

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и инновациям

д.т.н., профессор

Филонов М. Р.

«25» марта 2026 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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

1. Актуальность темы

В современном машиностроении постоянно возрастают требования к эксплуатационным характеристикам механизмов и машин, включая точность, производительность и надежность. Ужесточаются требования к прямолинейности длинномерных осесимметричных деталей (валов, осей), широко применяемых в различных отраслях промышленности. Искривление таких деталей существенно влияет на качество готовых изделий и долговечность работы машины. Способы правки, основанные на поперечном изгибе, не всегда обеспечивают стабильность геометрии прецизионных изделий из-за неравномерности деформаций и возникновения остаточных напряжений.

Исследуемый автором метод правки растяжением с нагревом представляется перспективным технологическим вариантом, цель которого - создание равномерного напряженно-деформированного состояния металла заготовки и устранение кривизны длинномерных изделий. Однако применение этого метода сдерживается технологическими особенностями, которые связаны с процессом деформации при производстве и калибровке изделий. Неравномерность распределения остаточных напряжений и деформаций обусловлена неоднородностью исходных свойств материала, погрешностями геометрии исходной заготовки, неравномерностью температурного поля, а также внутренними закономерностями пластического течения.

Диссертационная работа Семенова К.О. является актуальной, поскольку направлена на исследование процессов пластического течения металла и оценку локализации деформаций при правке, результаты исследования использованы для развития методов управления процессом правки и повышения точности цилиндрических заготовок.

2. Структура и содержание работы

Диссертация включает введение, шесть глав основного текста, заключение, библиографический список и приложение. Общий объем работы составляет 249 страниц, содержит 147 рисунков и 32 таблицы. Список использованных источников насчитывает 175 наименований, содержание работы свидетельствует о глубокой проработке исследуемой проблемы.

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель и задачи исследования, определены объект и предмет научного поиска. Представлены положения, выносимые на защиту, раскрыта научная новизна и практическая значимость

полученных результатов.

В **первой главе** дан систематизированный обзор существующих технологий правки длинномерных изделий, включая методы поперечного изгиба, накатки и растяжения, как с нагревом, так и без него. Рассмотрены конструктивные особенности правильных машин и схемы нагружения. Особое внимание уделено анализу работ, посвященных правке растяжением с нагревом. На основе обзора обоснована перспективность применения данного метода для обеспечения требуемой геометрии заготовок и выбрано направление собственных исследований.

Во **второй главе** дан математический аппарат для описания процесса деформирования. Предложена распределенная реологическая модель, базирующаяся на модели Ишлинского с упрочнением. Отличительной особенностью разработанной модели является введение температурно-зависимых параметров, что позволяет учитывать неравномерность нагрева и неоднородность свойств по длине заготовки. Модель реализована в виде последовательно соединенных ячеек, что дает возможность анализировать локальные особенности деформирования, а не только интегральные характеристики.

В **третьей главе** представлен и подробно описан оптический метод контроля деформаций, основанный на технологии цифровой корреляции изображений (DIC). Приведено описание экспериментальной установки, даны характеристики используемой цифровой камеры Basler acA1440-73gc с сенсором Sony IMX273. Изложена методика калибровки оптической системы, включая оценку коэффициентов дисторсии. Описана процедура подготовки образцов с нанесением спекл-рисунка и обработки полученных изображений. Точность контроля смещений достигает 0,025 мм, что достаточно для решения поставленных технологических задач. Проведена апробация метода на цилиндрических образцах длиной до 350 мм.

В **четвертой главе** приведена разработанная комплексная методика оценки равномерности деформаций по длине заготовки. Для количественного анализа предложены коэффициенты локальности первого и второго рода, позволяющие оценивать степень концентрации деформаций на отдельных участках. На основе обработки экспериментальных данных установлена взаимосвязь между стадиями пластического течения (площадка текучести, линейное и параболическое упрочнение) и характером распределения деформаций. Выявлено, что при переходе к параболическому участку кривой упрочнения локальность деформаций возрастает в 1,5–2 раза. Показано, что наиболее равномерное деформирование при правке достигается на стадии линейного упрочнения металла, когда получаемые значения коэффициентов локальности степени минимальны.

В **пятой главе** показано применение современных методов обработки графической информации. С использованием нейро-нечеткой сети ANFIS построена модель зависимости коэффициента локальности степени деформации от технологических параметров (температуры, степени и скорости деформации). Визуализированы области оптимальных режимов правки для стали 12X18H10T и стали 35. Разработана методика прогнозирования стадий пластического течения по сигналу силового нагружения на основе рекуррентной нейронной сети LSTM, обеспечивающая точность классификации до 83% и прогнозирования до 92%.

В **шестой главе** рассмотрены практические аспекты применения разработанных

методов. Исследовано влияние правки растяжением с нагревом на точность геометрических параметров и жесткость заготовок. Экспериментально подтверждено снижение биения после правки в 1,4–4,0 раза (в зависимости от начальной кривизны). Показано, что правка растяжением с нагревом на первой и второй стадиях упрочнения кривой пластического течения повышает жесткость заготовок в 1,1–1,2 раза, способствует уменьшению деформации тела при последующей механической обработке и повышает точность изделий при точении на 10–17%.

Представлены результаты промышленного внедрения на машиностроительном предприятии г. Тольятти, дана оценка экономической эффективности предложенных технологических решений.

В **заключении** сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы, которые соответствующие поставленным задачам.

3. Научная новизна

В ходе научных исследований автором диссертации получены следующие результаты, обладающие научной новизной:

1. Разработана распределенная реологическая модель процесса правки растяжением с нагревом, базирующаяся на модели Ишлинского с упрочнением. Отличительной особенностью модели является введение температурно-зависимых параметров (модуля упругости и предела текучести) и представление заготовки в виде последовательно соединенных элементов с индивидуальным заданием свойств, что позволяет количественно оценивать влияние неравномерности температурного поля на распределение деформаций по длине изделия.

2. Предложен новый подход к моделированию коэффициента локальности деформирования с применением гибридной нейро-нечеткой сети ANFIS. В отличие от традиционных регрессионных методов, разработанная методика формирует систему лингвистических правил, обеспечивающую интерпретируемую взаимосвязь между технологическими параметрами и равномерностью деформаций, что создает основу для оптимизации режимов правки.

3. Впервые разработана методика прогнозирования стадий пластического течения по сигналу силового нагружения с использованием рекуррентной нейронной сети LSTM. Методика позволяет в режиме реального времени идентифицировать момент перехода к участку линейного упрочнения кривой пластического течения, характеризующейся максимальной равномерностью деформирования, что открывает возможность для создания адаптивных систем управления процессом правки.

4. Впервые для условий нагрева цилиндрических образцов длиной до 350 мм применен оптический метод цифровой корреляции изображений для контроля распределения фактических деформаций по длине тела. Разработанная методика обеспечивает регистрацию полей смещений с высокой точностью в реальном времени, что позволяет фиксировать процесс локализации деформаций непосредственно в процессе обработки тела.

5. На основе анализа полей смещений, полученных методом цифровой корреляции изображений, экспериментально обоснована зависимость степени однородности деформаций от стадии пластического течения при правке растяжением нагретой заготовки.

6. Установлены закономерности формирования равномерного деформационного поля, заключающиеся в возможности управления переходами между стадиями

пластического течения путем выбора температурно-скоростных параметров нагружения. Научно обоснована возможность повышения жесткости заготовок в 1,1–1,2 раза и исправления исходной кривизны со снижением биения в 1,4–4,0 раза за счет реализации режимов, соответствующих первой и второй стадиям упрочнения кривой пластического течения, что обеспечивает устойчивость процесса деформирования и повышает точность изделий при последующей механической обработке.

4. Практическая значимость

Разработанные автором методики и алгоритмы обладают высокой практической ценностью для машиностроительных предприятий, занимающихся изготовлением длинномерных маложестких валов.

Предложен комплексный подход к контролю и управлению процессом правки растяжением с нагревом. Разработанная методика позволяет в режиме реального времени с заданной дискретностью оценивать распределение деформаций по длине цилиндрических заготовок, что создает основу для оперативной корректировки технологических параметров правки заготовок.

На основе исследований обоснованы рациональные параметры правки для заготовок для стали 12X18H10T и стали 35. Применение необходимых режимов обеспечивает формирование равномерного поля деформаций и достижение требуемой геометрии заготовок.

Разработан алгоритм косвенной идентификации стадий пластического течения по параметрам силового нагружения, что позволяет контролировать процесс правки без применения сложных и дорогостоящих средств измерения, ориентируясь на доступные технологические параметры (усилие и перемещение).

Из представленных данных следует, что реализация разработанных режимов правки обеспечивает снижение биения заготовок после правки в 1,4–4,0 раза в зависимости от исходной кривизны, повышение жесткости деталей в 1,1–1,2 раза. Точность изделий после последующей токарной обработки повышается на 10–17% вследствие уменьшения упругих деформаций тела при точении.

Практическая значимость подтверждена внедрением в производственный процесс машиностроительного предприятия ООО «Токарка» (г. Тольятти). Разработанные рекомендации использованы на заготовительном этапе при правке с нагревом цилиндрических заготовок на гидравлической правильной машине, что подтверждено соответствующими актами внедрения. Годовой экономический эффект от внедрения результатов диссертационной работы составил 230 тыс. рублей.

5. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций

Обоснованность научных положений диссертации базируется на корректном применении фундаментальных положений механики деформируемого твердого тела, теории пластичности и современных методов математического моделирования.

Достоверность экспериментальных результатов обеспечена комплексным подходом к проведению исследований. При выполнении работы применялись взаимодополняющие методы контроля: прямыми механическими измерениями с использованием тензодатчиков, индикаторов, а также оптическим методом цифровой корреляции изображений, полученных калиброванной камерой Basler acA1440-73gc (сенсор Sony Pregius IMX273, разрешение 1,6 МП). Точность определения смещений

составляла до 0,025 мм, что подтверждено сопоставлением с показаниями контактных датчиков.

Установлена качественная сходимость расчетных зависимостей, полученных на основе разработанной реологической модели, с экспериментальными кривыми деформирования.

Основные результаты работы прошли апробацию на международных и всероссийских конференциях.

Совокупность перечисленных факторов позволяет считать научные положения и выводы диссертации обоснованными и достоверными.

6. Соответствие автореферата основному содержанию диссертации

Автореферат по форме, содержанию и оформлению соответствует требованиям ВАК РФ. Содержание и выводы автореферата соответствуют изложенным материалам в тексте диссертации.

7. Подтверждение основных результатов диссертации в научной печати

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 15 научных работах, в том числе 5 статей опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 3 публикации в изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science, а также 4 работы - в сборниках материалов научных конференций. Получено 3 патента на изобретения, подтверждающих новизну разработанных технических решений. Количество и уровень публикаций соответствуют требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

8. Положительные аспекты диссертационной работы

Исследование Семенова К.О. выполнено на высоком научном уровне и отличается комплексным подходом к решению поставленных задач. Особенностью работы является ее междисциплинарный характер, выражающийся в органичном сочетании фундаментальных положений теории пластичности, современных экспериментальных методов цифровой обработки изображений и использования нейросетевого моделирования.

Значительный объем экспериментальных исследований охватывает образцы, выполненные из конструкционных материалов 2х видов, из стали 35 и стали 12Х18Н10Т. Это обеспечило репрезентативность полученных данных и обоснованность выводов.

Достоинством работы является доведение результатов до практической реализации в условиях действующего производства.

9. Общие замечания по диссертации

1. Изучение микродеформаций металлов и сплавов предложенными оптическими методами, обработкой изображений может быть средством определения дополнительных параметров структуры металла, давать новые оценки процессам ОМД и термической обработки;

2. Значительная часть работы посвящена методике измерений локальных перемещений металла и освоении оптического контроля полей малых пластических деформаций, это несколько смещает акцент с заявленной темы по горячей правке металла;

3. В работе недостаточно полно показана связь исследуемых режимов обработки с эффективностью правки цилиндрического тела. Изучение величины «коэффициента локальности» может представлять интерес в специальных случаях, однако конечным результатом правки является кривизна длинномерного изделия, она может изменяться в результате снятия припуска при механической обработке и изменения поля остаточных

напряжений;

4. Использование термопистолета для нагрева растягиваемых образцов не позволяет обеспечить равномерное и стабильное температурное поле в объёме образца при его растяжении. Более обоснованным является использование испытательной машины с термокамерой и программируемых режимов нагружения, например с выдержкой под нагрузкой, вибронагружением и пр.;

5. Представленные результаты по снижению биения заготовок (до 0,07 мм при длине 320 мм) не сопровождаются указанием допустимых значений кривизны для данного класса деталей;

6. Указанные замечания не снижают ценности диссертационного исследования, не влияют на основные научные и практические результаты и не затрагивают основных положений, вынесенных соискателем на защиту.

10. Заключение

Диссертационная работа Семенова Кирилла Олеговича, «Повышение эффективности правки растяжением с нагревом на основе учета стадий пластического течения», является законченной научно-квалификационной работой, выполненная на актуальную тему. Поставленные задачи полностью выполнены, достоверность выводов по результатам работы сомнений не вызывает.

По поставленной цели и задачам исследования, основному содержанию и полученным результатам диссертационная работа Семенова К.О. соответствует паспорту научной специальности 2.5.7. «Технологии и машины обработки давлением».

Диссертационная работа соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.13 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Семенов Кирилл Олегович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.7. Технологии и машины обработки давлением.

Диссертационная работа Семенова К.О. обсуждена и отзыв на нее утвержден на заседании кафедры обработки металлов давлением Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», протокол № 7-4 от 24 марта 2026 года.

Отзыв составлен:

Заведующий кафедрой обработки металлов давлением,
Университет науки и технологий МИСИС,
кандидат технических наук, доцент



Алещенко А.С.

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,
Адрес: 119049, Россия, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4, стр. 1
Тел.: +7 (495) 955-00-32
E-mail: kancela@misis.ru
Адрес официального сайта: <https://misis.ru/>