

## ОТЗЫВ

официального оппонента д.т.н., доцента Болобановой Наталии Леонидовны на диссертационную работу Семенова Кирилла Олеговича на тему: «Повышение эффективности правки растяжением с нагревом на основе учета стадий пластического течения», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.7. – Технологии и машины обработки давлением

### Актуальность темы диссертационной работы

Обеспечение прямолинейности длинномерных мало жестких валов является одной из важных задач современного машиностроения. Традиционные методы правки поперечным изгибом часто не гарантируют стабильности геометрических параметров в процессе последующей механической обработки и эксплуатации. Перспективным направлением является правка растяжением с нагревом, позволяющая формировать равномерное напряженно-деформированное состояние. Однако эффективность этого метода ограничена неравномерностью пластической деформации вдоль заготовки, связанной с автоволновым характером пластического течения. Диссертационная работа Семенова К.О., направленная на повышение равномерности деформаций путем управления стадиями пластического течения, является актуальной и практически значимой.

### Структура и содержание работы

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и одного приложения. Работа изложена на 249 страницах, включает 147 рисунков, 32 таблицы, 175 наименований библиографии.

Во **введении** обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость.

В **первой главе** выполнен систематизированный обзор способов правки, проанализированы существующие конструкции машин и технологические трудности, обоснована перспективность правки растяжением с нагревом.

Во **второй главе** разработана распределенная математическая модель процесса деформирования на основе реологической модели Ишлинского с температурно-зависимыми параметрами, учитывающая неоднородность нагрева и свойств по длине заготовки.

В **третьей главе** представлена методика оптического контроля деформаций с использованием цифровой корреляции изображений (DIC), описана экспериментальная установка, приведены результаты апробации метода на цилиндрических образцах длиной до 350 мм.

В **четвертой главе** предложена комплексная методика оценки равномерности деформаций, включающая коэффициенты локальности, статистические параметры распределения. Экспериментально установлена связь между стадией пластического течения (площадка текучести, линейное и параболическое упрочнение) и характером локализации деформаций.

В **пятой главе** применены методы машинного обучения: нейро-нечеткая сеть ANFIS для моделирования коэффициента локальности от технологических параметров, рекуррентная сеть LSTM для прогнозирования стадий нагружения, а также кластерный анализ для группирования образцов по стадиям деформирования.

В **шестой главе** исследовано влияние правки растяжением с нагревом на точность и жесткость заготовок, приведены результаты промышленного внедрения, даны технологические рекомендации и оценен экономический эффект.

В **заключении** сформулированы основные выводы по работе.

### **Научная новизна**

1. Разработана распределенная реологическая модель процесса деформирования на основе модели Ишлинского с упрочнением, отличающаяся введением температурно-зависимых коэффициентов (модуля упругости и предела текучести) и представлением заготовки в виде цепочки взаимодействующих ячеек, что позволяет анализировать влияние неравномерности нагрева на распределение деформаций.

2. Предложена методика моделирования коэффициента локальности деформирования с использованием нейро-нечеткой сети ANFIS, формирующая систему лингвистического вывода для оптимизации технологических режимов.

3. Разработана методика прогнозирования стадии пластического течения по сигналу нагружения на основе LSTM-сети, обеспечивающая определение момента достижения максимально равномерной деформации.

4. Впервые применен оптический способ контроля распределения деформаций методом цифровой корреляции изображений в условиях нагрева цилиндрических образцов длиной до 350 мм, что позволило в реальном времени фиксировать поля смещений.

5. Экспериментально подтверждена зависимость степени однородности деформации от стадии пластического течения при правке растяжением с нагревом; установлено, что наиболее равномерное деформирование достигается на стадии линейного упрочнения.

6. Выявлены закономерности формирования однородного деформационного поля путем управления переходами между стадиями течения; обоснована возможность повышения жесткости заготовок и исправления кривизны за счет выбора режимов, соответствующих стадиям упрочнения.

### **Практическая значимость**

Разработанная методика позволяет оценивать распределение деформаций по длине заготовки в режиме реального времени. Обоснованы диапазоны технологических режимов (температура, скорость деформации, степень деформации), обеспечивающие максимальную равномерность деформирования для сталей 35 и 12X18H10T. Предложен алгоритм косвенного контроля стадий пластического течения по параметрам силового нагружения. Результаты внедрены в производственный процесс машиностроительного предприятия г. Тольятти, что позволило снизить биение заготовок в 1,4–4,0 раза и повысить точность последующего точения на 10–17%.

### **Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций**

Научные положения и выводы обоснованы корректным применением методов механики сплошных сред, теории пластичности, реологического моделирования, современных оптических методов контроля и статистической обработки данных. Достоверность экспериментальных результатов обеспечена использованием поверенных средств измерения (тензодатчики, индикаторы, калиброванная цифровая камера), тарировкой оптической системы и сопоставлением с независимыми измерениями. Результаты моделирования качественно согласуются с экспериментальными кривыми деформирования. Основные положения апробированы на

международных и всероссийских конференциях, опубликованы в рецензируемых изданиях.

### **Соответствие автореферата основному содержанию диссертационной работы**

Автореферат полностью отражает содержание диссертации, включает все ключевые положения, выводы и практические рекомендации.

### **Подтверждение основных результатов диссертационной работы в научной печати**

Основные результаты представлены в 15 научных работах, в том числе 5 статей в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, 3 статьи в журналах, индексируемых Scopus/Web of Science, 3 патента на изобретения. Количество и уровень публикаций достаточны для кандидатской диссертации.

### **Положительные аспекты диссертационной работы**

Работа выполнена на высоком научном уровне, носит комплексный междисциплинарный характер, объединяя фундаментальные представления о пластичности, современные экспериментальные методы (DIC) и интеллектуальный анализ данных (нейросети). Особо стоит отметить значительный объем экспериментальных исследований на образцах различной длины и из разных материалов, а также успешную апробацию разработанных методик в промышленных условиях.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. В главе 2 предложена реологическая модель на основе модели Ишлинского. Однако для этапа высокотемпературной выдержки (релаксации) используются уравнения Вольтерры с ядром Ржаницына, которые непосредственно не связаны с исходной моделью. Желательно было бы привести обоснование такого комбинированного подхода и показать согласование расчетных и экспериментальных данных на всех этапах нагружения.

2. В главе 2 при введении параметра упрочнения  $q$  (уравнение 2.16) не пояснен его физический смысл и связь с модулем упрочнения  $D$ . Неясно, почему множитель  $(1+q)$  появляется именно перед пластической деформацией и как модифицируется основное интегральное уравнение (2.10). Это затрудняет использование модели для количественных расчетов.

3. В главе 3 применение метода цифровой корреляции изображений в условиях нагрева сопряжено с возможными погрешностями из-за тепловых искажений воздушной среды – эффект «теплового тумана». В работе описана калибровка оптической системы, но не приведены оценки влияния температурных градиентов на точность измерений. Было бы полезно провести дополнительные эксперименты по оценке повторяемости и сопоставить результаты с данными контактных методов для различных температур.

4. В главе 5 для обучения нейросетевых моделей (ANFIS, LSTM) использован ограниченный объем экспериментальных данных, особенно для стали 35 – менее 15 точек. Высокие показатели точности (92%) в таких условиях могут свидетельствовать о переобучении. Автору следовало бы более осторожно интерпретировать полученные метрики и, возможно, применить методы регуляризации или увеличить выборку за счет синтетических данных из реологической модели.

5. В главе 6 при обсуждении повышения жесткости заготовок после правки (п. 6.2, стр. 202–207) автор оперирует понятием «относительный коэффициент жесткости», измеренный по прогибу консольно закрепленного образца. Однако следует различать жесткость как характеристику упругой системы, зависящую от модуля упругости и момента инерции сечения, и сопротивление пластическому деформированию (упрочнение). В работе не разделены эти эффекты, что может привести к неоднозначной трактовке результатов. Кроме того, формула (6.7) для компенсации прогиба приведена без вывода или ссылки; появление множителя  $\pi^2$  требует обоснования.

6. Некоторые разделы диссертации содержат избыточный материал. Первая глава перегружена подробной классификацией способов правки (с. 12–43), которая не связана непосредственно с решаемой задачей. В главе 3 таблица 3.3 занимает 13 страниц однотипными изображениями полей деформаций, хотя выводы из нее минимальны. В тексте диссертации встречаются отдельные опечатки и стилистические погрешности.

В целом, сделанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертации, а носят уточняющий или рекомендательный характер.

## Заключение

Представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук диссертационная работа Семенова Кирилла Олеговича на тему «Повышение эффективности правки растяжением с нагревом на основе учета стадий пластического течения» является законченной научно-квалификационной работой, содержащей новые результаты, значимые для машиностроительных производств, занимающихся изготовлением длинномерных деталей. По актуальности, научной новизне, практической значимости и объему выполненных исследований диссертационная работа соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.13 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Семенов Кирилл Олегович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.7. – Технологии и машины обработки давлением.

### Официальный оппонент:

Заведующий кафедрой металлургии,  
машиностроения и технологического оборудования,  
Череповецкий государственный университет,

д-р техн. наук, доцент



Болобанова Наталия Леонидовна

Докторская диссертация защищена по специальности:  
2.6.4. – Обработка металлов давлением

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Череповецкий государственный университет»,  
Адрес: 162600, Россия, Вологодская обл., г. Череповец,  
пр-т Луначарского, д. 5  
Тел.: 8 (8202) 51-83-05  
E-mail: nlbolobanova@chsu.ru



*Подпись Болобановой Н.Л. заверяю  
специалитет по кадровой А.М. Абдулмалова И.У.  
18.03.2026*