

Семенов Кирилл Олегович

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

2.5.7. Технологии и машины обработки давлением

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре «Оборудование и технологии машиностроительного производства» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тольяттинский государственный университет».

**Научный руководитель:**

**Расторгуев Дмитрий Александрович**, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тольяттинский государственный университет», кафедра «Оборудование и технологии машиностроительного производства», доцент.

**Официальные оппоненты:**

**Болобанова Наталия Леонидовна**, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Череповецкий государственный университет», кафедра металлургии, машиностроения и технологического оборудования, заведующий кафедрой;

**Мунтин Александр Вадимович**, кандидат технических наук, АО «Выксунский металлургический завод», Инженерно-технологический центр, директор.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва.

Защита состоится 22 апреля 2026 года в 10:00 на заседании диссертационного совета 24.2.379.05, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» и на сайте [https://ssau.ru/resources/dis\\_protection/semenov](https://ssau.ru/resources/dis_protection/semenov).

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор технических наук, доцент

Я.А. Ерисов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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

**Степень разработанности темы.** Задача повышения точности формы длинномерных маложестких валов является актуальной для машиностроения. Существующие методы правки, в частности, правка растяжением с нагревом, обладают рядом преимуществ, однако их эффективность ограничена неравномерностью распределения деформаций и сложностью контроля самого процесса. В настоящее время исследованию процессов правки растяжением с нагревом, посвящены работы О.И. Драчева, Г.В. Мураткина, В.Г. Подпоркина, И.С. Ротова, В.А. Жаркова, Г.В. Шимова, С.П. Буркина, А.В. Серебрякова, С.А. Типалина, Е.А. Максимова, С.А. Зайдеса, А.Н. Овсеенко, Е.Ю. Кропоткина, Д.А. Расторгуева, Д.Ю. Воронова и другие. Несмотря на значительное количество исследований в области пластического формоизменения, вопросы учета стадий пластического течения, влияния температурных полей и разработки эффективных методов контроля равномерности деформаций при правке растяжением с нагревом требуют дальнейшего изучения. Недостаточно разработаны методы прогнозирования и управления процессом на основе анализа сигнала нагружения и моделирования с учетом температурно-зависимых свойств материала.

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

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

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

**Цель работы:** повышение точности геометрии маложестких валов с обеспечением равномерного распределения деформаций при правке растяжением с нагревом на основе

учета взаимосвязи особенностей локализации пластических деформаций со стадиями пластического течения.

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

1. Провести систематизацию технологий, способов, влияющих факторов по формированию прямолинейности оси мало жестких деталей.

2. Разработать математическую модель процесса деформирования при правке растяжением с нагревом с учетом изменения температуры и нагружения.

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

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

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

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

#### **Научная новизна работы:**

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

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

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

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

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

6. Установлены закономерности формирования однородного деформационного поля при правке растяжением с нагревом, основанные на управлении переходами между стадиями пластического течения. Научно обоснована возможность целенаправленного

повышения жесткости и исправления геометрии заготовок за счет выбора режимов, соответствующих первой и второй стадиям упрочнения, что обеспечивает устойчивость процесса деформирования.

#### **Теоретическая значимость работы:**

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

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

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

#### **Практическая значимость работы:**

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

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

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

#### **Положения, выносимые на защиту:**

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

2. Методика моделирования технологических параметров и коэффициента локальности деформирования на основе нейро-нечеткой сети ANFIS, обеспечивающая формирование системы лингвистического вывода для оптимизации параметров процесса и достижения равномерности деформирования.

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

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

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

6. Закономерности формирования однородного деформационного поля при правке

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

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

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

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

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

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

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

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, определена цель и поставлены основные задачи, дана краткая характеристика работы, включающая научную новизну, практическую ценность.

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

Выполнен патентно-литературный обзор существующих к данному моменту технологий правки, правку изгибом, накаткой, растяжением с нагревом и без, изделий

круглого профиля, включая валы, трубы, в рамках научных изысканий ученых. Рассматриваются устройства с простым и сложным – комбинированным нагружением вала, схемы правок, реализуемых разными типами правильных машин.

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

Во **второй главе** рассматриваются вопросы моделирования процесса правки растяжением с нагревом на основе реологических моделей.

Разработана распределенная пространственная реологическая модель, которая используется для моделирования процесса правки растяжением с нагревом, учитывающая влияние величины деформации и скорости деформации на напряжения. Используется реологическая модель Ишлинского с упрочнением, где введен учет температурной зависимости параметров модели, к которым относятся модуль упругости и предел текучести.

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

$$\sigma(t) = 2 \cdot G \cdot \left[ \varepsilon(t) - \int_0^{\infty} \dot{\varepsilon}_\tau f(\tau) d\tau \right]. \quad (1)$$

С учетом упрочнения  $q$ :

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

где  $G$  – модуль сдвига, МПа;  $f(\tau)$  – плотность вероятностного распределения безразмерных пределов текучести;  $\dot{\varepsilon}_\tau$ ,  $\varepsilon_\tau$  – скорость и величина пластической деформации;  $V_\tau$  – интенсивность скоростей пластической деформации,  $c^{-1}$ ;  $\tau$  – безразмерный предел текучести.

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

Модель представлена в виде цепочки взаимодействующих однотипных модулей-блоков, каждый из которых может иметь индивидуальный ввод температуры, задание по определенному закону распределения параметров материала приведено на рисунке 1.

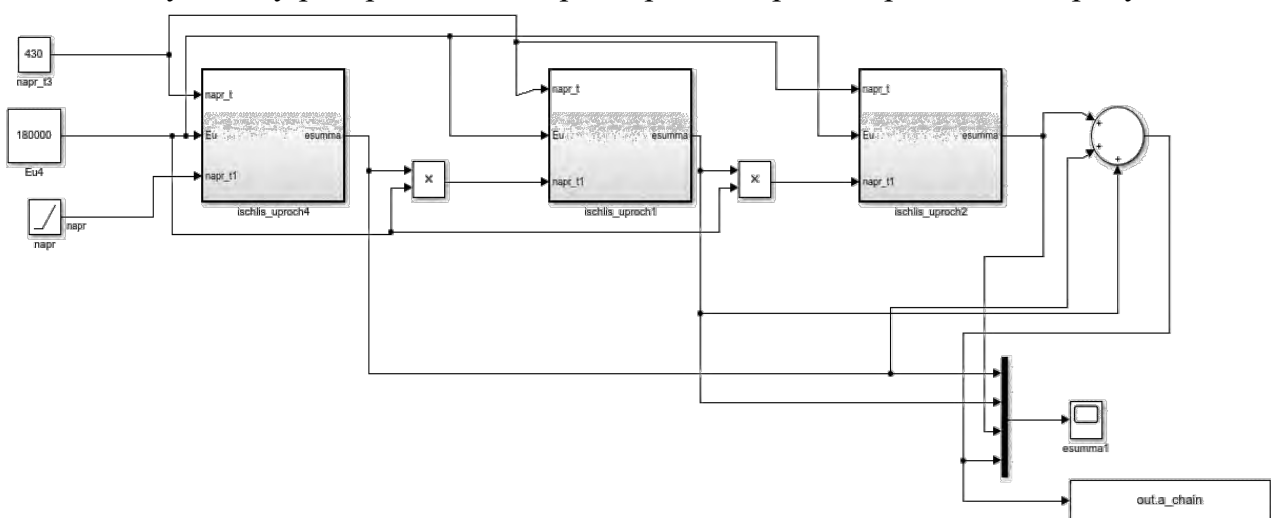


Рисунок 1 – Реологическая цепочка моделирования деформации распределенной системы

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

Температурно-зависимые параметры – модуль упругости  $E$  и предел текучести  $\sigma_m$  определяются по формулам:

$$E(T) = E(0) \cdot \varphi(T), \quad (3)$$

$$\varphi(T) = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 < T/T_{\text{пл}} \leq 0,06, \\ 1,03(1 - T/(2T_{\text{пл}})) & \text{при } 0,06 < T/T_{\text{пл}} \leq 0,57, \end{cases} \quad (4)$$

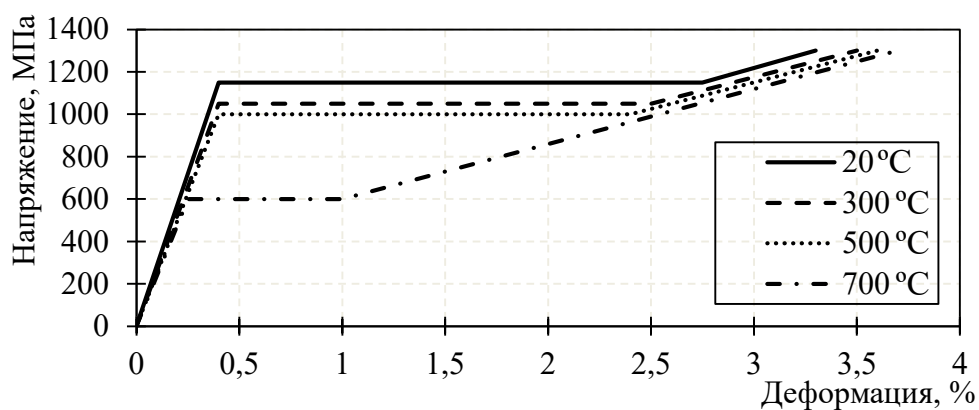
где  $T_{\text{пл}}$  – температура плавления материала, °С;  $E(0)$  – значения модуля упругости при нулевой температуре, МПа;  $T$  – рабочая температура, °С.

$$\sigma_m(T) = \sigma_{m0} \cdot \exp\left\{\chi\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right\}. \quad (5)$$

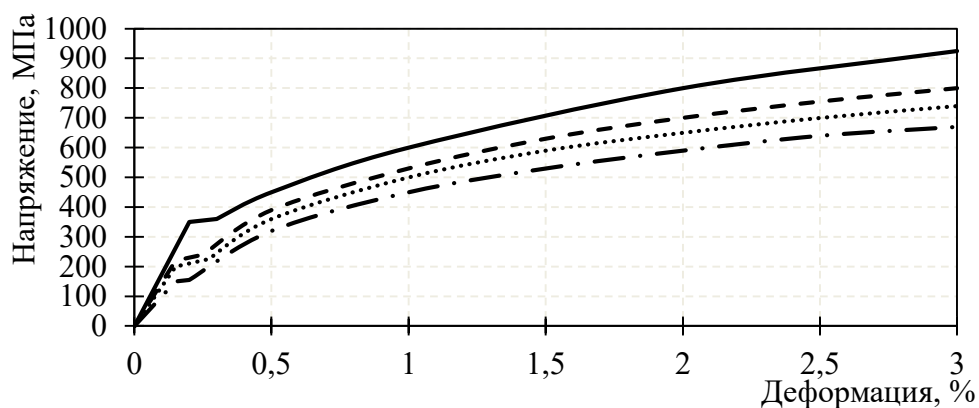
где  $\sigma_m(T)$  – предел текучести при температуре  $T$ , МПа;  $\sigma_{m0}$  – предел текучести при температуре  $T_0$ , МПа;  $\chi$  – температурный коэффициент, характеризующий скорость снижения  $\sigma_m$  с ростом  $T$ , К;  $T_0$  – начальная температура, К;  $T$  – рабочая температура,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

Результаты расчета реологической модели с упрочнением проводились для сталей 40Х и 12Х18Н10Т в диапазоне от 20 до 700 °С, представлены на рисунке 2.

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



а



б

а – 40Х; б – 12Х18Н10Т

Рисунок 2 – Результаты расчета по модели с упрочнением кривой нагружения для сталей с различной температурой нагрева образцов

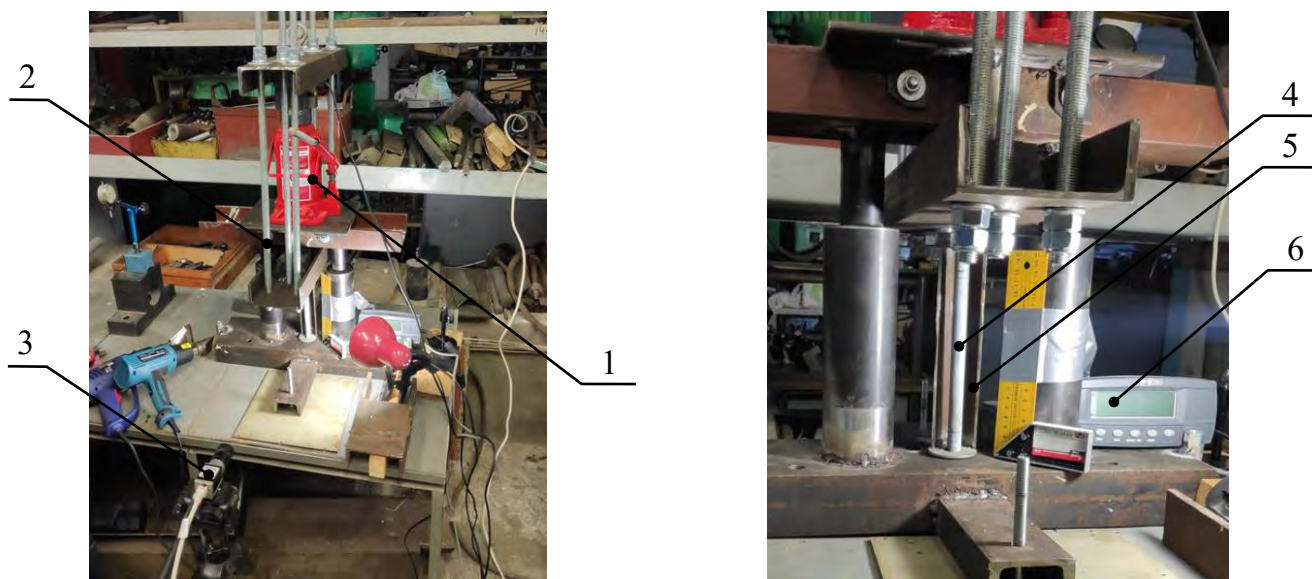
В дальнейшем, результаты моделирования используются как дополнительные входные данные для обучения нейронной сети совместно с данными, полученными от контроля реального процесса нагрева, что позволяет увеличить объем данных для обучения и повысить точность нейросетевой модели.

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

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

Для контроля деформации по поверхности образца использовалась цифровая камера Basler acA1440-73gc с CMOS-матрицей Sony IMX273, частотой 1 кадр в секунду. Для получения корректной информации проводилась настройка оптической системы с тарировкой и калибровкой данных (коэффициенты радиальной дисторсии 0,013; 3,122; 33,442; коэффициенты тангенциальной дисторсии 0,006; 0,0219; фокусное расстояние 3776,489; 3718,554). До правки растяжением с нагревом, метод предварительно оценивался на точность на трубках с нанесенным спеклом с размерами 0,04-0,15 мм (0,8-3 пикселя) 0,5 мм (10 пикселей). Полученные изображения накладывались друг на друга (исходный и деформированный образец) с измерением смещений контрольных точек в сечении с установленными реперными стержнями толщиной 0,5 мм с точностью до 0,5 пикселей (0,025 мм). Дополнительно контролировалось смещение нижнего фиксатора с индикатором, имеющего погрешность 0,01 мм.

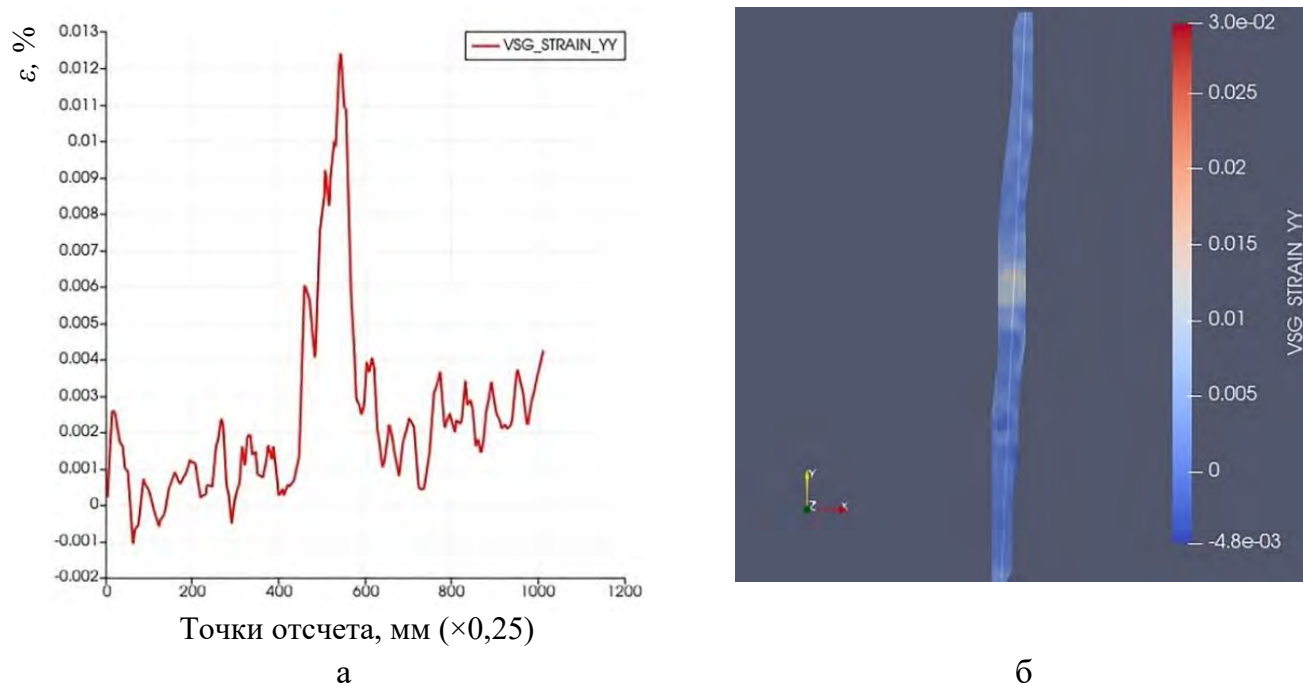
Для апробации предложенного способа оптического контроля деформации цилиндрического образца при растяжении вовремя правки растяжением с нагревом проведен цикл экспериментов на установке на рисунке 3.



1 – домкрат; 2 – подвижная силовая рама; 3 – цифровая камера;  
4 – заготовка (образец); 5 – кожух; 6 – индикатор

Рисунок 3 – Общий вид установки для правки растяжением с нагревом

Использование методов оптического контроля обеспечивает наглядную визуализацию процессов деформации, протекающих в процессе нагружения на рисунке 4.



а – деформации вдоль указанной осевой линии; б – поле деформаций

Рисунок 4 – Осевая деформация образца на кадре 204

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

Методика позволяет получить двухмерные и одномерные зависимости распределения деформаций по направлениям – осевые и поперечные в заданных точках. На рисунках 5 и 6 показаны результаты вычисления деформаций по 10 точкам, распределенным вдоль оси образца.

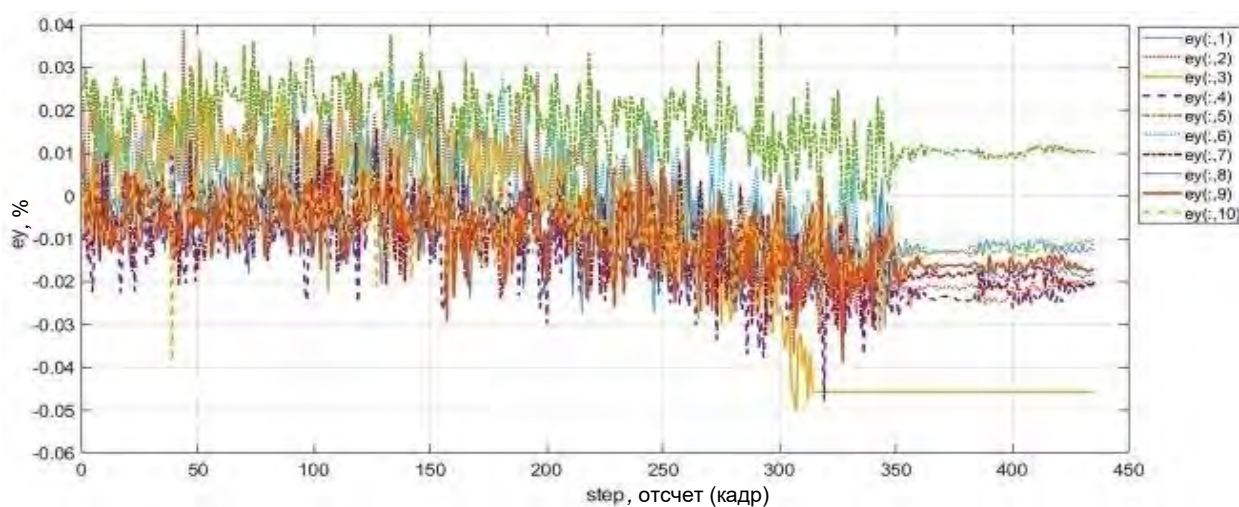


Рисунок 5 – Результаты расчета поперечных деформаций по контрольным точкам, указанным в области анализа (графики точек отобранные для анализа)

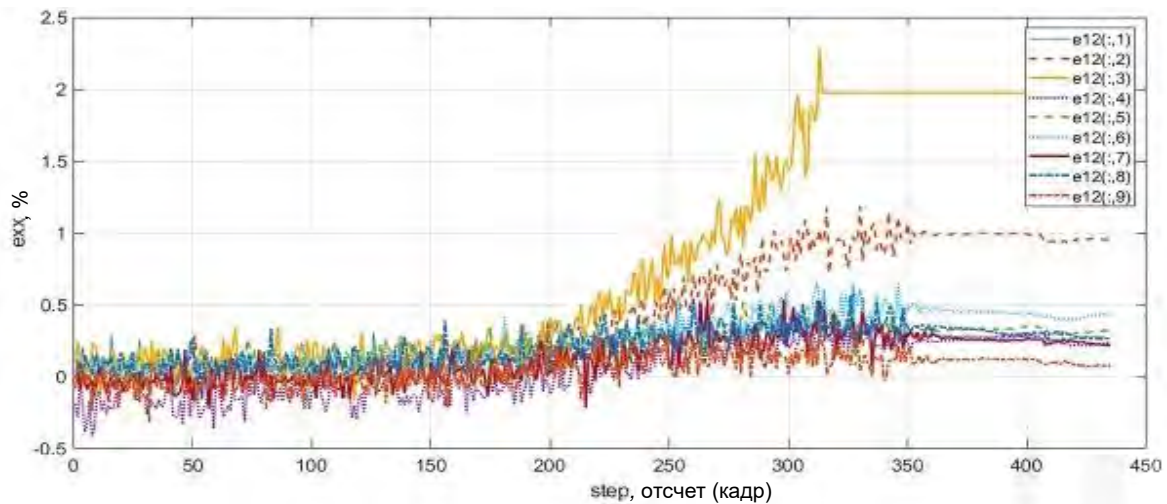


Рисунок 6 – Результаты расчета продольных деформаций по контрольным точкам, указанным в области анализа (графики точек отобранные для анализа)

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

В четвертой главе для оценки степени неравномерности деформаций по длине в рамках правки растяжением с нагревом предложена комплексная методика, которая включает в себя определение коэффициентов локальности деформации двух типов,  $K_{лI}$  – первого рода и  $K_{лII}$  – второго рода:

$$K_{лI} = \frac{\varepsilon_{\min i}}{\varepsilon_{\max i}}, K_{лII} = \frac{\varepsilon_{\text{ср}}}{\varepsilon_{\max i}} \quad (6)$$

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

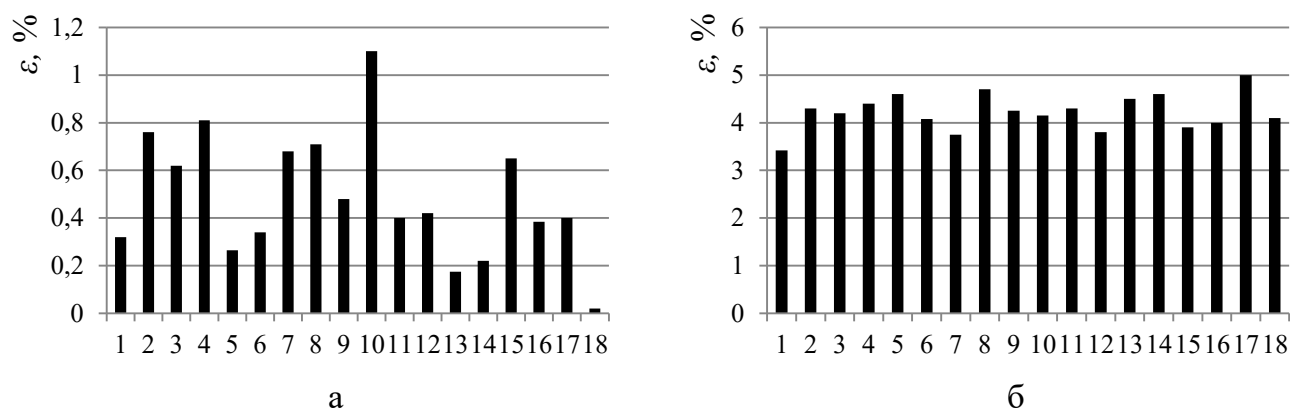
При анализе экспериментальных данных определены оценки равномерности деформаций для образцов и сгруппированы в соответствии со стадиями пластического течения. Данным стадиям (площадка текучести, линейное упрочнение, параболическое упрочнение), отвечают различные картины распределения пластических деформаций,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

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

за этого явления, что требует дальнейшего изучения вопроса.

Рассмотрены вопросы обеспечения равномерности распределения осевой деформации при растяжении цилиндрических заготовок с использованием новой методики оценки локализации деформации. Такая оценка необходима при проектировании и проведении правки растяжением с нагревом в рамках заготовительного этапа технологического процесса изготовления маложестких длиномерных заготовок. Она заключается в одновременном нагреве и деформировании, что обеспечивает формирование прямолинейности заготовки с выравниванием и снижением уровня остаточных технологических деформаций. Разработанная методика оценки локализации деформаций, обеспечивает комплексную оценку равномерности растяжения по длине.

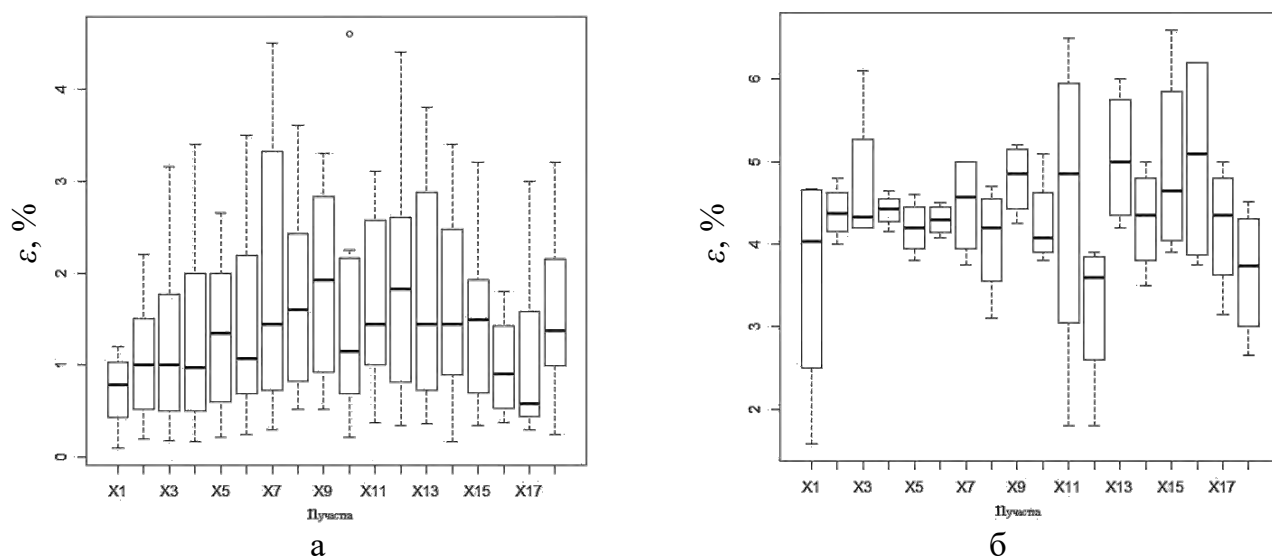
На диаграммах пластичности видно влияние волнового характера пластического течения на локализацию деформаций при высокотемпературном растяжении заготовок на примере заготовок из сплава 12Х18Н10Т на рисунке 7.



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

Рисунок 7 – Распределение деформаций по контрольным участкам

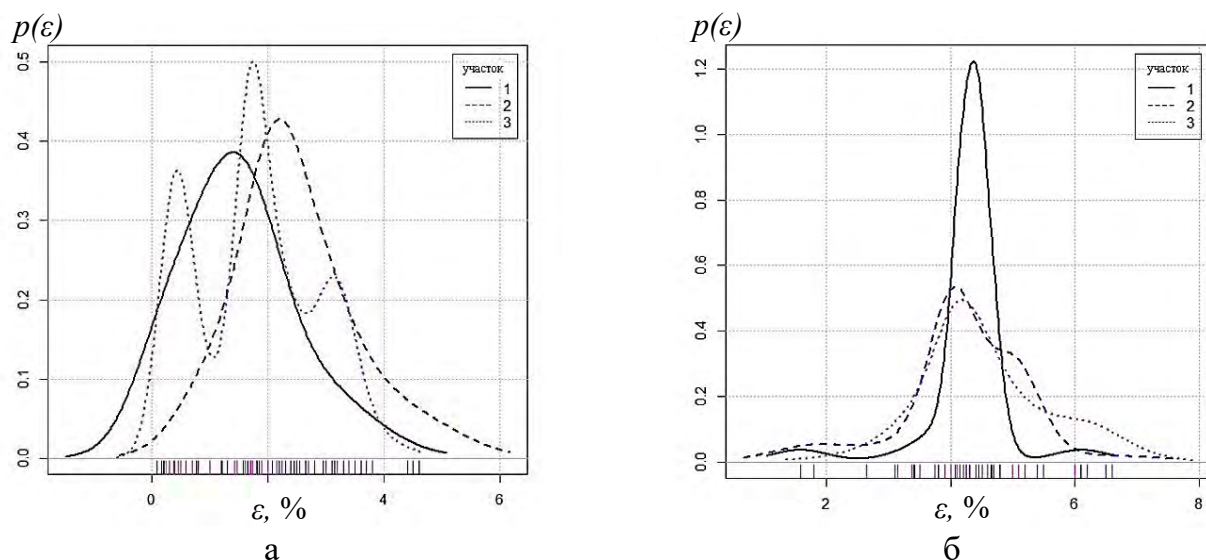
Распределение деформаций по участкам по образцам показано в виде бокс-плотов на рисунке 8.



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

Рисунок 8 – Диаграмма размаха деформаций по участкам

Распределение деформаций по участкам по образцам показано в виде плотности распределения на рисунке 9.



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

Рисунок 9 – Плотность распределения пластических деформаций, сгруппированная по длине по участкам: 1 – левая часть вала; 2 – середина вала; 3 – правая часть вала

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

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

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

Моделирование результатов исследования по локализации деформации по коэффициенту локальности как отношению средней деформации к максимальной от температурно-скоростных факторов показали наиболее оптимальное сочетание параметров для обработки (300°C, минимальная скорость нагружения  $1,7 \cdot 10^{-4}$ – $2,5 \cdot 10^{-4}$  с<sup>-1</sup> и диапазон деформаций 1,0 – 2,0% для 12X18H10T, и 400°C, скорость нагружения  $2,5 \cdot 10^{-4}$ – $3,3 \cdot 10^{-4}$  с<sup>-1</sup> и диапазон деформаций 1,2 – 1,4 % для стали 35). Получена модель прогнозирования силового нагружения на основе LSTM с точностью 92% и классификации с точностью 83%.

Также на основе нейро-нечеткой сети ANFYS смоделировано определение коэффициентов локальности от входных технологических параметров. Результат моделирования представляется в виде трехмерной поверхности вывода для двух входных технологических параметров скорость деформации – деформация (Input 2 –  $v$ ; Input 3 –  $\epsilon$ ) на рисунке 10.

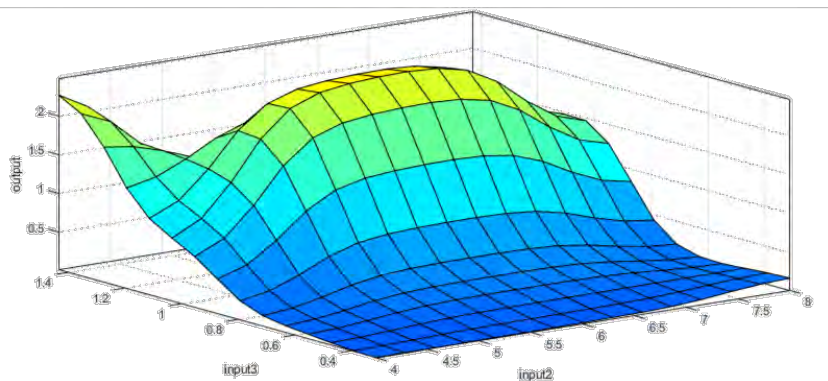


Рисунок 10 – Поверхности вывода коэффициента локальности для 12X18H10T в системе координат ( $T, ^\circ\text{C}; \varepsilon, \%; \nu, \text{c}^{-1}$ )

В шестой главе приведены результаты исследования влияния правки растяжением с нагревом на эффективность общего технологического процесса изготовления малоожестких деталей. Кроме обеспечения равномерного распределения деформаций, происходит обеспечение максимальной прямолинейности оси заготовки. С учетом полученных зависимостей, включая нейросетевое моделирование, величины прогиба вала от конструкторско-технологических параметров, можно спрогнозировать уровень точности конкретного процесса с учетом количества переходов и глубины резания.

Использование правки растяжением с нагревом обеспечивает исправление исходной кривизны, что также выявлено в ходе экспериментальных исследований. Установлено снижение биения заготовок в 1,4-4,0 раза за счет пластического деформирования с учетом начальной погрешности формы, представлены на рисунках 11 и 12. Обеспечение деформаций при правке растяжением с нагревом в определенном диапазоне приводит к повышению жесткости заготовок из-за упрочнения в 1,1-1,2 раза при реализации первой и второй стадий пластического течения обеспечивает снижение упругих деформаций при последующей обработке, что повышает точность точения на 10-17%.

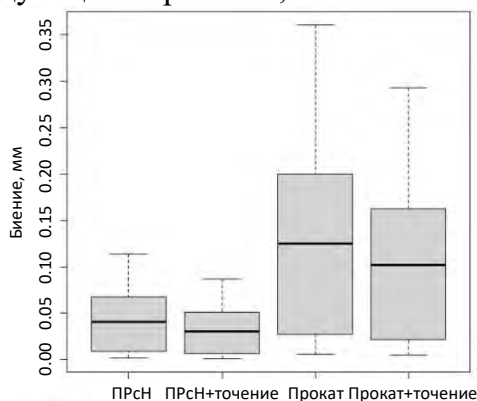


Рисунок 11 – Биение для проката с правкой с точением и прокат с точением (базовый вариант)

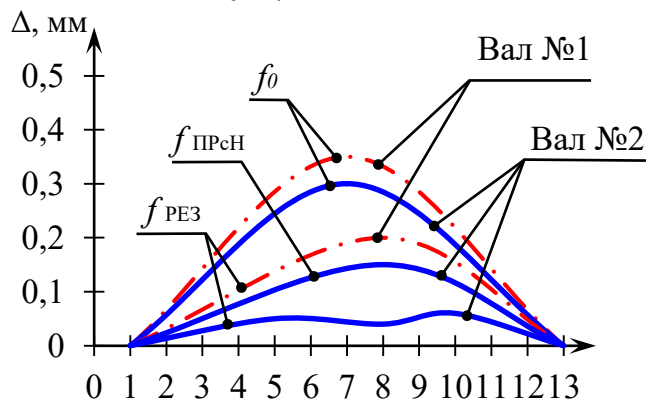


Рисунок 12 – Примеры биения для валов обработанных по двум вариантам технологии

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

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

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

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

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

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

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

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

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

### Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России

1. Семенов, К.О. Оптический способ контроля деформаций при обработке цилиндрических заготовок / К.О. Семенов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2024. – Т. 26. – № 6 (122). – С. 86-95.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. Расторгуев, Д.А. Формирование распределения упруго-пластических деформаций в стержнях в результате действия волновых процессов / Д.А. Расторгуев, К.О. Семенов // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2015. – № 3-1 (33-1). – С. 100-105.

#### **Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах Scopus и Web of Science**

6. Rastorguev D. Influence of digital image correlation method parameters and speckle features on the deformation measurement error / D. Rastorguev, K. Semenov // В сборнике: AIP Conference Proceedings. III International Scientific Forum on Computer and Energy Sciences (WFCES 2022). – Almaty, Kazakhstan. – 2023. – С. 020051.

7. Rastorguev, D.A. Technological Support for the Uniformity of Plastic Deformation during Thermal-Force Treatment / D.A. Rastorguev, K.O. Semenov, R.R. Dema, O.R. Latypov, P.A. Matveev // Russian Metallurgy (Metally) 2022. – 2022 (13). – pp. 1795-1800.

8. 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. – С. 22014.

#### **Патенты**

9. 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.

10. 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. – Заявка № 2016102936 от 28.01.2016.

11. 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.

#### **В других изданиях**

12. Расторгуев, Д.А. Определение этапа нагружения при помощи LSTM сетей / Д.А. Расторгуев, К.О. Семенов // В сборнике: Инновации в машиностроении (ИнМаш - 2024). Сборник трудов XV Международной научно-практической конференции. Новосибирск, 2024. С. 130-134.

13. Семенов, К.О. Моделирование процесса деформирования при термосиловой обработке / К.О. Семенов, Д.А. Расторгуев // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности. Сборник научных статей V международной научной конференции в 2-х частях. НПП МЕДПРОМДЕТАЛЬ ООО Газпром трансгаз Казань. Казань. – 2021. – С. 77-81.

14. 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.

15. Семенов, К.О. Измерение деформаций цилиндрических деталей при термосиловой обработке с использованием метода корреляции цифровых изображений / К.О. Семенов, Д.А. Расторгуев // Высокие технологии в машиностроении: материалы XVIII Всероссийской научно-технической конференции / Отв. ред. Р. Г. Гришин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т. – 2021. – С. 109-111.