1 – Данные по короблению оси маложесткого вала

№ точки	Номер прохода	Тип обработки	Время	r_0 , мм	t , мм	R_0 , мм
1	4	1	0	-10	0,75	4,5
2	4	1	0	-23	0,75	10,5
3	4	1	0	-1	0,75	3,5
4	4	1	0	9	0,75	5,5
5	4	1	0	1	0,75	-1,5
1	5	1	0	4,5	0,1	-1
2	5	1	0	10,5	0,1	-2,5
3	5	1	0	3,5	0,1	0
4	5	1	0	5,5	0,1	5
5	5	1	0	-1,5	0,1	-6
1	6	1	0	-1	0,4	-1
2	6	1	0	-2,5	0,4	0,5
3	6	1	0	0	0,4	0,5
4	6	1	0	5	0,4	-0,5
5	6	1	0	-6	0,4	-0,5
1	7	1	0	-1	0,75	-4
2	7	1	0	0,5	0,75	-13
3	7	1	0	0,5	0,75	-16,5
4	7	1	0	-0,5	0,75	-10,5
5	7	1	0	-0,5	0,75	0
1	1	1	0	-12	0,75	7
2	1	1	0	-67,5	0,75	13
3	1	1	0	-99,5	0,75	-11
4	1	1	0	-78,5	0,75	-11
5	1	1	0	-20,5	0,75	-1,5
1	2	2	48	7	0	7,5
2	2	2	48	13	0	13
3	2	2	48	-11	0	-9
4	2	2	48	-11	0	-10
5	2	2	48	-1,5	0	0
1	3	1	0	7,5	0,55	1,5
2	3	1	0	13	0,55	12,5
3	3	1	0	-9	0,55	17,5
4	3	1	0	-10	0,55	12,5
5	3	1	0	0	0,55	2
1	4	1	0	1,5	0,75	2,5
2	4	1	0	12,5	0,75	-7
3	4	1	0	17,5	0,75	-3,5
4	4	1	0	12,5	0,75	-3
5	4	1	0	2	0,75	-6,5
1	5	1	0	2,5	0,7	-7

Продолжение таблицы 6.1 – Данные по короблению оси маложестького вала

№ точки	Номер прохода	Тип обработки	Время	r_0 , мм	t , мм	R_0 , мм
2	5	1	0	-7	0,7	-30,5
3	5	1	0	-3,5	0,7	-6
4	5	1	0	-3	0,7	-8
5	5	1	0	-6,5	0,7	-30,5
1	1	1	0	-1	0,25	2,5
2	1	1	0	12	0,25	-5
3	1	1	0	23,5	0,25	11
4	1	1	0	21	0,25	13
5	1	1	0	5	0,25	7
1	2	2	48	2,5	0	1,5
2	2	2	48	-5	0	-14
3	2	2	48	11	0	3
4	2	2	48	13	0	10
5	2	2	48	7	0	5
1	3	2	72	1,5	0	1,5
2	3	2	72	-14	0	-14
3	3	2	72	3	0	1
4	3	2	72	10	0	8
5	3	2	72	5	0	4
1	4	2	386	1,5	0	0
2	4	2	386	-14	0	-11
3	4	2	386	1	0	-1
4	4	2	386	8	0	8
5	4	2	386	4	0	5
1	5	1	0	0	0,75	-0,5
2	5	1	0	-11	0,75	2,5
3	5	1	0	-1	0,75	10
4	5	1	0	8	0,75	6
5	5	1	0	5	0,75	-1
1	6	2	24	-0,5	0	-1
2	6	2	24	2,5	0	2
3	6	2	24	10	0	8
4	6	2	24	6	0	3
5	6	2	24	-1	0	-2
1	7	1	0	-1	0,75	5
2	7	1	0	2	0,75	24
3	7	1	0	8	0,75	25
4	7	1	0	3	0,75	19
5	7	1	0	-2	0,75	-4
1	8	2	100	5	0	5
2	8	2	100	24	0	25
3	8	2	100	25	0	29,5
4	8	2	100	19	0	22

Продолжение таблицы 6.1 – Данные по короблению оси маложестького вала

№ точки	Номер прохода	Тип обработки	Время	r_0 , мм	t , мм	R_0 , мм
5	8	2	100	-4	0	-1,5
1	9	1	0	5	0,9	3
2	9	1	0	25	0,9	-1
3	9	1	0	29,5	0,9	-6
4	9	1	0	22	0,9	-6
5	9	1	0	-1,5	0,9	-1,5
1	10	1	0	3	0,9	10
2	10	1	0	-1	0,9	35
3	10	1	0	-6	0,9	50
4	10	1	0	-6	0,9	44
5	10	1	0	-1,5	0,9	13
1	11	2	48	10	0	13,5
2	11	2	48	35	0	38,5
3	11	2	48	50	0	52
4	11	2	48	44	0	43,5
5	11	2	48	13	0	11
1	12	1	0	13,5	0,95	-6,5
2	12	1	0	38,5	0,95	-26
3	12	1	0	52	0,95	-32
4	12	1	0	43,5	0,95	-23
5	12	1	0	11	0,95	-2
1	13	2	48	-6,5	0	-6,5
2	13	2	48	-26	0	-25
3	13	2	48	-32	0	-31
4	13	2	48	-23	0	-23
5	13	2	48	-2	0	-1
1	1	1	0	13	0,75	-12
2	1	1	0	37	0,75	-40
3	1	1	0	-17	0,75	-27
4	1	1	0	-62	0,75	-17
5	1	1	0	-17	0,75	0
1	2	1	0	-12	0,55	-4
2	2	1	0	-40	0,55	-5,5
3	2	1	0	-27	0,55	-4,5
4	2	1	0	-17	0,55	3,5
5	2	1	0	0	0,55	12
1	3	1	0	-4	0,75	-0,5
2	3	1	0	-5,5	0,75	-7,5
3	3	1	0	-4,5	0,75	-8
4	3	1	0	3,5	0,75	-1
5	3	1	0	12	0,75	4
1	4	1	0	-0,5	0,7	-3
2	4	1	0	-7,5	0,7	-16

Продолжение таблицы 6.1 – Данные по короблению оси маложестького вала

№ точки	Номер прохода	Тип обработки	Время	r_0 , мм	t , мм	R_0 , мм
3	4	1	0	-8	0,7	-20,5
4	4	1	0	-1	0,7	-14
5	4	1	0	4	0,7	1
1	4	1	0	-3	0,7	-5
2	4	1	0	-16	0,7	-13
3	4	1	0	-20,5	0,7	-12,5
4	4	1	0	-14	0,7	-0,5
5	4	1	0	1	0,7	7,5
1	5	1	0	-5	0,4	5,5
2	5	1	0	-13	0,4	16,5
3	5	1	0	-12,5	0,4	18,5
4	5	1	0	-0,5	0,4	14
5	5	1	0	7,5	0,4	1,5
1	6	1	0	5,5	0,75	-7
2	6	1	0	16,5	0,75	-21,5
3	6	1	0	18,5	0,75	-26,5
4	6	1	0	14	0,75	-12
5	6	1	0	1,5	0,75	-1
1	1	1	0	-2	0,55	-4
2	1	1	0	-8,5	0,55	-1,5
3	1	1	0	-2	0,55	4
4	1	1	0	-69	0,55	-53
5	1	1	0	-38	0,55	-30
1	2	1	0	-4	0,7	-11,5
2	2	1	0	-1,5	0,7	-25
3	2	1	0	4	0,7	-3
4	2	1	0	-53	0,7	6
5	2	1	0	-30	0,7	0,5
1	3	2	48	-11,5	0	-11,5
2	3	2	48	-25	0	-25
3	3	2	48	-3	0	0
4	3	2	48	6	0	1,5
5	3	2	48	0,5	0	0
1	4	1	0	-11,5	0,75	2,5
2	4	1	0	-25	0,75	9
3	4	1	0	0	0,75	4
4	4	1	0	1,5	0,75	7
5	4	1	0	0	0,75	-1,5
1	5	1	0	2,5	0,1	-0,5
2	5	1	0	9	0,1	-4,5
3	5	1	0	4	0,1	-1
4	5	1	0	7	0,1	5
5	5	1	0	-1,5	0,1	-6

Продолжение таблицы 6.1 – Данные по короблению оси маложестького вала

№ точки	Номер прохода	Тип обработки	Время	r_0 , мм	t , мм	R_0 , мм
1	6	1	0	-0,5	0,4	-0,5
2	6	1	0	-4,5	0,4	-1
3	6	1	0	-1	0,4	-2,5
4	6	1	0	5	0,4	6,7
5	6	1	0	-6	0,4	-10
1	1	1	0	-0,5	0,75	-4
2	1	1	0	-1	0,75	-17,5
3	1	1	0	-2,5	0,75	-23,5
4	1	1	0	6,7	0,75	14,5
5	1	1	0	-10	0,75	0
1	2	1	0	-16	0,75	6,5
2	2	1	0	-75,5	0,75	13,5
3	2	1	0	-110	0,75	-21,5
4	2	1	0	-94,5	0,75	-22,5
5	2	1	0	-23,5	0,75	-2,5
1	3	2	48	6,5	0	7,5
2	3	2	48	13,5	0	13,5
3	3	2	48	-21,5	0	-8,5
4	3	2	48	-22,5	0	-8,5
5	3	2	48	-2,5	0	2
1	4	1	0	7,5	0,55	1
2	4	1	0	13,5	0,55	12,5
3	4	1	0	-8,5	0,55	18,5
4	4	1	0	-8,5	0,55	12,5
5	4	1	0	2	0,55	2,5
1	5	1	0	1	0,75	-8
2	5	1	0	12,5	0,75	-3,5
3	5	1	0	18,5	0,75	-5
4	5	1	0	12,5	0,75	-5
5	5	1	0	2,5	0,75	3
1	6	1	0	-8	0,7	-41
2	6	1	0	-3,5	0,7	-6
3	6	1	0	-5	0,7	-33,5
4	6	1	0	-5	0,7	-33
5	6	1	0	3	0,7	-6
1	1	1	0	-16	0,25	3
2	1	1	0	-11	0,25	-9
3	1	1	0	5	0,25	10
4	1	1	0	9	0,25	17
5	1	1	0	-9	0,25	10