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 ГОРЯЧЕЙ ПРАВКИ РАСТЯЖЕНИЕМ 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 ГОРЯЧЕЙ ПРАВКИ РАСТЯЖЕНИЕМ И	
ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ, ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ	
КОНТРОЛЯ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ	12
1.1 Способы для стабилизации размеров и форм деталей	12
1.2 Развитие технологий термомеханических видов обработки	18
1.3 Базовые схемы проведения горячей правки растяжением	29
1.4 Обоснование сущности горячей правки растяжением	36
1.5 Технологические способы горячей правки растяжением	38
1.6 Технические трудности проведения горячей правки растяжением	44
1.7 Технические методы и способы контроля деформаций и напряжений	
при горячей правке растяжением	49
Выводы по главе 1	63
ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО	
СОСТОЯНИЯ НА ОСНОВЕ РЕОЛОГИЧЕСКОГО ПОДХОДА	64
2.1 Базовые формулы для расчета деформаций и напряжений при горячей	
правке растяжением	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 ГОРЯЧЕЙ ПРАВКИ РАСТЯЖЕНИЕМ	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	95
Выводы по главе 3	119

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ	
ПАРАМЕТРОВ ГОРЯЧЕЙ ПРАВКИ РАСТЯЖЕНИЕМ НА	
ДЕФОРМАЦИЮ ЗАГОТОВОК	121
4.1 Технологические факторы влияющие на выбор параметров горячей	
правки растяжением	121
4.2 Обоснование выбора режимов горячей правки растяжением с точки	
зрения диагностики	123
4.3 Обоснование выбора режимов горячей правки растяжением с точки	
зрения мезомеханики	125
4.4 Методика эксперимента	130
4.5 Результаты испытаний материала	133
4.6 Результаты исследований горячей правки растяжением	137
Выводы по главе 4	149
ГЛАВА 5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕЙ ПРАВКИ	
РАСТЯЖЕНИЕМ НА БАЗЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МЕТОДОВ	152
5.1 Обзор использования нейросетевых методов в исследовании	
процессов деформирования. Задачи нейросетевого моделирования	152
5.2 Построение нечеткой нейросетевой модели	155
5.3 Моделирование процесса деформирования при горячей правке	
растяжением при помощи нейронных сетей	165
5.4 Кластеризация деформационных параметров при горячей правке	
растяжением	173
Выводы по главе 5	188
ГЛАВА 6. ВЛИЯНИЕ ГОРЯЧЕЙ ПРАВКИ РАСТЯЖЕНИЕМ НА	
ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБРАБОТКИ МАЛОЖЕСТКИХ ВАЛОВ	190
6.1 Обеспечение прямолинейности горячей правкой растяжением	190
6.2 Влияние горячей правки растяжением на конструкторско-	
технологические параметры заготовки	198
Выводы по главе 6	206

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	208			
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	210			
ПРИЛОЖЕНИЕ А Технологические рекомендации по использованию				
горячей правки растяжением	230			
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Оценка остаточных напряжений	237			
ПРИЛОЖЕНИЕ В Технико-экономические показатели и эффективность				
внедрения	241			
ПРИЛОЖЕНИЕ Г АКТ о внедрении результатов	245			
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Таблицы	247			

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 проблемой различных отраслях, ключевой является обеспечение прямолинейности. Традиционно для правки используется поперечный изгиб, однако перспективным подходом является правка растяжением (горячая и холодная), требующая формирования равномерной деформации по всему объему заготовки. Технологическая сложность горячей правки растяжением 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 необходима автоволновой характер пластического течения. Поэтому деформации методика оценки равномерности при нагружении цилиндрических заготовок, учитывающая нагрев, для проектирования эффективной горячей правки растяжением и обеспечения заданной точности размеров, формы и распределения остаточных напряжений.

Степень разработанности темы. Задача повышения точности формы длинномерных маложестких валов является актуальной для машиностроения. Существующие методы правки, в частности горячая правка растяжением, обладают рядом преимуществ, однако их эффективность ограничена неравномерностью распределения деформаций и сложностью контроля самого процесса. В настоящее время по исследованию процессов горячей правки растяжением, 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 исследований области значительное количество В пластического формоизменения, вопросы учета стадий пластического течения, влияния температурных полей и разработки эффективных методов контроля равномерности деформаций при горячей правке растяжением 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 установление режимах, оптимальных режимов формоизменения и обработки», п. 2 «Новые методы пластического изменения свойств заготовок сжатием, ударом, магнитно-импульсным и иными воздействиями» и 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 горячей правки растяжением длинномерных маложестких валов.

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

Цель работы: повышение точности формы длинномерных маложестких валов с обеспечением равномерного распределения деформаций при горячей правке растяжением 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 новых технологий, способов, влияющих факторов по формированию прямолинейности оси маложестких деталей.

2. Разработать математическую модель процесса деформирования при горячей правке растяжением 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 этапов пластического течения по особенностям сигнала силового нагружения путем обучения и применения нейросетевой модели с целью выхода на этап нагружения, обеспечивающий максимально равномерную и полную проработку материала заготовки при горячей правке растяжением.

Научная новизна работы:

1. Разработана распределенная модель процесса деформирования, отличающейся от известных моделей тем, что применяется реологическая модель на основе модели Ишлинского с упрочнением с температурнозависимыми коэффициентами для анализа особенностей процесса 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 этапа пластического течения по сигналу нагружения на основе сети типа LSTM для обеспечения при горячей правке растяжением максимально равномерной деформации.

4. Разработан и апробирован оптический способ контроля распределения деформаций по длине образцов на основе метода цифровой корреляции изображения, отличающаяся 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 горячей правке растяжением на основе фиксации полей смещений методом цифровой корреляции изображений.

Теоретическая значимость работы:

1. Разработана математическая модель учитывающая температурнозависимые свойства материала и стадии пластического течения, расширяет представления о механизмах деформирования маложестких деталей.

2. Предложена методика моделирования и прогнозирования этапов пластического течения вносят вклад в развитие интеллектуальных систем управления технологическими процессами.

3. Результаты экспериментальных исследований расширяют базу данных о поведении материалов при термомеханическом воздействии и могут быть использованы для совершенствования других технологических процессов.

Практическая значимость работы:

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

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

Положения, выносимые на защиту:

1. Распределенная математическая модель процесса горячей правки растяжением, отличающейся 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 этапа 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 горячей правке растяжением, подтвержденная результатами оптического контроля полей смещений.

Методы исследования. Математическое моделирование на основе численных методов решения реологических уравнений 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 х 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 имеется 11 опубликованных работ, в том числе 5 статей опубликованы в изданиях, входящих в Перечень, рекомендованный ВАК Минобрнауки России; 3 статьи – в изданиях, индексируемых базами Scopus; получены 3 патента на изобретение.

Связь с государственными программами и НИР. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90148.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и пяти приложений. Работа изложена на 251 странице, включает в себя 144 рисунка, 32 таблицы, список литературы из 175 наименований.

ГЛАВА 1. БАЗОВЫЕ ПОНЯТИЯ ГОРЯЧЕЙ ПРАВКИ РАСТЯЖЕНИЕМ И ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ, ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ

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 устранятся скрученность вала относительно продольной оси.

Устранение столь разнообразных дефектов требует применения различных способов правки: изгибом, сжатием, кручением, растяжением. 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 сечений, ограничивающих участок фасонной трубы поперечных 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 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 одновременным кручением.

Правка круглых профильных труб осуществляется или на трубоправильных машинах. В зависимости от конструктивного исполнения, особенностей назначения технологических такие И 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 °C.

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 правильнораскруточных 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 клети.

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 остаточных напряжений, что, естественно, приведет к равномерной релаксации напряжений и минимальному короблению готовых изделий при их эксплуатации.

Для этой цели была введена в технологический процесс операция – горячая правка растяжением. 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.

Nº	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,	PΦ (CCCP)	Исключение коробления
	В.Ф. Запорожец,	Авторское	деталей с одновременным
	И.Е. Блохин,	свидетельство	дополнительным упрочнением
		№ 617484,	закаливаемой поверхности.
	PΦ (CCCP),	C21D9/28	Станок снабжен соединенным

Таблица 1.1 – Патентная литература

1	2	3	4
	30.07.78г.,		с механизмом прижима, узлом
			регулирования прижима,
	Станок для		состоящим из датчика и
	термической		регулятора давления,
	обработки		электрически связанных
	деталей		между собой.
2	О.И. Драчев,	PΦ (CCCP),	Повышение точности
	Г.Г. Палагнюк,	Авторское	обработки и улучшение
	В.К. Мазур,	свидетельство	эксплуатационных
	Т.Т. Ахмедьянов,	№ 1294482	характеристик обработанных
			деталей, стабилизации
	PΦ (CCCP),		остаточных напряжений
	07.03.87г.,		исключающее влияние
			технологич. наследственности
	Способ		от предыдущих операций.
	механической		Базирование детали
	обработки		осуществляют по длине
	нежестких		деталей в
	деталей		самоцентрирующихся опорах.
3	М.И. Оленин,	$P\Phi(CCCP)$	Повышение качества правки.
	Ю.П. Григорьев,	Авторское	Устройство, содержит оправку
	А.А. Разгуляев,	свидетельство	с фиксаторами, при этом
	И.Я. Пухонто,	№ 1018984	коэффициент термического
	И.Р. Цимбал,		расширения материалов
			оправки и фиксаторов
	PΦ (CCCP),		соответственно больше или
	23.05.83г.,		меньше коэффициента
	T T V		термического расширения
	Устройство для		материала заготовки, оправка
	термическои		выполнена секционнои, при
	правки изделии		этом каждая секция в зоне
			фиксатора имеет выступ, а на
			фиксаторе выполнена
			соответствующая ему
4	ОИЛ		проточка.
4	О.И. Драчев,	$P\Psi$ (CCCP),	повышение эффективности
		Авторское	процесса стаоилизации формы
	А.В. Клементьев,	свидетельство	осесимметричных деталеи. К
	D.D. АКИМОВ,	JNº 1344433	закрепленной одним концом
			детали к своюодному концу
	$F\Psi(UUUP),$		прикладывают переменное по
	15.10.8/г.,		направлению силовое

1	2	3	4
	Способ		воздействие в виде крутящего
	стабилизации		момента, частота изменения
	формы		направления которого равна
	осесимметричных		собственной частоте
	деталей		крутильных колебаний детали,
			создается равномерное по
			длине напряженное состояние.
5	В.К. Мазур,	PΦ (CCCP),	Уменьшение коробления
	О.И. Драчев,	Авторское	изделий. Устройство содержит
		свидетельство	трубу с равномерно
	PΦ (CCCP),	№ 1407969	расположенными по ее
	07.07.88г.,		поверхности отверстиями,
			которая выполнена из
	Устройство для		материала, не
	закалки валов		претерпевающего
	малой жесткости		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
	0 H H		резьбовой втулки с гайкой
6	О.И. Драчев,	PΦ (CCCP),	Повышение качества
	Э.Н. Хенкин,	Авторское	обработки деталеи путем
	О.И. Иванов,	свидетельство	предотвращения коробления
		JNº 1/08884	детали. Стапель в сооре с
	$P\Psi(CCCP),$		цеталью нагревают и держат
	50.01.921.,		на постоянной температуре. В
	Способ		период нагрева происходит
	терминеской		
	обработки		коэффициентов пинейного
	осесимметриции		постипрения станеня и летани
	ппинномерити		Стапець выполнят
	длинномерных петапей		многослойным
			лополнительным объемом
	деталеи		многослоиным с с дополнительным объемом,

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,	PΦ (CCCP),	Повышение качества
		Авторское	обработки путем уменьшения
	PΦ (CCCP),	свидетельство	коробления маложестких
	15.01.93г.,	№ 1788978	валов. Труба выполнена
			сплошной из металла или
	Устройство для		сплава с коэффициентом
	термической		термического расширения
	обработки		материала большим
	маложестких		коэффициента термического
	валов		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,	PΦ (CCCP),	Повышение качества готовых
		Авторское	изделий. Способ включает
	PΦ (CCCP),	свидетельство	нагрев в многослойном
	07.01.93г.,	№ 1786138	стапеле с заданной
			пластической деформацией и
	Способ		равномерными
	термической		растягивающими
	обработки		напряжениями по каждой
	осесимметричных		ступени детали и равномерное
	деталей		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

1	2	3	4
			сечений секций стапеля и
			ступеней детали.
9	В.П. Степанов,	PΦ (CCCP),	Улучшение качества детали.,
	А.В. Ушаков,	Патент № 1792436	Включает нагрев под закалку
	М.В. Шкотова,		и охлаждение в штампе, при
			охлаждении фиксируют в
	PΦ (CCCP),		штампе только центральную
	30.01.93г.,		зону детали, а наружную
			незафиксированную часть
	Способ термо-		охлаждают со скоростью,
	механической		обеспечивающей образование
	обработки		мартенсита.
	деталей		
10	В.Б. Дементьев,	РΦ,	Повышение характеристик
	А.А. Сухих,	Патент № 2055911	прочности, ударной вязкости,
			пластичности и снижение
	РΦ,		анизотропии упрочнения.
	10.03.96г.,		Включает нагрев до
			температуры аустенизации,
	Способ термо-		пластическую деформацию,
	механической		осуществляемую радиальным
	обработки сталей		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
			взаимопротивоположных
	0 H H	D I	направлениях равных 1,9-2,1.
11	О.И. Драчев,	ΡΦ,	Повышение надежности и
	Д.А. Расторгуев,	Патент № 2232198	эффективности термосиловои
	Д.Ю. Воронов		обработки (1СО) с
	DФ		достижением следующих
	ΡΦ,		технических результатов:
	T 7 U		упрощение конструкции
	Устроиство для		устроиства для ТСО путем
	термосиловой		использования его внутренних
	обработки		ресурсов; повышение
			стабильности остаточных

1	2	3	4
			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 выдвижении
			труб вверх. Внешние трубы
			выполнены неподвижными и
			снабжены выпускными
			клапанами для открывания
			отверстий при обратном
			движении внутренних труб
			вниз. Рабочая среда –
			сыпучий материал.
12	Д.В. Хван,	РΦ,	Улучшение технологических
	А.Д. Хван,	Патент № 2217508	свойств металлов. Сущность
	А.А. Воропаев,		изобретения: удлиняемую
	С.В. Пустовалов,		трубчатую заготовку
	А.А. Горячев,		подвергают немонотонному
			деформированию в цикле
	РΦ,		нагружения «растяжение -
	27.11.2003г.,		кручение – растяжение».
			При этом немонотонность
	Способ		деформирования
	улучшения		обеспечивают кручением
	технологических		заготовки после каждого этапа
	свойств металлов		ее растяжения в осевом

1	2	3	4
			направлении.
			Использование изобретения в
			машиностроении позволит
			получать изделия высокого
			качества.
13	О.И. Драчев,	РΦ,	Повышение стабильности
	Д.А. Расторгуев,	Патент № 2254383	размеров и формы
	Д.Ю. Воронов,		длинномерных
	_		осесимметричных
	PΦ,		маложестких деталей путем
	20.06.2005г.,		устранения направленности
			осевых остаточных
	Способ		напряжений и направленной
	термосиловой		текстуры материала заготовки
	обработки		по ее длине. Это достигается
	длинномерных		за счет использования
	осесимметричных		силового воздействия на
	деталей и		заготовку в процессе полного
	устройство для		цикла термообработки,
	его		причем цикл обработки
	осуществления		разделяются на подциклы, в
			течении 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 стапель с
			фиксаторами заготовки и
			нагревательный элемент,
			каждый из фиксаторов

1	2	3	4
			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.
14	О.И. Драчев,	РΦ,	Усовершенствование
	Д.А. Расторгуев,	Патент № 2260628	конструкции устройства для
	В.А. Гуляев,		термосиловой обработки,
	Д.Ю. Воронов,		обеспечивающее повышение
			качества термосиловой
	РΦ,		обработки. Стапель выполнен
	20.09.2005г.,		из двух полых труб. Крышки
			механизма фиксации имеют
	Устройство для		коробчатую форму и
	термосиловой		выполнены с возможностью
	обработки		неразъемного соединения с
	осесимметричных		трубами стапеля с
	деталей		использованием тяги с
			резьбой на внутренней и
			наружной поверхности,
			причем по внутренней резьбе
			фиксируют заготовку, а по
			наружной – гайку для
			силового замыкания.
15	О.И. Драчев,	<u>Ρ</u> Φ,	Повышение качества
	Д.А. Расторгуев,	Патент № 2381281	обработки деталей, устройство
	А.О. Драчев,		содержит вертикально
			установленный стапель,
	РΦ,		выполненный из материала с
	10.02.2010г.,		коэффициентом линейного
			расширения большим, чем у

1	2	3	4
	Устройство для		детали в виде цилиндрической
	термосиловой		трубы с фланцами на обоих
	обработки		концах, неразъемно
	осесимметричных		соединенный со стапелем
	деталей		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.
		Технологии пра	вки
16	С.П. Буркин,	РΦ,	Установка для
	В.В. Трескин,	Патент № 2453613	электроконтактного нагрева
	А.В. Серебряков,		содержит трансформатор,
	А.В. Серебряков,		станину с продольными
	С.Г. Чикалов,		направляющими,
	С.А. Ладыгин,		закрепленные на станине
	С.Б. Прилуков,		неподвижные
	В.В. Мальцев,		токоподводящие контакты,
	В.С. Прибытков		подвижные контакты,
			установленные на суппорте
	РΦ,		продольного перемещения,
	27.01.2011г.,		гидроцилиндр перемещения
			подвижных контактов и
	Электро-		управляемый гидропривод.
	контактная		Между суппортом подвижных
	установка		контактов и гидроцилиндром
	термической		соосно с последним закреплен
	обработки и		на платформе пневмоцилиндр
	правки		плунжерного типа, плунжер
	растяжением		которого жестко соединен со
	труб, прутков и		штоком гидроцилиндра и
	профилей		имеет длину рабочего хода не
			менее величины теплового
			удлинения нагреваемых
			заготовок.

1	2	3	4
17	Дэвид.Дж.	PΦ, US,	Способ правки подвергнутой
	Брайан,	Патент № 2538467	дисперсионному твердению
			металлической заготовки,
	PΦ, US,		выбранной из одного из
	14.07.2011г.,		металла и сплава металла,
			включает нагрев подвергнутой
	Горячая правка		дисперсионному твердению
	растяжением		металлической заготовки до
	высокопрочного		температуры правки. В
	титанового		определенных вариантах
	сплава,		воплощения температура
	обработанного в		правки находится в диапазоне
	области		температур правки от 0,3
	альфа/бета-фаз		температуры плавления в
			градусах Кельвина
			подвергнутой
			дисперсионному твердению
			металлической заготовки до
			температуры на по меньшей
			мере 25°F (13,9°С) 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.

Таблица 1.2 – Оценка преимуществ и недостатков аналогов

	Показатели положител. эффекта	Аналоги														
№		A.c. Nº 617484	A.c. № 1018984	A.c. Nº 1294482	A.c. Nº 1344455	A.c. № 1407969	A.c. № 1708884	A.c. № 1788978	A.c. Nº 1786138	Патент № 2055911	Патент № 1792436	Патент № 2232198	Патент № 2217508	Патент № 2260628	Патент № 2254383	Патент № 2381281
		C	Обеспечивающее достижение цели предполагаемым путем													
1	Повышение стабильнос- ти размеров и форм	+1	+1	+2	+4	+1	+3	+2	+2	0	+1	+4	0	+5	+4	+5
2	Повышение качества после обра- ботки путем изменения конструкции установки	+4	+4	+3	+4	+2	0	+5	+5	0	+3	+4	0	+5	+4	+5
3	Повышение качества после обра- ботки путем предотвра- щения коро- бления	+5	+3	+2	+3	+5	+5	+3	+2	+3	+4	+3	+1	+5	+4	+5
			Улучшающие, полезные свойства объекта													
1	Долговеч- ность	+2	+3	+3	+4	+3	+3	+3	+2	+4	+5	+4	+4	+4	+4	+5
2	Технологич- ность	+3	+2	+3	+3	+3	+2	+3	+4	+4	+4	+4	+4	+4	+4	+5
		Ослабляющие, вредные свойства														
1	Сложность конструк- ции	-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 горячей правки растяжением

Горячая правка растяжением является эффективным технологическими способом формирования геометрии и физико-механических свойств маложестких осесимметричных деталей.

Применительно к технологии обработки маложестких деталей осесимметричной формы, заготовка для которых представляет стержень одного диаметра. Основными технологическими задачами при горячей правке растяжением 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 технологических напряжений в различных направлениях остаточных определять заготовки будет геометрические параметры В после операционный и в эксплуатационный периоды. Предельный перепад остаточных технологических напряжений, 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 остаточных технологических напряжений, а также допуск на диаметр при обеспечении заданной прямолинейности на этапе горячей правки растяжением.

Повышение точности и качества заготовок является необходимыми факторами повышения общей эффективности технологических процессов. Одним технологических способов обеспечения необходимых ИЗ конструктивных параметров и физико-механических свойств является использование горячей правки растяжением заготовки [2, 9], которое характеризуется одновременным приложением силового и температурного воздействий [20]. Нагружение может вестись путем растяжения, сжатия, кручения или при комбинированных нагрузках. Горячая правка растяжением 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, является комплексной операцией, Горячая формирует И набор которая геометрическую точность, И физико-Ha свойств. механических заготовительном этапе формируется прямолинейность оси заготовки, задается уровень и характер распределения остаточных технологических напряжений. 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 будут иметь разные значения по знаку. В дальнейшем, при снятии припуска, равновесное состояние нарушается при перераспределении напряжений, что ведет к короблению Предложенная [32] заготовки. В структура усовершенствованного процесса себя технологического включает В на начальном этапе термосиловую правку, а правка поверхностным пластическим деформированием является финишной операцией технологии, направленной на обеспечение размерной стабильности.

Изменение остаточных напряжений 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 горячие 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 массой

Одним из факторов, который влияет на результаты горячей правки растяжением, 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 горячая правка растяжением применяется к ступенчатому заготовкам, необходимо выравнивать рабочие напряжения 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 по различным участкам вала.



1 – заготовка; 2 – стапель; 3 – диски

Рисунок 1.8 – Схема стапеля для обработки ступенчатых валов

При горячей правке растяжением 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 горячей правки растяжением

Горячая правка растяжением 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:

$$\Delta l = \alpha_{cm}(T) \cdot T \cdot L_{cm} - \alpha_{\partial em}(T) \cdot T \cdot L_{\partial em}, \qquad (1.1)$$

где $\alpha_{cm}(T), \alpha_{dem}(T)$ – коэффициенты температурного расширения, м/°С;

T – рабочая температура, °С;

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

Время охлаждения вала:

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

где *F*_o – критерий Фурье;

d – диаметр вала, м;

 ρ – плотность материала, кг/м³;

- c коэффициент теплоемкости, кДж/(м³·°C);
- λ коэффициент теплопроводности материала, Bt/(м·°C).

Критерий Фурье:

$$F_o = \frac{d \cdot t}{\delta^2},\tag{1.3}$$

где *t* – время, с;

 δ – радиус длинномерного изделия.
Для стапеля относительные температуры:

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

где В – критерий Био.

Он равен:

$$B_i = \frac{\gamma \cdot \delta}{\lambda_{\text{ave}}},\tag{1.5}$$

где γ – коэффициент теплоотдачи от окружающей среды к поверхности тела стапеля, Bт/(м^{2.}°C);

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

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

$$P = E \cdot F \cdot \alpha \cdot \Delta T \,, \tag{1.7}$$

где Е – модуль упругости, МПа;

 α – коэффициент линейного расширения, м/°С;

 ΔT – изменение температуры, °С;

F – площадь поперечного сечения, м²;

 $\sigma(T)_{T}$ – температурно-зависимый предел текучести, МПа.

$$\Delta l = \alpha \cdot \Delta T \cdot l_{o}, \tag{1.8}$$

где Δl – удлинения заготовки, м
; $l_{\scriptscriptstyle o}$ – начальная длина заготовки, м.

$$\Delta l = \frac{P \cdot l_0}{EF},\tag{1.9}$$

где l_0/EF – коэффициент жесткости заготовки, Н/м.

1.5 Технологические способы горячей правки растяжением

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 меж уверенного 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 воздействиям на стапель (охлаждения), заготовку (нагрев) увеличивают диапазон величины деформации за счет дополнительных температурных составляющих Δ_t .

Нагружения заготовки при горячей правке растяжением может вестись и при комплексном нагружении, когда кроме осевой деформации создаются крутящие моменты. Задачей комплексного нагружения является повышение эффективности горячей правки растяжением 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:

$$\sigma_{i} = \Phi \varepsilon_{T} \sqrt{\varepsilon^{2} + 3\gamma^{2}} \ge \sigma_{T}, \qquad (1.10)$$

где σ_i – интенсивность напряжений;

 Φ – функция пластичности;

 ε_{τ} – 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 – стапель; 10 – нагреватель; 11 – керамическая оболочка; 12 – поворотная попра; 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 раздельных приводов для осевого деформирования и скручивания можно осуществлять сложные циклы обработки заготовки. Системы нагрева позволяет 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 горячей правке растяжением [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 горячей правки растяжением

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 горячая правка растяжением 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 горячей правки растяжением 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 горячей правки растяжением

Особенностью данной операции является необходимость учета значительных нагрузок, действующих В силовом контуре стапельфиксаторы-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 захватных элементов и заготовки



Рисунок 1.17 – Допустимые напряжения захватных 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. B 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. Ha втором этапе вычисляется геометрическая матрица жесткости конструкции, соответствующая ЭТИМ внутренним усилиям, затем находятся И 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 H, что на порядок больше нагрузок, возникающих при обработке, рисунок 1.21.



Рисунок 1.20 – Величина деформации стапеля от действия максимальной нагрузки



Рисунок 1.21 – Потеря устойчивости стапеля

1.7 Технические методы и способы контроля деформаций и напряжений при горячей правке растяжением

И способы контроля деформаций Оптические методы 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 недорогими) 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, 3Dинтерактивные 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 2Dизображениям 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 *Ĩ*

Рассматривая подмножество пикселей изображения, центрированных в интересующей точке $P(x_0, y_0)$, 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 и и вертикальное перемещение *v* которого определяются как

$$u = \widetilde{x}_0 - x_0,$$

$$v = \widetilde{y}_0 - y_0,$$
(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 Q(x, y) в эталонном подмножестве с соответствующей ей точкой $\tilde{Q}(\tilde{x}, \tilde{y})$ в деформированном подмножестве. Взаимосвязь местоположения этих двух точек может быть выражена разложением в ряд Тейлора

$$\widetilde{x} = u + \frac{\partial u}{\partial x} (x - x_0) + \frac{\partial u}{\partial y} (y - y_0) + \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} (x - x_0) (y - y_0) + ...,$$
(1.12)

$$\widetilde{y} = v + \frac{\partial v}{\partial x} (x - x_0) + \frac{\partial v}{\partial y} (y - y_0) + \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} (x - x_0) (y - y_0) + ...,$$
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 х и у.

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 $\widetilde{\mathbf{Q}}(\tilde{x}, \tilde{y})$.

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

– Величина различий в интенсивности:

$$C\left\{u, v, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}\right\} = 1 - \sum_{i=-m}^{m} \sum_{j=-n}^{n} \left| \widetilde{I}\left(\widetilde{x}_{i}, \widetilde{y}_{j}\right) - I(x_{i}, y_{j}) \right|$$
(1.13)

- Сумма квадратов разности интенсивностей:

$$C\left\{u, v, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}\right\} = 1 - \sum_{i=-m}^{m} \sum_{j=-n}^{n} \left[\widetilde{I}\left(\widetilde{x}_{i}, \widetilde{y}_{j}\right) - I(x_{i}, y_{j})\right]^{2}$$
(1.14)

– Перекрестная корреляция:

$$C\left\{u, v, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}\right\} = \sum_{i=-m}^{m} \sum_{j=-n}^{n} \widetilde{I}(\widetilde{x}_{i}, \widetilde{y}_{j})I(x_{i}, y_{j})$$
(1.15)

– Нормализованная взаимная корреляция:

$$C\left\{u, v, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}\right\} = \frac{\sum_{i=-m}^{m} \sum_{j=-n}^{n} \widetilde{I}(\widetilde{x}_{i}, \widetilde{y}_{j})I(x_{i}, y_{j})}{\sqrt{\sum_{i=-m}^{m} \sum_{j=-n}^{n} \left[\widetilde{I}(\widetilde{x}_{i}, \widetilde{y}_{j})\right]^{2}} \sqrt{\sum_{i=-m}^{m} \sum_{j=-n}^{n} \left[I(x_{i}, y_{j})\right]^{2}}$$
(1.16)

где целые числа *m* и *n* определяют (2*m*+1)х(2*n*+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 значениям ПО интенсивности окружающих ее точек пикселей. Был использован широкий спектр билинейные, интерполяционных функций, включая 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 стереозрении, при условии, камеры были В что 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,

$$\begin{cases} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{cases} = R \begin{cases} X \\ Y \\ Z \end{cases} + T$$
 (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,

$$\begin{cases} x_{I(ideal)} \\ y_{I(ideal)} \\ 1 \end{cases} = \frac{1}{Z_c} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix}$$
(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].

$$\begin{aligned} x_{I(dist)} &= \left[1 + k (x_{I(ideal)}^2 + y_{I(ideal)}^2) \right] x_{I(ideal)}, \\ y_{I(dist)} &= \left[1 + k (x_{I(ideal)}^2 + y_{I(ideal)}^2) \right] y_{I(ideal)}, \end{aligned}$$
(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 т представлена в координате цифрового изображения следующим образом

$$\begin{cases} x \\ y \\ 1 \end{cases} = \begin{bmatrix} 1/s_x & 0 & c_x \\ 0 & 1/s_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{cases} x_{I(dist)} \\ y_{I(dist)} \\ 1 \end{cases}$$
 (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 **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 **M** в точку **m** изображения становится линейным. Уравнения (1.17)-(1.20), таким образом, могут быть объединены в виде,

$$m = K[R|T]M \tag{1.21}$$

где

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

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

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

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

$$\lambda \begin{cases} x \\ y \\ 1 \end{cases} = K \begin{bmatrix} R_1 & R_2 & T \end{bmatrix} \begin{cases} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = H \begin{cases} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}$$
(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],

$$H = \arg\min\sum_{q=1}^{N_q} \sum_{r=1}^{N_r} \left\| m^{(q,r)} - \widetilde{m}^{(q,r)} H \right\|^2$$
(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_{*a*} – количество изображений;

*N*_{*r*} – количество выбранных углов.

Затем можно использовать матрицу Н для расчета всех внутренних и внешних параметров [175]. Эти оценочные параметры вместе с объектива коэффициентом дисторсии оптимизируются затем 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

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

где *М* – 3D-координата, которую необходимо найти;

2;

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

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

Ф – 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). Синнергрен и Сьедаль [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 3D DIC обычно обладает более тестировании, гораздо низкой чувствительностью измерений. Это было показано экспериментальным сравнением, проведенным в Dantec Dynamics GmbH [75].

Выводы по главе 1

В первой главе рассмотрены сущность и особенности одного из ключевых этапов изготовления маложестких осесимметричных деталей типа «вал» - заготовительного и необходимость применения методов правки.

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

На основе проведенного анализа обоснована схема горячей правки растяжением. 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.

Приведены примеры конструкторских расчетов технологического оснащения для реализации предложенных методов обработки.

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

2.1 Базовые формулы для расчета деформаций и напряжений при горячей правке растяжением

Базовая формула расчета напряжений и деформаций:

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

где Е – модуль упругости, Па;

є – относительная деформация, %.

Если при горячей правке растяжением используется нагрев, удлинение вала:

$$\Delta l_{\Sigma} = \Delta l_{\rm HK} + \Delta l_{\rm T} + \Delta l_{\varepsilon} , \qquad (2.2)$$

где $\Delta l_{\rm hk}$ – удлинение заготовки, необходимое для компенсации

исходного коробления вала;

 $\Delta l_{\rm T}$ – удлинение из-за температурного расширения;

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

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 горячей правке растяжением для стапеля 1 и заготовки 2

При растяжении:

$$\sigma_{\rm p} = \left(l_{\rm CT} \alpha_{\rm CT} \Delta T_{\rm CT} - l_{\rm B} \alpha_{\rm B} \Delta T_{\rm B} \right) E k / \left(l_{\rm B} F_{\rm B} \right), \qquad (2.3)$$

где $\alpha_{\rm ct}, \alpha_{\rm B}$ – коэффициент термического расширения стапеля и вала;

 $\Delta T_{_{CT}}$, $\Delta T_{_B}$ – разность температур охлаждения стапеля и вала от

исходной рабочей температуры термообработки;

 $l_{\rm ct}, l_{\rm b}$ – длина стапеля и вала;

*F*_в – площадь сечения вала.

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

$$\alpha_{\rm T} = \alpha(T^{\circ}) + \Delta T d\alpha / dT , \qquad (2.4)$$

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:

$$\mathcal{E}_{\Sigma} = \mathcal{E}_{v} + \mathcal{E}_{nn} + \mathcal{E}_{T}, \qquad (2.5)$$

где *є*_у – упругая деформация;

*Е*_{пл} – пластическая деформация;

 \mathcal{E}_T – температурная деформация.

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

$$\sigma_{\rm opt} = E(T)\varepsilon_{\rm s}, \qquad (2.6)$$

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. Описания 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	$\begin{bmatrix} & & \\ & & & \\ & & \\ & & \\ & & \\ & & \\ & & \\ & & \\ & & \\ & & \\ & & \\ & & \\ & & \\ & & \\ & & \\ & & & \\ & & \\ & & \\ & & & \\ & & \\ & & \\ & & \\ & & & \\ & & \\ & & & \\ & & \\ & & & \\ & & \\ & $	$\sigma = E\varepsilon + \beta \dot{\varepsilon}$
Фойхта	$\int_{\sigma}^{\beta} E$	$\dot{\varepsilon} = \sigma / \beta + \dot{\sigma} / E$
Кельвина	$\begin{bmatrix} T \\ E_2 & \beta \end{bmatrix}$	$E_2 \dot{\varepsilon} + \beta \dot{\varepsilon} = \left(1 + \frac{E_2}{E_1}\right) \sigma + \frac{\beta}{E_1} \dot{\sigma}$
Сен-Венана	$\begin{bmatrix} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\$	$\sigma = \varepsilon E$ при $\sigma < \sigma_{\rm T}$ $\sigma_{\rm T} = \sigma_{\rm beax}$ при $\sigma \ge \sigma_{\rm T}$

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 вней 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 пости в 2 раза [13, 14, 15].



Рисунок 2.3 – Температурные зависимости предела текучести

Для горячей правки растяжением 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:

$$\Delta y = y_{CT} - y_{3A\Gamma}, \qquad (2.7)$$

За счет этой деформации возникает рабочее усилие:

$$F_{y\pi\pi} = K \cdot \Delta y, \qquad (2.8)$$

где *К* – приведенный коэффициент жесткости силового контура стапеля, Н\м.

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

$$F_{_{\mathcal{Y}\mathcal{I}\mathcal{I}}} = K \cdot \Delta y \text{ при } L \cdot \Delta \varepsilon \ge \delta_{_{0}},$$

$$F_{_{\mathcal{Y}\mathcal{I}\mathcal{I}}} = 0 \text{ при } L \cdot \Delta \varepsilon < \delta_{_{0}},$$
(2.9)

где δ_0 – температурный зазор.

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 упруговязкопластичного 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 горячей правке растяжением, а также на начальной стадии нагрева-нагружения заготовки в стапеле, где скорости нагрева и, соответственно, нагружения малы, напряжения мало зависят от скорости деформации:

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

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

где V_г – интенсивность скоростей пластической деформации;

G – модуль сдвига;

є – полная деформация;
ε_{τ} –пластическая деформация;

т-безразмерный предел текучести;

 $f(\tau)$ – плотность вероятностного распределения предела текучести;

 $\dot{\varepsilon}_{\tau}$ – скорость пластической деформации.

Полная деформация:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{\tau}(t) + \varepsilon_{y}(t), \qquad (2.12)$$

где ε_v – упругая деформация.

Интенсивность скоростей пластической деформации при растяжении равна:

$$V_{\tau} = \frac{2}{3}(1+\mu)^2 \cdot \dot{\varepsilon}_{\tau_1}, \qquad (2.13)$$

где $\dot{\varepsilon}_{r_1}$ – скорость пластической деформации в осевом направлении;

µ – коэффициент Пуассона.

При растяжении поперечные деформации:

$$\dot{\varepsilon}_{\tau^2} = \dot{\varepsilon}_{\tau^3} = -\mu \cdot \dot{\varepsilon}_{\tau^1}, \qquad (2.14)$$

где $\dot{\varepsilon}_{r_2}, \dot{\varepsilon}_{r_3}$ – скорость пластической деформации в поперечных направлениях.

Расчет ведется в относительных, безразмерных параметрах. Поэтому:

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

где т-безразмерный предел текучести;

 σ_{Ti} – предел текучести;

G – модуль сдвига;

 E_{y} – модуль упругости.

Для учета эффекта упрочнения q, условие (2) переписывается в виде:

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

В нем показатель упрочнения:

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

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:

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



Рисунок 2.8 – Блок моделирования уравнения (45)



Рисунок 2.9 – Блок моделирования интенсивности пластической деформации

Интенсивность упругой деформации:

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

где:

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

Для интенсивности напряжений:

$$\sigma_{u} = \frac{\sqrt{6}}{3} (1+\mu)^{2} \sigma_{1}, \qquad (2.21)$$

которая определяется из опытов на растяжение.



Рисунок 2.10 – Блок моделирования упрочнения



Рисунок 2.11 – Блок моделирования пластической деформации



Рисунок 2.12 – Реологическая цепочка моделирования деформации распределенной системы

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:

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

где λ – время релаксации;

p – оператор Лапласа.

Время релаксации:

$$\lambda = \mu/G \,, \tag{2.23}$$

где *µ*-коэффициент вязкости материала.



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.



Рисунок 2.15 – Результаты моделирования без учета связывающих звеньев





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

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

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

где *Т*_{ПЛ} – температура плавления материала;

E(0) – значения модуля при нулевом напряжении;

*T*₀ – начальная температура;

Т – рабочая температура;

Модуль нулевого напряжения:

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

где E_0 – модуль упругости при температуре $T_0 = 20^{\circ}$ C.

Зависимость предела текучести от температуры:

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

где $\sigma_{_{T0}}$ – предел текучести при 20° С, МПа.





 $a - 40X; \, 6 - 12X18H10T$

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



 $1 - 20^{\circ}C; 2 - 700^{\circ}C$

Рисунок 2.18 – Кривые упрочнения (12Х18Н10Т)



1 – с учетом упрочнения; 2 – без учета упрочнения

Рисунок 2.19 – Кривые упрочнения при 20⁰ С (12Х18Н10Т):

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

Процесс релаксации:

$$\sigma(t) = E_{T} \varepsilon_{\Sigma} \left[1 - \int_{0}^{t} T(\tau) d\tau \right], \qquad (2.28)$$

где E_T – модуль упругости при температуре выстоя, МПа;

 \mathcal{E}_{Σ} – начальная суммарная деформация в начале второго этапа;

 $T(\tau)$ – ядро уравнения Вольтерры.

Последнее можно представить в виде ядра Ржаницина:

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

где *А* – коэффициент;

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



Рисунок 2.20 – Процесс релаксации на выстое

На третьем этапе горячей правки растяжением 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 2.22 – Результаты моделирования *є-t* на третьем этапе

Выводы по главе 2

Во второй главе рассматриваются вопросы моделирования процесса горячей правки растяжением на основе реологических моделей.

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

83

растяжением, 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.

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

3.1 Растяжение образцов с контролем деформации оптическим способом

Для апробации предложенного способа оптического контроля деформации цилиндрического образца при растяжении во время горячей правки растяжением 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 горячей правки растяжением (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 используется цифровая камера Basler acA1440-73, 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

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



а

б



Рисунок 3.6 – Распределение нагрева по длине образца и по времени

Контрольный замер температуры образца при помощи пирометра давал максимальную температуру нагрева образца 210°С. 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°С. 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 выдвижения 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 ШЩ). 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.

90

Участок	Диаметр до, мм	Диаметр после, мм	Расстояние между рисками	Оценка изменения расстояния по калибровке
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

Таблица 3.1 – Результаты замеров изменений параметров образцов



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 ШЩ). 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	Оценка расстояния по калибровке
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 3.10 – 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 горячей правке растяжением.



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



SIGMA

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

Результаты расчета данных, полученных съемкой с телефона, представлены на рисунках 3.19-3.20. Как видно из графиков при более затемненной съемке образца с темным спеклом, результат расчета получается более зашумленным.



Рисунок 3.19 – Результаты расчета продольных смещений по контрольным точкам, указанным в области анализа



Рисунок 3.20 – Результаты расчета продольных деформаций по контрольным точкам, указанным в области анализа

На рисунках 3.21-3.22 представлена фиксация изображений образцов для определения расстояния между рисками. Для приведения изображений к масштабу использовались мерительные угольники.



Рисунок 3.21 – Образец_1 после обработки (1)



Рисунок 3.22 – Измерение риски с использованием Image Viewer



Рисунок 3.23 – 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 3.24.



Рисунок 3.24 – 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.

Номер кадра	Поле смещения по вертикали		Поле осевой деформации	
204	(* 2	- 3.0e-02 - 0.02 - 0.01 - 0.01 - 0 4.8e-03 10 20 20 3.2e+01	Č.	- 3.0e-02 - 0.025 - 0.02 - 0.015 - 0.01 - 0.01 - 0.005 - 0 4.8e-03
График осевой		0.013		
деформации		0.012- 0.011-		
		0.01- 0.009-	1	
		0.008-		
		0.007-		
		0.005- 0.004-		
		0.003- 0.002- 0.001- 0- -0.001- -0.002- 0 200 400	800 1000 120	
212			- 3.0e-02	
			- 0.025	
			- 0.02	
			_ 0.015 z	
			STRAIL	
			01 0	
			- 0.005	
		r	-0	
		2	4.8e-03	

Таблица 3.3 – Результаты расчета
























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 3.25 и 3.26. 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 – образец №1; б – образец №2

Рисунок 3.25 – 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 3.27 и 3.28.

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



Рисунок 3.26 – Разность соседних значений для отсчетов с шагом 50 (500 мс)



Рисунок 3.27 – Распознавание по этапам нагружения параметров силового отсчета, взятого с шагом 10 (100 мс)



Рисунок 3.28 – Распознавание по этапам нагружения параметров силового отсчета, взятого с шагом 50 (500 мс)

На рисунке 3.29, 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 контру образца в начальном и конечном состоянии (черно-белое изображение). Из-за плохого контраста контур может выделился с погрешностью, но по замерам можно определить относительную величину изменения размера – диаметра (0,25%).



Рисунок 3.29 – Измерение рисок в рабочей зоне деформирования на образце

Выводы по главе 3

Разработана установка и методика регистрации деформаций по поверхности образца на основе цифровой корреляции изображений. Использование методов оптического контроля обеспечивает наглядную визуализацию процессов деформации, протекающих в процессе нагружения. Использование предложенной методики цифровой корреляции изображений 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.

Описана методика сегментирования изображения заготовки для получения ее контуров. Дополнительно используется метода 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 ГОРЯЧЕЙ ПРАВКИ РАСТЯЖЕНИЕМ НА ДЕФОРМАЦИЮ ЗАГОТОВОК

4.1 Технологические факторы влияющие на выбор параметров горячей правки растяжением

К входным параметрам горячей правки растяжением 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 горячей правки растяжением 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 горячей правки растяжением 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 горячей правки растяжением осевая деформация протекает неравномерно вдоль оси заготовки. Основной технологический параметр при этом – деформация, контроль которой является ключевым фактором, обеспечивающим эффективность горячей правки растяжением. Для обеспечения геометрическая стабильность 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 каком этапе 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 того или иного этапа кривой пластического течения при различных параметрах нагружения, включая температуру. Для повышения надежности определения фактической деформации в производственных условиях необходимо

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

4.2 Обоснование выбора режимов горячей правки растяжением 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 горячей правки растяжением [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 горячей правке растяжением.

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 В деформаций материала. [58] приводится пример контроля с ee видеофиксации на этапе образования шейки использованием 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 горячей правки растяжением 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. Использования 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 горячей правки растяжением с точки зрения мезомеханики

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

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

Критерий локальности *L*_{ср} первого типа:

$$L_{cp} = \frac{\mathcal{E}_{i\max}}{\mathcal{E}_{cp}},\tag{4.1}$$

где \mathcal{E}_{cp} – средняя деформация по образцу;

*є*_{*i*max} – относительное удлинение локального участка с максимальной деформацией.

Критерий локальности второго типа L_{max} определяли по формуле:

$$L_{\max} = \frac{\varepsilon_{i\max}}{\varepsilon_{i\min}}, \qquad (4.2)$$

где $\varepsilon_{i\min}$ – относительное удлинение локального участка с минимальной деформацией.

Выбор длины участка определяется длиной волны, равной пятой или шестой гармоники 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 полочки и участков упрочнения. Процесс усложняется при

изменении температуры в процессе самого деформирования, рисунок 4.1 [107].

На кривой, рисунок 4.2 выделены участки:

 линейный участок с полочкой 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].





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



Рисунок 4.2 – Зависимость деформация-напряжение для сплава 12X18H10T при 300°С 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 структурных и масштабных уровнях материала, различных которые объемы формируют чередующиеся деформированного И недеформированного материала. Связь между видом материала, его структурой, вплоть до дислокационной системы деформируемого тела и автоволн параметрами 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

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

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

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 легкого линейного стадии скольжения И деформационного упрочнения, $n \approx 1/2$ параболического на стадии упрочнения и $0 \le n \le 1/2$.

Каждой стадии соответствует определенный паттери 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 2-3-x 5-10-ти). Ha (от ДО стадии параболического концу стадии 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 что коэффициент локальности при растяжении паттерна. Очевидно, 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.

особенностей Исследование закономерностей технологических локализации пластического течения необходимо для оценки последующей обработку, неравномерности распределения припуска под 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 деформаций, упругопластических ИХ интенсивностей, случайных коэффициентов Надаи-Лоде. Bce перечисленные работы имеют материаловедческий аспект, проводится на плоских образцах с ограниченной длиной деформируемой части. Локализация пластических деформаций обобщаясь рассматривается на мезоскопическом уровне, редко 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 горячей ИХ контроля при правке растяжением 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 горячей правки растяжением, в первую

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

Для оценки эффективности горячей правки растяжением 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 12Х18Н10Т на установке для горячей правки растяжением. 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 $60\pm0,01$ 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°C. Далее растяжение с различной скоростью нагружения (4, 6, 8 единиц) и величиной деформации с последующим охлаждением до *T*=20°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 ±0,01 мм. Образцы маркируются.

Для оценки равномерности пластической деформации по длине образца сделаны риски с шагом 5±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 *є* по уровням 0,8%, 2%, 4%, 6%.

Скорость деформации $\dot{\mathcal{E}} = 1.10^{-3} \dots 1.10^{-5} \text{ C}^{-1}$,

Материал – сталь 12Х18Н10Т и сталь 45.

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. Этапы 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 этап (точки 1-2) – площадка текучести – 0-0,3%;

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

3 этап (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 12Х18Н10Т, которая относится к разряду жаропрочных нержавеющих сталей аустенитного класса, необходимо учесть следующие факторы.

Сталь 12Х18Н10Т в диапазоне температур 200...600°С показывает падающую зависимость пределов прочности и пластичности.

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

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

Горячую правку растяжением 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 *є*=10%) и температурой нагрева выше 200°С. Это позволит избежать увеличения объема заготовки, повышения технологических напряжений, и в конечном итоге, к короблению.

При небольших степенях деформации горячая правка растяжением повышает длительную прочность, а при высоких степенях деформации положительное влияние на физико-механические свойства не обнаруживается. Наклеп растяжением 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 этапы.

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

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

Ш этап – участок параболического упрочнения, на котором происходит формирование эквидистантных очагов локальной деформации.

На рисунке 4.3 приведены графики экспериментальных кривых деформация-напряжения для сплава 12X18Н10Т для различных температур с Они указанными стадиями пластического течения. соответствуют изменению показателя параболичности *n* в дискретному 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-напряжение сплава 12X18H10T

Проводить экспериментальные исследования определению ПО зависимостей напряжения-деформации при различных температурах трудоемко. Для определения стадии пластического течения по положению фактической пластической деформации величины относительно контрольных точек, которые определяют границы этапов 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 12Х18Н10Т после закалки с 1080°С на воздухе

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

При растяжении образцов при температурах 200°С, 400°С, 600°С мартенсит из аустенита не образуется. Таким образом, проведение горячей правки растяжением при температурах 200°С 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 усилии текучести (P_T) от температуры.



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

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

4.6 Результаты исследований горячей правки растяжением

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 р-значения. Дополнительную оценку дают среднее значение *є*, 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 горячей правки растяжением с точки зрения равномерности проработки заготовки по длине.



Рисунок 4.6 – Зависимость удлинения при Р_Т от температуры

Для этапов пластического течения для сплава 12Х18Н10Т 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 <i>є</i>	$\sigma_{arepsilon}$	IQR	Асимметрия	Эксцесс	р-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 – I стадия пластического течения; б – III стадия пластического течения

Рисунок 4.7 – Распределение деформаций по контрольным участкам



а – на первой стадии пластического течения
(деформация третьего образца – плотность распределения деформаций);
б – на третьей 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 – по температуре; б – по скорости деформирования

Рисунок 4.9 – Группирование параметров в координатах деформациякоэффициент локальности для 12X18H10T

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-Уолесса, который показал статистически значимую разницу.



а – первого типа; б – второго типа
1 – полочка 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 горячей правки растяжением 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 первого этапа характерно наличием всплеска, что связано с формированием полосы Людерса. В целом стабильное по квадратичному отклонению и по коэффициентам локальности, уступает в равномерности распределению деформаций образца, оно соответствующего третьему этапу обработки – участку параболического упрочнения. На этом этапе 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 второго этапа характеристики уступают первому и третьему участкам. Такая оценка характерна для всех образцов. Это может быть связано с особенностями локализации деформации по этапам пластического течения. Второй этап линейного упрочнения отличается образованием новых фронтов пластического течения с одного для первого этапа до 5-10 в конце второго. За счет них на третьем этапе происходит выравнивание деформаций по длине. Обработка с минимальной величиной деформации в пределах первого этапа не эффективная в плане проработки всего объема заготовки, устранения кривизны исходной заготовки, выравнивания напряжений по сечениям.

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

Диаграмма на рисунке 4.11 показывает величину накопленных отклонений деформаций $\sum \Delta e$ от среднего значения e_{cp} по участкам по всем

образцам, которые находились на II этапе пластического течения (формирование нескольких нестационарных фронтов волн пластической деформации).



Рисунок 4.11 – Результаты моделирования зависимости напряжениядеформации для стали 12Х18Н10Т при температурах 20, 300, 500 и 700°С



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 этапы) 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 этапам, рисунок 4.14 и по укрупненным участкам образцов, рисунок 4.15.

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

иир		Участки																
CT8	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 – І стадия; б – ІІ стадия линейного упрочнения;в – ІІІ стадия параболического упрочнения

Рисунок 4.13 – Диаграмма размаха деформаций по участкам


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



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 4.17 – 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 этапов 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 стадии (от 2-3-х до 5-10-ти). Ha стадии параболического концу деформационного упрочнения происходит формирование стационарной системы очагов деформации. До стадии пред разрушения, где происходит слияние очагов деформации с образованием шейки, при горячей правке растяжением 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 этапы 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 III этапе кривой пластического течения (этап параболического упрочнения) [22].

Для исключения ошибки по определению стадии кривой пластического течения, на которой находится образец в течении горячей правки растяжением, 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*:

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

где *α* – масштабный коэффициент;

L₀ – минимальный размер образца, в котором возможно возникновение локализации пластического течения.

С учетом размеров образцов (1200 мм) длина волны составляет порядка 32 мм. Длина контрольных участков соответствует двум длинам волн (~60 мм).

Выводы по главе 4

Для оценки степени неравномерности деформаций по длине в рамках горячей правки растяжением предлагается комплексная методика, которая включает в себя определение коэффициентов локальности двух типов, накопленную разность деформаций по соседним участкам в абсолютном выражении и среднеквадратичную сумму, а также построение и оценка распределения деформаций ПО участкам. гистограмм При анализе экспериментальных данных оценки равномерности деформаций определены для образцов и сгруппированы в соответствии со стадиями пластического течения, до которых деформировали соответствующие образцы. Данным, четко выделенным стадиям полочки текучести или легкого течения, линейного упрочнения и параболического упрочнения, отвечают различные картины распределения пластических деформаций, что и показывают предлагаемые оценки. Поэтому при выборе величины деформации при горячей правке растяжением с учетом температуры нагрева необходимо гарантировано попадать в зону третьей стадии пластического течения. Технология горячей правки растяжением имеет особенность температурного режима, которая заключается в том, что за полный цикл обработки она изменяется от начальной до рабочей и обратно. При этом сопровождается

одновременными силовыми воздействиями на материал заготовки за пределами текучести. На второй стадии – выстое, процесс активного нагружения заменяется на процесс ползучести. Характер распределения картин локализованной пластичности будет усложняться из-за температурного смещения кривых пластического течения и сменой этапов 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 горячей правки растяжением 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 напряжений. Для длинномерных заготовок распределение деформаций в осевом направлении по отдельным участкам по длине вала отличается нестабильностью, которая связана с исходной неоднородностью свойств материала, неравномерным нагревом. Рассматривается методика оценки локализации деформаций, которая обеспечивает комплексную оценку равномерности растяжения по длине. Доказывается влияние автоволнового характера пластического течения на локализацию деформаций при высокотемпературном растяжении заготовок из сплава 12Х18Н10Т.

Очевидно, что коэффициент локальности при растяжении цилиндрических образцов, кроме влияния погрешностей диаметральных размеров, исходной кривизны, неоднородности свойств материала, их размеров, будет определяться стадией деформационного упрочнения, до которой дошло в каждом из циклов обработки. При этом для определения стадии пластического течения необходимо учитывать, нагрев заготовок и температурное влияние на кривую упрочнения.

Участки, где величина деформации, соответствует этапу пластического течения, до которого они были растянуты, расположены по всей длине образцов и не зависят от накопленной величины отклонения деформации участка от средней деформации. Равномерность по длине обеспечивается при выходе на параболический участок 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. Контроль деформации заготовки бесконтактным способом возможен при условии выбора длины участка не менее двух длин волн, что обеспечит при проведении горячей правки растяжением выход в рабочий диапазон деформаций с формированием максимально равномерного распределения деформаций по длине.

Анализ существующих способов и устройств для горячей правки растяжением показал или отсутствие контроля процесса формирования пластических деформаций В режиме реального времени или его неэффективность из-за сложности реализации традиционными методами. Проведена статистическая оценка возможности прогнозирования стадии кривой пластического течения при нагружении всего образца по величине деформации Это необходимо отдельного участка заготовки. ДЛЯ гарантированного выхода на стадию кривой пластического течения, при которой формируется максимальное количество установившихся очагов пластической деформации, при котором обеспечивается ее максимальная равномерность. Данным этапом является этап параболического упрочнения с формированием максимального количества стационарных очагов локализованной пластичности.

ГЛАВА 5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕЙ ПРАВКИ РАСТЯЖЕНИЕМ 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 Ho моделей базовыми. корреляционных являются использование современных подходов в определении структуры данных моделей, расчете их обеспечивают эффективное коэффициентов 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 кластеризации. Отдельным понимания с использованием методов 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 температурно-скоростной определенные величины напряжений по Зенера-Холломана зависимости С результатами моделирования с использованием нейронных сетей с обратным распространением сигнала. Во второй статье коэффициенты аналитической модели определяли в ходе генетической Использовались оптимизации. 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 обеспечением условия С минимизации расхождения экспериментальных теоретических Из-за значительной И данных. нелинейности зависимости деформация-напряжения и сложных скоростных взаимосвязей И температурных используются различные методы, обеспечивающие максимальную сходимость экспериментальных И теоретических данных, полученных в ходе моделирования МКЭ. В работе [81] используется автоматический алгоритм идентификации реологических параметров точной оценкой матрицы с 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°С) 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 АА5182-О с учетом направления деформирования в широком скоростном диапазоне 0,001 до 1000 с⁻¹. Для аналитического описания процесса деформирования использовались уравнения состояния Джонсона-Хана-Хуанга-Лианга Кука (Johnson-Cook), (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 другая _ Байесовской регуляризацией. Из алгоритмом Маркварта, 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 начинались 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 двух типов материалов: углеродистой стали и коррозионностойкого сплава в условиях повышенной температуры. Моделирование проводится для определения напряжений в зависимости от значений входных параметров, величина деформации, которыми являются скорость деформации И температура. Входными параметрами управляют в ходе выполнения горячей правки растяжением. 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 этапа 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 этапах пластического течения. Автоматическое группирование соответствующих деформационных параметров в зависимости от этапа 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 12Х18Н10Т. Входом были величина и скорость деформации, а также температура, выходом – коэффициент локальности первого рода.

Коэффициент локальности:

$$K_{\Delta l} = \frac{l_{\max}}{l_{\min}} \ge 1, \tag{5.1}$$

где *l_{max}* – максимальное удлинение участка образца;

l_{min} – минимальное удлинение участка образца.

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 1	12X18H10T
---	-----------

<i>T</i> , °C	<i>V</i> , ед.	3	$K_{\Delta l}$
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: Т – т	семпература печи; V – скор	ость деформации; є – дефор	мация; $K_{\Delta l}$ – 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.

<i>T</i> , °C	<i>V</i> , ед.	З	$K_{\Delta l}$
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: Т – т	гемпература печи; V – скоро	ость деформации; є – дефор	мация; $K_{\Delta l}$ – коэффициент
локальности			

Таблица 5.2 – Данные по локальности деформации для стали 35

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 – три треугольных функции; б – четыре Гауссовы функции
 Рисунок 5.3 – Варианты выбора функций принадлежности

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

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

$$j = \overline{1, m},$$
(5.2)

где $b_{i,j}$ – коэффициенты;

т – количество функций принадлежности.

Вывод *d_i* базы нечеткого вывода является линейной функцией:

$$\mathbf{Y}_{j} = b_{j,0} + \sum_{i=1}^{n} b_{j,i} \cdot x_{i}, \qquad (5.3)$$

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_i – вывод модели.

Таблица 5.3 – Модель для оценки обработки на основе алгоритма Сугэно

<i>x</i> 1	<i>X</i> 2	 χ_i	Уn
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.



Рисунок 5.4 – Лингвистические правила вывода для стали 35



Рисунок 5.5 – Графические правила вывода для стали 35



а – деформация-температура; б – скорость-деформация; в – скорость-температура
 Рисунок 5.6 – Поверхности вывода коэффициента локальности для стали 35 в системе координат



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

Рисунок 5.7 – Поверхности вывода коэффициента локальности для 12X18H10T в системе координат

Обучение системы для материала 12X18H10T проходит аналогично вышеописанному алгоритму.

Результаты моделирования показаны в виде двух параметрических трехмерных поверхностей представленых 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 12Х18Н10Т. 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 12Х18Н10Т. Средняя ошибка 1,3

Для модели (четыре функции принадлежности по каждому входу) для стали 35 тестированной по сплаву 12Х18Н10Т, 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 12Х18Н10Т – 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 горячей правке растяжением 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 горячей правки растяжением, 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 входвыход, 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 последовательностидеформации

Тип сети	Задача	Структурная схема
NARX	Предсказать $y(t)$ по d прошлым отсчетам $y(t)$ и другому ряду x(t)	x(t) Hidden Layer with Delays 0utput Layer y(t) 1 y(t) 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
NAR	Прогноз у(t) по <i>d</i> прошлым отсчетам у(t)	Hidden Layer with Delays y(t) 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
Нелинейный вход-выход	Предсказать <i>y</i> (<i>t</i>) по <i>d</i> прошлым другого ряда <i>x</i> (<i>t</i>)	Hidden Layer with Delays x(t) 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 utput Layer y(t) 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

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).

Тип сети	Формула	Средняя квадратичная ошибка	Точность						
NARX	$(\alpha(t, 1), \alpha(t, d))$	1,11.10-5	0,99995						
	$y(t) = f \begin{pmatrix} x(t-1), \dots x(t-d), \\ \dots (t-1), \dots x(t-d) \end{pmatrix}$	$1,51 \cdot 10^{-5}$	0,99992						
	(y(t-1),, y(t-a))	8,7·10 ⁻⁶	0,99989						
NAR		8,5.10-6	0,99995						
	y(t) = f(y(t-1),, y(t-d))	1,4.10-5	0,99992						
		2,5.10-5	0,99999						
Нелинейный		2,78.10-5	0,99986						
вход-выход	$y(t) = f(x(t-1), \dots x(t-d))$	3,3.10-5	0,99983						
		3,05.10-5	0,99984						
Примечани	Примечание: В таблице 11 в колонках: средняя квадратичная ошибка и размах указаны данные по								
строкам для трениро	овочной, валидационной и тестовой выборок								

Таблица 5.5 – Результаты прогнозирования

Представлены результаты моделирования коэффициента локальности от технологических входных параметров горячей правки растяжением. 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 5.13 – Регрессионный график по стали 35

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 12X18H10T, на рисунке 5.14 и 5.15.



Рисунок 5.14 – Регрессионный график по сплаву 12Х19Н10Т

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 12Х19Н10Т

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.





б



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 _{тренир.}	R _{валид.}	R _{тест.}	R _{сум.}	Алгоритм обучения	Функция преобразования
0,063	0,92	0,90	0,74	0,89	Левенберг	logsig
					Обратного	logsig
-0,00281	0,85	85 0,96	0,96	0,88	распространения	
					сигнала	
			3 ву	кода		
-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	logsig
_	_	—	—	—	распространения	
					сигнала	

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 существенного не сказывается, а смена алгоритма обучения при проведении максимального количества итераций – 1000, не дало положительного результата [37].

5.4 Кластеризация деформационных параметров при горячей правке растяжением

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 заданный этап.

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:

$$Z_i = \frac{x_i - x}{\sigma_i},\tag{5.4}$$

где *x*_{*i*} – нормируемых параметр;

 \bar{x} – среднее значение параметра;

 σ_i – квадратичное отклонение, мм.

Таблица 5.7 – Параметры горячей правки растяжением с использованием установки

С	Дефор	мация	1/c	Показан	иометра	c J	Коэффициент локальност		
Температура нагрева T,\circ	от нагрузки	общая	Скорость нагружения, мм	после нагружения, Н	после выдержки 30 мин, Н	после охлаждения до 20, Н	Средняя деформация ес	L1=max/cp	L2=max/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

F	Vmm	LMAXR	LCPR	Δe_R	<i>e</i> _{minR}	D/ecp-emin	D_{ecp -emin	Summa	IQR	skewness	kurtosis	p-value
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 5.8 – Ненормированные данные измерений	

F	Vmm	Lmaxr	LCPR	∆e _R	<i>e</i> _{minR}	D/ecp-emin	Decp-emin	Summa	IQR	skewness	kurtosis	p-value
-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

Таблица 5.9 – Нормированные данные

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.

	ш	Vmm	LMAXR	LCPR	deltaeR	eminR	D.ecp.em	Decp.em	summa	<u>I</u> QR	skewnes	kurtosis	p.value		
F	t	-0.2	0	0.49	0.71	0.62	0.75	0.09	0.31	0.47	-0.17	0.31	0.07		- 1
Vmm	-0.2	1	0.18	0.6	-0.35	-0.59	0.02	0.54	0.15	0.09	0.36	-0.46	0.09	-	- 0.8
LMAXR	0	0.18	1	0.55	0.19	-0.4	0.11	0.19	0.2	0.23	0.14	-0.22	0.22		- 0.6
LCPR	0.49	0.6	0.55	4	0.27	-0.24	0.5	0.54	0.42	0.4	0.31	-0.17	0.08		- 04
deltaeR	0.71	-0.35	0.19	0.27	1	0.31	0.39	0.11	0.45	0.75	-0.38	0.24	-0.29		
eminR	0.62	-0.59	-0.4	-0.24	0.31	4	0.36	-0.35	-0.13	-0.08	-0.13	0.59	0.2	-	- 0.2
D.ecp.emin	0.75	0.02	0.11	0.5	0.39	0.36	1	-0.07	0	0.3	-0.15	-0.06	0.43	-	- 0
Decp.emin	0.09	0.54	0.19	0.54	0.11	-0.35	-0.07	1	0.59	0.35	-0.04	-0.39	-0.15		0.2
summa	0.31	0.15	0.2	0.42	0.45	-0.13	0	0.59	1	0.72	0.01	-0.27	-0.34		
IQR	0.47	0.09	0.23	0.4	0.75	-0.08	0.3	0.35	0.72	. 4	-0.37	-0.35	-0.37		0.4
skewness	-0.17	0.36	0.14	0.31	-0.38	-0.13	-0.15	-0.04	0.01	-0.37	1	0.29	-0.03		0.6
kurtosis	0.31	-0.46	-0.22	-0.17	0.24	0.59	-0.06	-0.39	-0.27	-0.35	0.29	1	-0.11		0.8
p.value	0.07	0.09	0.22	0.08	-0.29	0.2	0.43	-0.15	-0.34	-0.37	-0.03	-0.11	1		

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:

$$U_{i=\overline{l},c}C_i = X \tag{5.5}$$

Каждое наблюдение должно относится только к одному кластеру:

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

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

$$\emptyset \subset C_i \subset X, i = 1, c \tag{5.7}$$

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 этапами. Результаты показаны на рисунке 5.19, в виде графиков распределения деформации по участкам заготовок, где они сгруппированы по этапам 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 $K_{\Delta l}$ от ε для обоих материалов: стали 35 и сплава 12Х18Н10Т, где из диагностических графиков видно, что эта зависимость близка к линейной, рисунки 5.22 и 5.23.



а – первый этап; б – второй; в – третий

Рисунок 5.19 – Группирование деформаций по участкам в соответствии с этапом пластического течения



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

Рисунок 5.20 – Кластеризация локальностей для стали 35


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

Рисунок 5.21 – Кластеризация локальностей для 12Х18Н10Т

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.

Im(Коэффициент.локальности.КСР ~ Величина.деформации...)





Im(Коэффициент.локальности.КСР ~ е)



Рисунок 5.23 – Результаты моделирования для 12Х18Н10Т

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 Р и деформации *е*_{*CPR*}.

L _{max}	Р, Н	<i>V</i> , 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	2,44444	-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 5.10 – Исходные данные

Таблица 5.11 – Результаты кластеризации

L _{max}	Р, Н	<i>V</i> , 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 этапам кривой нагружения по данным из таблицы 5.12, видны центры группирования, соответствующие этапам кривой пластического течения, таблица 5.13 и 5.14.



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

Р, Н	e _{cp}	<i>e_{Max}</i>	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	2,44444	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

Таблица 5.12 – Данные по нагружению и деформации

Для нечеткой кластеризации результаты приблизительно те же, что и для предыдущего метода кластеризации. Таблица 5.13 – Центры К-means

Р, Н	e_{cp}	e _{max}
29300	4	6
22300	4	3
17837	4	1

Таблица 5.14 – Нечеткая кластеризация (центры кластеров)

Р, Н	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 этапам 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.





Рисунок 5.27 – Дендрограмма для сокращенного набора данных

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



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.

На основе комплексной оценки пластических деформаций, которая включает в себя коэффициенты локальности разных типов, среднюю деформацию, размах, квадратичное отклонение деформаций, параметры распределения деформаций, которые включают в себя куртуозис и эксцесс, а также оценку приближенности кривой распределения к нормальной кривой. В соответствии с таблицей нескоррелированных данных по оценке равномерности деформирования по длине проводилась кластеризация данных методом *k*-средних и нечеткой кластеризации, а также построение дендрограмм для метода иерархической кластеризации, которые позволили сгруппировать данные по технологическим режимам для достижения заданной равномерности удлинений.

ГЛАВА 6. ВЛИЯНИЕ ГОРЯЧЕЙ ПРАВКИ РАСТЯЖЕНИЕМ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБРАБОТКИ МАЛОЖЕСТКИХ ВАЛОВ

6.1 Обеспечение прямолинейности горячей правкой растяжением

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.

Горячая правка растяжением является наиболее эффективным способом обеспечения этого параметра. При этом обеспечивается выравнивание остаточных технологических напряжений.

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 маложесткого вала

№ точки	Номер прохода	Тип обработки	Время	r_0 , MM	<i>t</i> , мм	$\pmb{R}_{\scriptscriptstyle 0}$, mm
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.

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:

$$R_0 = a + br_0 + ct \,, \tag{6.1}$$

где *R*₀ – смещение после обработки, мм;

 r_0 – смещение до обработки, мм;

t – глубина резания, мм;

а, b, с – 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.



Component + Residual Plots

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 горячей правки растяжением на конечные коробления вала. В данном случае эта операция горячая правка растяжением обеспечивает аналог правки оси заготовки. Образцы из 12Х18Н10Т длиной 350 мм и диаметром 10 мм имели начальную величину искривления. Затем после горячей правки растяжением 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_{100} (после) по центру вала индикатором с погрешностью

0,001 мм. Данные получены для холодной заготовки, нагретой до 100°С и 300°С, при трех скоростях растяжения. Но так как основные исследования по обеспечению эффективности горячей правки растяжением проводились при 300°С 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 горячей правке растяжением равен

$$K = \frac{f_0}{F_{tso}},\tag{6.2}$$

Таблица 6.2 – Результаты правки оси валов при помощи горячей правки растяжением

$f_{\scriptscriptstyle 0}^{}$, MM	<i>V</i> , c ⁻¹	<i>Т</i> , °С	е	K	$F_{\scriptscriptstyle tso}$, 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

$$F_{tso} = a + bf_0 + ce, (6.3)$$

Модель с полученными коэффициентами

$$F_{tro} = 0,155533 + 0,27723 f_0 - 0,06103 e$$
,

Модель имеет уровень значимости *p-value*: 0,0000009811

Для коэффициента уточнения аналогичная зависимость выглядит как

$$K = 1,841 + 0,453 f_0 + 0,395e$$
,

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 горячей правки растяжением



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

6.2 Влияние горячей правки растяжением на конструкторскотехнологические 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 который период, 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.

Дo горячей образец И после правки растяжением каждый устанавливался в патроне и поджимался задним центром. Усилия зажима патрона и поджима центром обеспечивалось максимально стабильным. 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.



a





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 горячей правки растяжением

Образец	Абсолютное удлинение, мм	Относительная деформация є, %	Относительный коэффициент жесткости до горячей правки растяжением	Относительный коэффициент жесткости до горячей правки растяжением	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 превышается 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 горячей правки растяжением 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 12Х18Н10Т №2 и стали 35 №2 наблюдалось повышение жесткости. В спектре для 12Х18Н10Т №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 12Х18Н10Т диаметром 20 мм и длиной 3320 мм до температуры 300 °C с растяжением 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 горячей правки растяжением, проводилась обработка черновым точением на аналогичных режимах для двух видов заготовки.



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

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

Выводы по главе 6

Результаты проведенных исследований по влиянию горячей правки растяжением на эффективность общего технологического процесса изготовления маложестких деталей имеет комплексный характер. Кроме обеспечения равномерного уровня остаточных напряжений, 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 техпроцесса с учетом количества переходов и глубины резания.

Использование горячей правки растяжением обеспечивает исправление исходной кривизны, что также выявлено в ходе экспериментальных исследований. Обеспечение деформаций при горячей правке растяжением в определенном диапазоне приводит к повышению жесткости заготовок за счет упрочнения материала, о чем свидетельствуют результаты статических экспериментов по нагружению образцов и изменение спектра их собственных частот.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с целью работы по повышению эффективности горячей правки растяжением с обеспечением заданной точности геометрических параметров с максимальной проработкой всего объема заготовки на основе учета взаимосвязи локализации пластических деформаций со стадиями пластического течения в длинномерных валах в условиях нагружения – растяжения, были выполнены следующие задачи:

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

2. Разработана распределенная математическая модель процесса деформирования при горячей правке растяжением с учетом независимого ввода для каждого участка заготовки температуры и параметров физикомеханических свойств.

3. Разработана методика комплексной оценки равномерности деформаций по длине осесимметричного вала на основе оптического метода контроля распределения деформаций в процессе нагружения. 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.

5. Разработан алгоритм определения стадии пластического нагружения на основе анализа особенностей сигнала силового нагружения путем обучения и применения нейро-сетевых моделей, которые по особенностям этого сигнала могут прогнозировать процесс силового нагружения и

классифицировать текущую стадию пластической деформации. Это обеспечивает выход на этап пластического течения, который обеспечивает максимально равномерную проработку материала заготовки при горячей правке растяжением.

6. Разработаны рекомендации для обеспечения однородности деформаций при горячей правке растяжением на установках для осевой горячей правки растяжением в рамках заготовительного этапа технологического процесса изготовления осесимметричных маложестких цилиндрических заготовок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

 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 международ. 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 маложестких 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 нежестких деталей на основе управления температурносиловым 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 маложестких 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 маложестких осемметричных 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 C1. – 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.

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 C2. – 20.02.2016. Заявка № 2014108656/02 от 05.03.2014.

20. Драчев, О. И. Технология изготовления маложестких 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 C1. – 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 / P. 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 корреляции цифровых метода изображений для изучения процессов деформации И разрушения конструкционных материалов / П. С. Любутин, С. В. Панин, В. В. Титков, А. B. Еремин, P. Сундер // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2019. – № 1. – C. 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. Кадурин, 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 C1. – 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 C1. – 10.02.2010. Заявка № 2008140009/02 от 08.10.2008.

48. Расторгуев, Д. А. Формирование распределения упругопластических 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 маложестких 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 маложестких 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: <u>http://www.gom.com/3dsoftware/aramis-software.html</u>. 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, PJ. 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 energyfiltered 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

Технологические рекомендации по использованию

горячей правки растяжением



Рисунок А.1 – Алгоритм проведения горячей правки растяжением



Рисунок А.2 – Схема анализа деформации методом ЦКИ

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 установа 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:

$$\Delta L_t = \alpha \Delta T L, \tag{A.1}$$

где α – коэффициент линейного расширения, 1/°С;

 ΔT – изменение температуры, °С.

6. Определение деформации для компенсации прогиба:

$$\Delta L_f = \frac{f^2 \pi^2}{4L},\tag{A.2}$$

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*_т 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 длинной 1,5 м.

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.

232

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

Таблица А.1 – Физико-механические свойства 12Х18Н10Т от температуры

Температура, °С	Модуль упругости <i>E</i> 10 ⁻⁵ , МПа	Предел текучести <i>о</i> г, МПа	Предел текучести <i>о</i> в, МПа	Коэффициент линейного расширения α10 ⁻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

Для валов разных размеров примеры расчетных данных приведены в таблицах А.2 и А.3.

Таблица А.2 – Усилие для деформирования валов при разных температурах

	Усилие, Н						
Температура, °С	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

	Температурное удлинение, мм						
Температура, °С		Длина,	, MM				
	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			

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 А.4 – Зависимость коэффициента уточнения для биения для горячей правки растяжением

Пример поведения вала с исходной кривизной между переходами по точению.



Прогиб заготовки на различных этапах обработки (ось 0-180 град). Эксперимент №3

Рисунок А.5 – Коробление вала между переходами

Исходная кривизна	Температурное удлинение, мм						
		Длина,	, MM				
<i>J</i> , MM	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.4 – Дополнительная деформация валов с учетом их исходной кривизны

Таблица А.5 – Деформация заготовки до начала пластического течения (минимальная)

Тампаратира		Удлинение, мм						
°C	$\mathcal{E}, \%$		Длина, мм					
C		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)

Тампаратира			УJ	ілинение, мі	М				
	ε, %		Длина, мм						
C		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			

Повышение жесткости в 1,1-1,2 раза на оптимальных режимах обеспечит снижение погрешности обработки от упругих деформаций в соответствующее число раз. Тогда при точении это соответствует повышению точности на 10-17% от непосредственно упругих деформаций.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Оценка 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 $\sigma_{oct}(z)$ можно представить как функцию, зависящую от пластической деформации $\varepsilon_p(z)$ и её производной $\varepsilon_p(z)$:

$$\sigma_{\rm oct}(z) \approx -k_1 \varepsilon_p(z) - k_2 \frac{d\varepsilon_p(z)}{dz}, \tag{B.1}$$

где $\sigma_{\text{ост}}(z)$ – остаточные осевые напряжения в точке z; $\varepsilon_p(z)$ – пластическая осевая деформация в точке z; $\frac{d\varepsilon_p(z)}{dz}$ – градиент пластической деформации;

k₁ и k₂ – положительные коэффициенты, зависящие от модуля упругости, предела текучести, коэффициента Пуассона и геометрии заготовки.



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

Рисунок Б.1 – Примеры распределения деформаций, определенных методом ЦКИ для образцов 12X18H10T

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:

$$k_2 = E \cdot l, \tag{5.2}$$

где l – это характерный размер области, где происходит изменение пластической деформации. Примем его исходя из расстояния между точками контроля. Для сплава 12Х18Н10Т *E* равна 2,02·10⁵ 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.





В

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

Рисунок Б.2 – Примеры оценки остаточных напряжений

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Технико-экономические показатели и эффективность внедрения

Эффективность горячей правки растяжением заключается в том, что она позволяет сократить процент брака в результате изготовления маложесткого вала. При этом время подготовки заготовки под горячую правку растяжением 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 равномерных остаточных напряжений.

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

$$\Pi_{O\mathcal{K}} = \Im_{Y\Gamma} = \left[\mathsf{C}_{\Pi O \Pi (\mathsf{FA3})} - \frac{\mathsf{B}_{\mathsf{P}(\mathsf{FA3})} - \mathsf{B}_{\mathsf{P}(\Pi \mathsf{P})}}{100} \cdot \mathsf{C}_{\Pi O \Pi (\Pi \mathsf{P})} \right] \cdot \Pi_{\Gamma}, \qquad (B.1)$$

где С_{ПОЛ(БАЗ)}, С_{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 горячей правки растяжением является сложным физикомеханическим процессом с множеством влияющих параметров (рисунок B.1).



Рисунок В.1 – Объект регулирования горячей правки растяжением

Если оценить погрешность формы в продольном сечении $\Delta_{\Phi_{1}}$ то зависимость может быть:

$$\Delta_{\Phi} = \beta_0 K_1^{\beta_1} T_B^{\beta_2} K_2^{\beta_3} \tau^{\beta_4} l^{\beta_5} d^{\beta_6}, \tag{B.2}$$

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 В.2, *H* – это твердость после горячей правки растяжением. Длительность процесса горячей правки растяжением определяется преимущественно временем нагрева (рисунок В.2 – отрезок 0-а), выстоя (a-b) и охлаждения (b-c).



Рисунок В.2 – Типовой график температуры для горячей правки растяжением

При этом происходит изменение напряженного состояния за счет различных процессов.

Затраты на горячую правку растяжением:

$$\theta_{\mathrm{T}^{0}} = E_{\mathrm{T}^{0}} \cdot t_{\mathrm{T}^{0}},\tag{B.3}$$

где E_{T^0} – стоимость минуты работы установки горячей правки растяжением; t_{T^0} – время термообработки. Время горячей правки растяжением t_{T^0} из рисунка В.2:

$$t_{\rm T^0} = 0a + ab + bc,$$
 (B.4)

$$0a = \frac{T_B^0 - T_H^0}{K_1},\tag{B.5}$$

$$ab = \tau$$
, (B.6)

$$bc = \frac{T_B^0 - T_H^0}{K_2},\tag{B.7}$$

$$t_{\rm T^0} = \frac{T_B^0 - T_H^0}{K_1} + \tau + \frac{T_B^0 - T_H^0}{K_2}$$
(B.8)

Технологическое ограничение по геометрии:

$$\Delta_{\Phi} \leq \Delta_{\Phi_{\mathcal{A}O\Pi}} \tag{B.9}$$

Проведенные исследования процесса горячей правки растяжением с применением моделей и методики представленных в данной работе, позволяет в рамках использования на первом этапе обработки маложестких осесимметричных заготовок предлагаемого типа установок для горячей осевой правки растяжением:

• повысить операционную и эксплуатационную точность по прямолинейности до 15...20 мкм/м;

- снизить брак по после операционному короблению на 60%;
- уменьшить количество операций механической обработки на 20%;

• повысить долговечность готовых деталей путем выравнивания уровня остаточных напряжений.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ

1. Организационно-технические преимущества	ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ И КАЧЕСТВА (параметры, характеризующие
ооработки штучных заготовок из проката: сниже степень качественного улучшения функциональных и	ние послеоперационного коробления,
повышение точности форм заготовки, повышени	е жесткости заготовок
2. Социальный эффект	
(подробно	раскрыть конкретный вид эффекта.
развитие науки и научных исследований в тех защита заоровы человека, окрана окр	КНОЛОГИИ Машиностроения и смежных ужающей среды;
отраслей промышленности; повышение наукон повышение престика страны, совершенствова	емкости и снижение трудоемкости
операций машиностроительного производства	елований
3. Экономический эффект от внедрения разработки д	остигнут за счет
уменьшения числа проходов, снижения брака по	требованиям точности расположения
и формы	and a second a second program.
сокращение калитальных вложений, повышение	качества пролукции и т.л.)
При этом получен фактический годовой экономическ	кий эффект с момента внедрения
230000 руб. (двести тридц (сумма цифрами и пропис	ать тысяч руб.

От предприятия

От ТГУ

Ответственный за внедрение





Ответственный за внедрение

к.т.н. доцент Д.А. Расторгуев одитель темы, Ф.И.О.)

ИСПОЛНИТЕЛИ:

leeg Аспирант К.О. Семенов сть, Ф.И.О.)

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

АКТ о внедрении результатов

				УТВЕРЖД	ЧЮ
				Директо	р
			100	руководитель предприятия ООО «Токарка	организации)
			3 COFPAHUNG	De	
				подпись	О. Б. Боиче
			(«Towalawa	1»OB	
			1 Lotel	2/3/	
			1196313099476 WHH	3//	
		АК	т		
	О РИСТРОИНИ ВОЗ	UNI TOTOD HOUSE			
	о внедрении резу	ультатов научн	ю-исследовател	ьскои работы	
D C					
Разработка заготовок»	«Операционная	технология	термосиловой	обработки	стержнев
		(полное наименова	ние разработки)		
выполненна	а по договору на 1	(хоздоговору, госбюджету,	ІЫХ ДОСТИЖЕНИЙ внутриминистерскому (внутриве,	[цомственному) заказам	
Договору	на передачу научных достижений догов				
	,,,	тру о содружестве, помер и инд	ске темы, дата начала и окончан	ия, объем затрат на ниг, ле г	осрегистрации)
и переданна:	4 000 «To	карка»			
		(название с	эрганизации (предприятия) заказу	чика)	
	6	20.24			
внедрена с	декаоря месяца 2	20 24 года на (В) ООО «Тока (организаци	прка» ия (предприятие), где внедрени	а разработка)
в составе	заготовительного	производства			
	(указат	ъ наименование объекта (систе	мы), в составе которых нашла пр	рактическое применение	
		или в качестве самостоя	ятельного объекта		
		••••••	000 T		••••••
B COOTBETCIB	ис планом тех	(документы, на	ВИТИЯ ООО «10	карка»	
		разработки вуза по какоми по	ANY DOBOBHING SAUCE DADOTLI		
Назначение н	знедренной разработ	разработки вуза, по какому пл КИ Обеспече	ану проводились работы) НИС ПРЯМОЛИНС	йности загото	вки
Назначение г	знедренной разработ	разработки вуза, по какому пл КИ Обеспече	ану проводились работы) НИС ПРЯМОЛИНС (раскрыть ко	ЙНОСТИ ЗАГОТО онкретные	вки
Назначение и	знедренной разработ	разработки вуза, по какому пл КИ Обеспече рабочие функции виедре Патенть и	ану проводились работы) НИС ПРЯМОЛИНС! (раскрыть ко синой разработки)	йности загото) онкретные №2768412 №24	вки
Назначение г Технический	знедренной разработ уровень разработки	разработия муза, по какому пл КИ Обеспече рабочие функции внедре Патенты н	аму проводилинсь работы) НИС ПРЯМОЛИНС! (раскрыть ко синой разработки) 12 ИЗОБРЕТЕНИЕ Ј (Ућа авторских сандетел	йности загото онкретные №2768412, №26 ьств на изобретения.	вки 523972,
Назначение в Технический №2632748	знедренной разработ уровень разработки	разработки муза, по какому пл КИ Обеспече рабочне функции внедря Патенты н лицензий, пат	ану проводились работы) НИС ПРЯМОЛИНС (раскрыть к синой рахработки) НИ ИЗОБРЕТЕНИЕ Ј (Ма авторских свидател тентов)	йности загото) онкретные №2768412, №26 метя на изобретения.	вки 623972,
Назначение н Технический №2632748 Вид внедрени	знедренной разработ уровень разработки ия изготовление	разработки муза, по какому пл КИ Обеспече рабочне функции ансар Патентъь н лицензий, пат Продукции, при	аму проводились работы) НИС ПРЯМОЛИНС! (раскрыть ко синой разработки) IA ИЗОБРЕТЕНИС Ј (Ућ авторских свидетел (Ућ авторских свидетел тентов) И ВЫПОЛНЕНИИ П	йности загото) оперетные №2768412, №26 метя на насобретения. Производственн	вки 623972, ных работ

УТВЕРЖДАЮ

Директор 000 «Токарка», к.т.н О. В. Бойченко «Токарка» 2 ...2025 г.

о внедрении результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук Семенова Кирилла Олеговича

АКТ

от 25 января 2025 г.

Результаты диссертационной работы Семенова Кирилла Олеговича «Повышение эффективности термосиловой обработки на основе учета стадий пластического течения», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы при проведении производственных работ при при изготовлении валов и осей механизмов, изготавливаемых в рамках модернизации чугуно-литейного производства ОАО «АВТОВАЗ».

Материалы диссертационной работы внедрены в технологический процесс изготовления маложестких длинномерных цилиндрических заготовок на операциях отпуска со стабилизацией параметров прямолинейности.

Установлено, что использование операционной технологии термосиловой обработки снижает отклонение от прямолинейности заготовок, биение на операции и в после операционное время, сокращает количество переходов, общее время обработки и себестоимость изготовления.

приложение д

№ точки	Номер прохода	Тип обработки	Время	r_0 , MM	<i>t</i> , MM	$\pmb{R}_{_0}$, 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

№ точки	Номер прохода	Тип обработки	Время	$r_{0, MM}$	<i>t</i> , _{MM}	$R_{0, MM}$
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

№ точки	Номер прохода	Тип обработки	Время	$r_{0, MM}$	<i>t</i> , _{MM}	$R_{0, MM}$
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

№ точки	Номер прохода	Тип обработки	Время	$r_{0, MM}$	<i>t</i> , _{MM}	$R_{0, MM}$
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

№ точки	Номер прохода	Тип обработки	Время	$r_{0, MM}$	<i>t</i> , _{MM}	$R_{0, MM}$
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