

*На правах рукописи*



**НЕСТЕРОВ Андрей Викторович**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА  
ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПРОФИЛЯ НАГРЕТЫХ ПОКОВОК  
МЕТОДАМИ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ**

Специальность 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Рязань 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет» на кафедре «Автоматизация информационных и технологических процессов»

**Научный руководитель:** **Мусолин Александр Константинович,** доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизация информационных и технологических процессов» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет», г. Рязань

**Официальные оппоненты:** **Степанов Владимир Анатольевич,** доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Общая и теоретическая физика и МПФ» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина», г. Рязань

**Пронин Сергей Петрович,** доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные технологии» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», г. Самара

Защита состоится «12» марта 2019 г. в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д212.211.03 в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: **390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет» и на сайте [www.rsreu.ru](http://www.rsreu.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.211.03  
кандидат физико-математических наук, доцент

 **В.Г. Литвинов**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Кузнечно-штамповочное производство является одной из основных отраслей тяжелого машиностроения. Наиболее распространенным типомковки в данной отрасли является свободная машиннаяковка на молотах и прессах. Из 160 млн тонн годового выпуска стали в нашей стране ежегодно уходит в стружку около 8 млн тонн. Это издержки кузнечного производства, которое не всегда может обеспечить получение поковок без их значительной последующей обработки резанием. Таким образом, одной из основных задач, стоящих перед кузнечным производством, является экономия металла за счет повышения точностных характеристик поковок, получаемых в процессе свободной машиннойковки.

Несмотря на широкое внедрение средств механизации и автоматизации, определение геометрических размеров поковок и их формы во времяковки в большинстве случаев осуществляется при помощи ручных способов и визуального наблюдения.

Применение данных способов не обеспечивает требуемых точностных характеристик поковок и, как следствие, приводит к необходимости использования завышенных припусков и допусков при изготовлении поковки, что ведет к увеличению потерь металла на этапе обработки резанием послековки. Необходимость же остановки процессаковки для осуществления измерений приводит к увеличению времени процессаковки, перерасходу энергоресурсов для повторного нагрева поковки и снижению производительности ковочного оборудования.

Потребность повышения точности и производительности в процессе свободной машиннойковки ведет к необходимости применения методов и приборов для автоматизированного бесконтактного определения геометрических параметров нагретых поковок.

Использование существующих методов контроля профиля в таких системах применительно к определению профиля нагретых поковок ограничено физическими факторами и особенностями процесса свободной машиннойковки. Температура поковки может достигать высоких значений (до 1200 °С). Нагрев вызывает интенсивное свечение поверхности, которая представляет собой набор шероховатостей, распределенных случайным образом. На поверхности непрерывно идет процесс окисления и образование окалины. У поверхности нагретой поковки присутствуют конвективные потоки воздуха. Размер нагретых поковок достигает нескольких метров, поковки находятся в постоянном движении, невозможно надолго остановитьковку, так как это приведет к остыванию поковки, снижению производительности ковочного оборудования и перерасходу энергоресурсов на последующий нагрев.

Определение геометрических параметров объектов, в том числе профиля заготовок в промышленности, является областью, в которой эффективно используются методы компьютерного зрения. Применение данных методов позволяет создавать установки для определения профиля различных по типу и размерам объектов, а также решать задачи устранения влияния различных физических факторов на процесс контроля профиля. Данные качества позволяют применить методы компьютерного зрения для контроля профиля нагретых поковок в условиях воздействия физических факторов процессаковки.

Следует отметить, что воздействие приведенных ранее физических факторов и особенностей процессаковки в условиях действующего производства делает невозможным отладку алгоритмов обработки изображения нагретой по-

ковки, основанных на методах компьютерного зрения, непосредственно на ковочном оборудовании. Необходимо проведение экспериментальных исследований в лабораторных условиях – моделирование воздействия физических факторов процесса ковки на формирование изображения профиля поковки.

Таким образом, на сегодняшний день актуальной является научно-техническая задача контроля профиля нагретых поковок в условиях воздействия физических факторов процесса ковки и моделирование воздействия данных физических факторов на формирование изображения профиля поковки.

**Степень разработанности темы.** Вопросы контроля профиля объектов на основе методов компьютерного зрения в различных областях науки и техники рассмотрены в трудах таких отечественных и зарубежных авторов, как Сойфер В.А., Визильтер Ю.В., Duda P., Hart P., Gonzalez R., Woods R., Shapiro L., Stockman G., Huang T., Forsait D., Pons J. Следует отметить, что вопросы автоматизированного бесконтактного определения геометрических параметров, в том числе профиля, высокотемпературных объектов в промышленности недостаточно отражены в современной литературе.

**Цель и задачи диссертации.** Целью диссертации является разработка экспериментальной установки для моделирования воздействия физических факторов процесса ковки на формирование изображения профиля поковки и контроля данного профиля методами компьютерного зрения.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Обзор методов контроля профиля при производстве поковок.
2. Исследование физических факторов процесса ковки.
3. Анализ применения приборных методов для контроля профиля нагретых поковок в условиях процесса ковки.
4. Анализ применения методов компьютерного зрения для контроля профиля нагретых поковок в условиях процесса ковки.
5. Оценка влияния физических факторов процесса ковки на формирование изображения нагретой поковки.
6. Разработка методики моделирования воздействия физических факторов процесса ковки на формирование изображения нагретой поковки.
7. Определение структуры экспериментальной установки.
8. Выбор элементов для реализации экспериментальной установки.
9. Разработка алгоритмов на основе методов компьютерного зрения, позволяющих снизить влияние физических факторов процесса ковки на формирование изображения нагретой поковки.
10. Разработка программного обеспечения позволяющего проводить качественный и количественный анализ результатов применения полученных алгоритмов при моделировании воздействия физических факторов процесса ковки на формирование изображения нагретой поковки.

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

1. Количественно описано влияние физических факторов процесса ковки на формирование изображения нагретой поковки.
2. Разработана структура экспериментальной установки, позволяющей моделировать воздействие физических факторов процесса ковки на формирование изображения профиля поковки, проводить качественный и количественный анализ данного воздействия, а также осуществлять контроль профиля поковки методами компьютерного зрения.

3. Разработана методика моделирования воздействия физических факторов процессаковки на формирование изображения нагретой поковки.

4. Теоретически и экспериментально обосновано применение комплексной предварительной обработки изображения нагретой поковки, позволяющей снизить влияние физических факторов на формирование изображения поковки и получить изображение, пригодное для выделения лазерной сканирующей линии.

5. Решена проблема выделения лазерной сканирующей линии на изображении нагретой поковки при воздействии физических факторов процессаковки.

6. Предложен способ определения положения точек профиля на изображении нагретой поковки при воздействии физических факторов процессаковки.

На защиту выносятся **основные положения**:

1. Моделирование процесса нагрева и остывания поковки с соответствующим изменением цвета поверхности в видимом диапазоне, основанное на искусственном свечении модели поковки, позволяет реализовать применение методов компьютерного зрения для контроля ее профиля в диапазоне ковочных температур 550 – 1200 °С без непосредственного нагрева модели.

2. Предварительная обработка изображения нагретой поковки на основе комплексного применения методов медианной фильтрации и линейного растяжения шкалы яркости, позволяет снизить влияние физических факторов процессаковки на формирование изображения поковки и существенно повысить пиковое отношение сигнал / шум (ПОСШ) изображения (до 10 дБ).

3. Выбор порога бинаризации изображения нагретой поковки на основе определения зависимости величины оптимального порога от цвета поверхности нагретой поковки позволяет обеспечить выделение лазерной линии на поверхности поковки при динамически меняющейся температуре в диапазоне 550 – 1200 °С и повысить ПОСШ изображения на 10 – 17 дБ;

4. Анализ положения краевых точек выделенной лазерной линии, учитывающий наличие случайных пикселей в строках изображения нагретой поковки, обеспечивает снижение влияния помех на вычисление координат профиля поковки в диапазоне от 1,3 до 5 раз (в зависимости от степени зашумления изображения).

**Методы исследований и достоверность результатов.** В работе использованы методы компьютерного зрения для цифровой обработки изображений, теоретические исследования выполнены с использованием методов системного анализа и численных методов вычислений. Для проведения расчетов на ЭВМ использован пакет программного обеспечения Matlab. Программное обеспечение в диссертационной работе разработано на языке программирования C++. Достоверность результатов подтверждается экспериментальными исследованиями и практическим внедрением.

**Личный вклад.** Автор диссертации осуществлял постановку экспериментов и их проведение, обработку и интерпретацию экспериментальных результатов, разработку алгоритмов и программного обеспечения, разработку и сборку экспериментальной установки, написание научных статей и подготовку их к публикации, представлял доклады по теме диссертации на конференциях. Все основные результаты диссертационной работы, включая положения, выносимые на защиту, получены автором лично.

**Практическая ценность** подтверждается созданием экспериментальной установки, позволившей осуществить моделирование воздействия физических факторов процесса ковки на формирование изображения профиля поковки и контроль данного профиля методами компьютерного зрения. Моделирование позволило реализовать отладку алгоритмов обработки изображения нагретой поковки для контроля ее профиля в лабораторных условиях на основе разработанной программы для ЭВМ «Программа компьютерного зрения для контроля геометрических параметров поковок». Предложенные алгоритмы предназначены для использования в установке для контроля профиля нагретых поковок непосредственно на ковочном оборудовании, а также могут быть адаптированы для использования в других технических приложениях.

**Реализация и внедрение.** Предложенные в диссертации алгоритмы, методы и программные решения реализованы при выполнении НИОКР по договорам с ООО «НАНИТ» (г.Рязань) в рамках программы «УМНИК» и с ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (г. Москва) в рамках программы «УМНИК на СТАРТ».

Результаты диссертационной работы использованы в учебном процессе ФГБОУ ВО «РГРТУ» (г.Рязань), внедрены в ООО «СИНЭЛТ» (г.Рязань) и ОАО «Тяжпрессмаш» (г.Рязань).

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на международных, всероссийских и региональных научно-технических конференциях: XII Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании» (Рязань, 2007); V межвузовская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Новые технологии в учебном процессе и производстве» (Рязань, 2007); XV Международная научно-техническая конференция «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций» (Рязань, 2008); Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Приоритетные направления современной российской науки глазами молодых ученых (Рязань, 2009); I региональный итоговый конкурс «У.М.Н.И.К. – 2010» (Рязань, 2010); XV Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании» (Рязань, 2010); XVI Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (Рязань, 2011); XVIII Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (Рязань, 2013); Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Современные технологии в науке и образовании» (Рязань, 2016); XIII Конгресс «Кузнец – 2017» (Рязань, 2017); XXII Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (Рязань, 2017).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 20 работ: 6 статей (в том числе 4 статьи по списку ВАК), 12 тезисов докладов на международных, всероссийских и региональных конференциях, 1 патент, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (90 наименований) и приложений. Основной текст работы содержит 172 с., 98 рисунков и 16 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, определены степень разработанности темы, цели и задачи исследования, сформулированы научная новизна и основные положения, выносимые на защиту, обоснована практическая ценность работы, приведены данные о реализации, внедрении, апробации, сведения о публикациях, структуре и объеме работы.

**В первой главе** произведен обзор существующих методов контроля профиля при производстве поковок; исследованы физические факторы процессаковки, проведен анализ применения приборных методов и методов компьютерного зрения для контроля профиля нагретых поковок в условиях процессаковки.

Выявлено, что инструментальные измерения и визуальное наблюдение профиля поковок не обеспечивают требуемых точностных характеристик поковок и снижают производительность ковочного оборудования.

Исследование показало, что процессковки сопровождается физическими факторами (топология поверхности поковки, а также тепловое излучение, излучение поковки в видимом диапазоне и конвективные потоки воздуха), воздействие которых затрудняет процесс контроля профиля нагретых поковок при помощи существующих методов.

Анализ применения приборных методов контроля профиля показал, что все существующие в металлургии способы контроля профиля нагретых объектов в основном ориентированы на контроль горячего проката и не могут быть в своем неизменном виде применены для контроля профиля нагретых поковок в процессековки.

Анализ показал, что контроль профиля нагретых поковок в процессековки может быть осуществлен на основе применения оптических бесконтактных методов совместно с методами компьютерного зрения.

Показано, что тестирование элементов установки для контроля профиля нагретых поковок и отладка алгоритмов компьютерного зрения, программного обеспечения непосредственно на ковочном оборудовании в условиях действующего производства затруднены из-за воздействия физических факторов и особенностей технологического процессаковки.

С учетом результатов проведенного анализа в диссертационной работе выявлена необходимость разработки экспериментальной установки, позволяющей моделировать процесс воздействия физических факторов процессаковки на формирование изображения профиля поковки, а также проводить качественный и количественный анализ результатов моделирования.

В процессе разработки экспериментальной установки требуется выполнить ряд этапов:

1. Оценить влияние физических факторов процессаковки на формирование изображения нагретой поковки.
2. Разработать методику моделирования воздействия физических факторов процессаковки на формирование изображения нагретой поковки.
3. Определить структуру экспериментальной установки.
4. Выбрать элементы для реализации экспериментальной установки.

5. Разработать алгоритмы на основе методов компьютерного зрения, позволяющие снизить влияние физических факторов процессаковки на формирование изображения нагретой поковки.

6. Разработать программное обеспечение позволяющее проводить качественный и количественный анализ результатов применения полученных алгоритмов при моделировании воздействия физических факторов процессаковки на формирование изображения нагретой поковки.

**Во второй главе** исследовано влияние физических факторов процессаковки на формирование изображения нагретой поковки, разработана методика моделирования воздействия физических факторов процессаковки на формирование изображения поковки, определены структура и элементы экспериментальной установки. Выявлено наличие спекл-шума в области проекции лазерного луча на поверхность поковки, вызванного рассеянием и интерференцией в области проекции лазерного луча на поверхность поковки (рисунок 1).

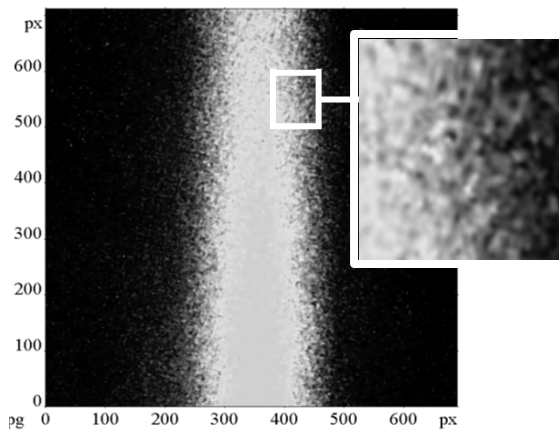


Рисунок 1 – Диффузное отражение лазерного излучения от поверхности поковки

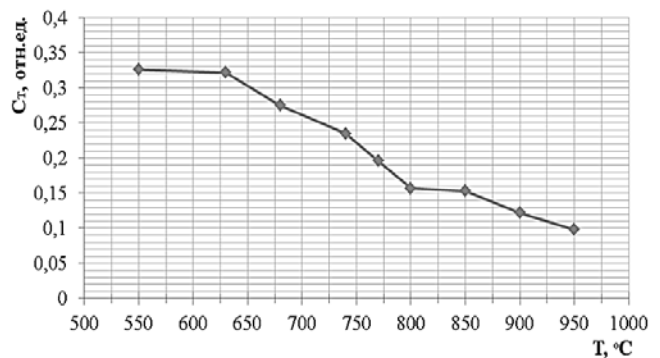


Рисунок 2 – График зависимости контрастности в локальной области изображения поковки от температуры поковки (для диапазона 550 – 950 °С)

Для оценки воздействия нагрева на контраст изображения поковки произведен расчет относительной контрастности в локальной области для температур, входящих в температурный диапазонковки, на основе формулы:

$$C_{от}^{(l)} = \frac{I_{max}^{(l)} - I_{min}^{(l)}}{255}, \quad (1)$$

где  $I_{max}^{(l)}$ ,  $I_{min}^{(l)}$  – максимальная и минимальная яркость пикселей, совпадающих с границей зоны перехода ( $l$ ) на границе проекции сканирующего лазерного луча на поверхности поковки. В результате получен график, представленный на рисунке 2.

Оценка влияния температуры нагрева на формирование изображения поковки выявила, что при увеличении температурыковки от 550 до 950 °С яркость поверхности нагретой поковки на изображении возрастает в 2 раза, а контрастность в локальной области перепада яркости на границе зоны перехода лазер – поверхность нагретой поковки уменьшается в 3 раза.

Нагрев поковки приводит к появлению непрерывных конвективных потоков, вызывающих явление рефракции, снижение контрастности изображения, размытие границ и уменьшение количества различимых деталей объектов. Для температур до начала свечения получен график, представленный на рисунке 3. Разработана методика моделирования воздействия физических факторов процессаковки на формирование изображения поковки (рисунок 4).



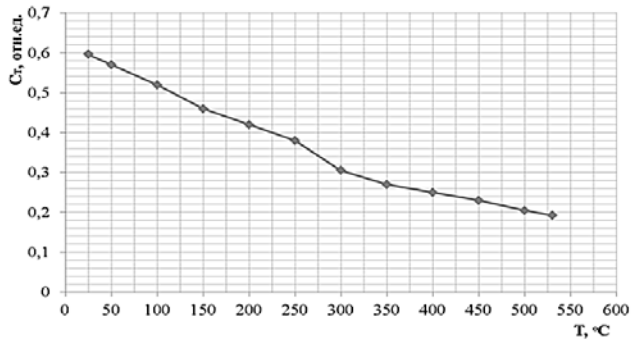


Рисунок 3 – График зависимости контрастности в локальной области изображения поковки от температуры поковки (для диапазона 25 – 530 °С)

В основе методики лежит зависимость между температурой нагрева поковки и длиной волны излучения поверхности поковки.

Моделирование процесса нагрева и остывания поковки с соответствующим изменением цвета поверхности в видимом диапазоне, основанное на искусственном свечении модели поковки, позволяет реализовать применение методов компьютерного зрения для контроля ее профиля в диапазоне ковочных температур 550 – 1200 °С без непосредственного нагрева модели. Для реализации предложенной методики моделирования определена структура (рисунок 5) и выбраны элементы экспериментальной установки.

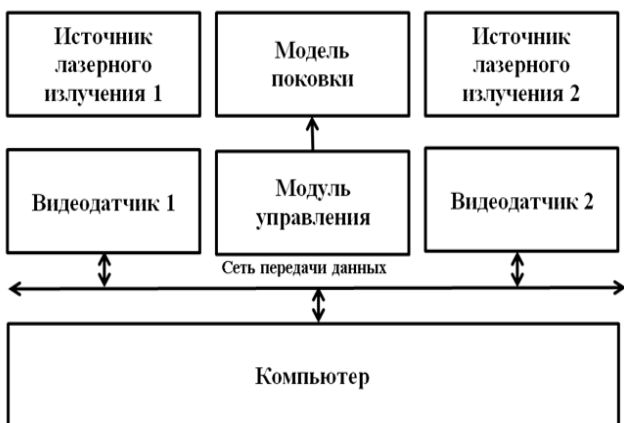


Рисунок 5 – Структура экспериментальной установки для контроля профиля нагретой поковки методами компьютерного зрения

Информация с видеодатчиков поступает в компьютер. Моделирование на экспериментальной установке позволит осуществить отладку алгоритмов обработки изображений нагретых поволоков в лабораторных условиях.



Рисунок 4 – Структура методики моделирования воздействия физических факторов процесса ковки на формирование изображения поковки

Основой модели является труба из органического стекла, оклеенная светорассеивающим покрытием, содержащая внутри трехканальные светодиоды RGB. При помощи модуля управления (трехканального регулятора яркости) имеется возможность получать любые цвета в цветовом пространстве RGB.

В качестве источников лазерного излучения применены два одномодовых лазерных модуля LG-H650-8-5 от ЗАО «ФТИ-Оптроник» (г. Санкт-Петербург). В качестве видеодатчиков применены две USB3.0 видеокамеры Basler acA2500-14uc с объективами BaslerLens C125-0818-5M.

**Третья глава** посвящена снижению влияния физических факторов процессаковки при контроле профиля нагретых поковок.

Наличие одновременного воздействия группы физических факторов (спекл-шум, видимое излучение и конвективные потоки воздуха) привело к необходимости разработки комплексного алгоритма предварительной обработки изображения нагретой поковки. В основе алгоритма лежит двустадийная обработка исходного изображения при помощи медианного фильтра и линейного растяжения шкалы яркости.

Для подавления аддитивного и мультипликативного гауссова шума наиболее часто применяется линейная сглаживающая фильтрация на основе фильтра Гаусса:

$$F(i, j) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\left(\frac{i^2+j^2}{2\sigma^2}\right)}, \quad (2)$$

где  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение гауссиана, измеряемое в расстоянии между пикселями. Эксперимент показал, что при использовании фильтра Гаусса размываются очертания и уничтожаются мелкодетальные особенности изображения поковки. Эффект размытия контуров был существенно снижен при применении медианной фильтрации:

$$F_{i,j} = \text{med}[E_{i+s,j+t}; (s, t) \in W], (i, j) \in Z^2, \quad (3)$$

где  $F(i, j)$  – элемент матрицы изображения после фильтрации,  $W_{s,t}$  – элемент массива апертуры изображения, имеющей размерность  $m \times n$ ,  $E_{i,j}$  – элемент матрицы исходного изображения. Результаты сравнения фильтра Гаусса и медианного фильтра в приложении к изображению поковки представлены в таблице 1. Из таблицы 1 следует, что применение медианного фильтра приводит к более эффективному подавлению шума на изображении нагретой поковки.

Таблица 1 – ПОСШ для фильтра Гаусса и медианного фильтра с различными окнами при обработке изображения поковки

Изображение	Фильтр Гаусса	Медианный фильтр
	ПОСШ, дБ	ПОСШ, дБ
Без фильтрации	14,555	14,555
Окно 3x3	16,881	18,096
Окно 7x7	17,267	20,000

Существует несколько основных методов повышения контрастности изображения. В данной работе рассмотрены: метод линейного растяжения шкалы яркости, метод эквализации гистограммы и метод адаптивного увеличения контрастности на основе локальных гистограмм. Структура предложенного алгоритма предварительной обработки изображений нагретых поковок представлена на рисунке 6. Оценка результатов воздействия рассмотренных методов повышения контрастности представлена на рисунке 7.

Из графиков на рисунке 7 следует, что лучшие результаты по критерию ПОСШ в основном диапазоне ковочных температур (740 – 1200 °С) обеспечивает алгоритм предварительной обработки на основе совместной работы медианного фильтра и линейного растяжения шкалы яркости изображения.

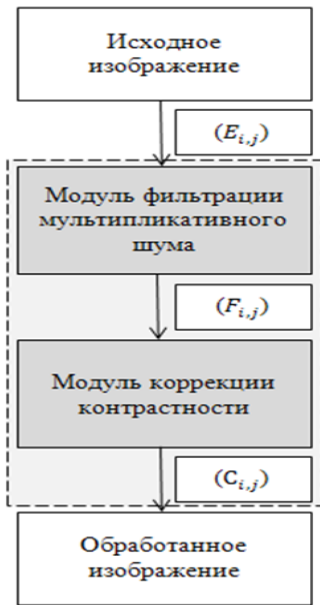


Рисунок 6 – Структурная схема алгоритма предварительной обработки изображения нагретой поковки

изображения поковки и существенно повысить ПОСШ изображения (до 10 дБ).

Применение предложенного алгоритма обеспечивает фильтрацию мультипликативной помехи без смазывания контуров проекции лазерного луча на поверхности поковки, а также коррекцию контрастности. Данный алгоритм позволяет снизить влияние физических факторов процессаковки на формирование

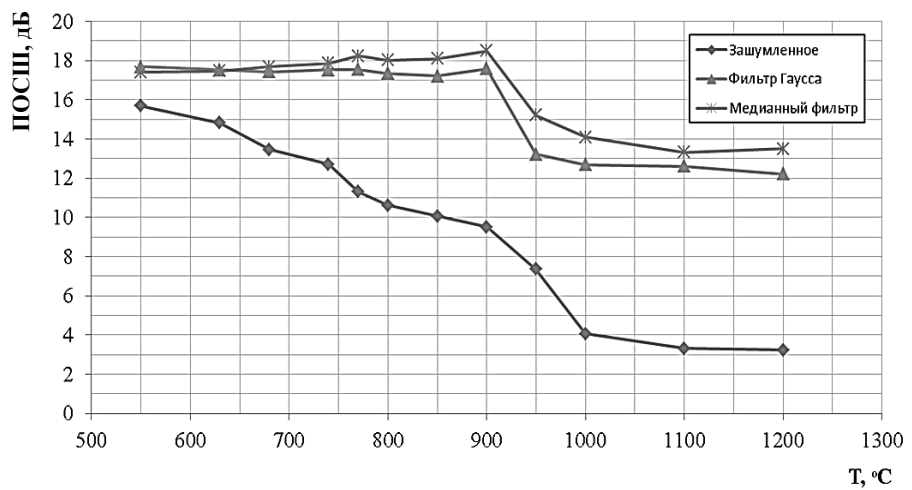


Рисунок 7 – Графики зависимости ПОСШ от моделируемой температуры поковки (фильтр + линейное растяжение шкалы яркости)

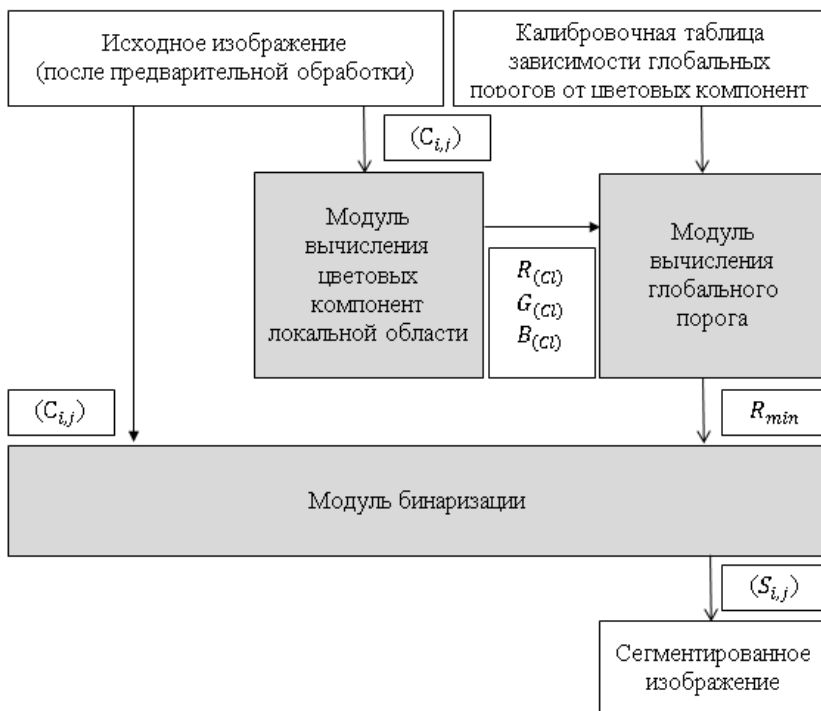


Рисунок 8 – Структурная схема алгоритма выделения лазерной сканирующей линии на изображении нагретой поковки

Далее произведен обзор характерных признаков и способов выделения лазерной сканирующей линии на изображении нагретой поковки. В результате обзора выявлено, что характерным признаком проекции лазерного луча на поверхности нагретой поковки является его цвет, а наиболее эффективными с точки зрения качества обработки и использования вычислительных ресурсов при выделении лазерной линии являются алгоритмы пороговой обработки и выделения краев.

Показано, что существующие алгоритмы (Оцу, метод адаптивной бинаризации, детектор краев Кэнни) дают хороший результат в том случае, когда объекты исследования имеют статичную яркость фона на изображении. Применение данных алгорит-

мов для выделения лазерной сканирующей линии на изображении нагретой поковки при динамическом изменении температуры, а следовательно и яркости фона, в процессековки приводит к существенному ухудшению результатов сегментации при определенных температурах нагрева.

Для выделения лазерной линии на фоне нагретой поковки с динамически изменяющейся температурой разработан алгоритм, сочетающий в себе достоинства глобальных алгоритмов пороговой сегментации и дающий хорошие результаты во всем диапазоне температур, соответствующих процессуковки.

В основе алгоритма – бинаризация с адаптивным глобальным порогом, вычисляемым на основе интерполяции данных зависимости величины глобального порога от цвета поковки. Структурная схема данного алгоритма представлена на рисунке 8. В системе определения профиля нагретой поковки применен полупроводниковый лазер с длиной волны 650 нм, что соответствует красному участку видимого диапазона. При пороговой обработке лазерный луч на изображении может быть выделен при бинаризации изображения, полученного из R канала исходного изображения. Для выходного изображения  $S$  справедливо, что яркость пикселя выходного изображения  $S(i, j) = 255$  при выполнении условий формулы (4) и  $S(i, j) = 0$  при всех прочих условиях.

$$\begin{cases} R_{min}(Srgb) < C_R(i, j) \leq 255 \\ 0 < C_G(i, j) \leq 255 \\ 0 < C_B(i, j) \leq 255, \end{cases} \quad (4)$$

где  $R_{min}(Srgb)$  – значение нижнего глобального порога для цветовой компоненты  $R$  пикселя  $C(i, j)$  входного изображения;  $Srgb$  – сумма цветových компонент локальной области пикселя  $C(i, j)$ ;  $C_R(i, j)$ ,  $C_G(i, j)$ ,  $C_B(i, j)$  – яркости (от 0 до 255) соответствующих цветových компонент пикселя  $C(i, j)$  – входного RGB изображения.

Алгоритм использует линейную интерполяцию массива значений глобального порога  $R_{min}$  и соответствующих  $Srgb$  из калибровочной таблицы 2:

$$R_{min}(S_{RGB}) = R_{min}(Srgb_i) + \frac{R_{min}(Srgb_{i+1}) - R_{min}(Srgb_i)}{(Srgb_{i+1} - Srgb_i)} (S_{RGB} - Srgb_i), \quad (5)$$

где  $i = 0, 1, 2, \dots, n$  в соответствии с данными таблицы 2.

Таблица 2 – Зависимость глобального порога  $R_{min}$  от суммы  $Srgb$  цветových компонент локальной области  $C_l$  (макет поковки, камера: F/5,6; 1/50)

N опыта	Температура, °C	Значения цветových компонент пикселей локальной области			Сумма (Rcl+Gcl+Bcl)	Значение нижнего глобального порога
		Rcl	Gcl	Bcl		
i	Ti				Srgb	Rmin
1	550	100	13	0	113	130
2	630	120	13	0	133	152
3	680	150	20	0	170	159
4	740	170	23	0	193	184
5	770	204	31	0	235	209
6	800	221	34	0	255	230
7	850	238	38	0	276	248
8	900	255	41	0	297	255
9	950	247	90	0	337	255
10	1000	239	165	109	513	246
11	1100	226	184	138	548	238
12	1200	227	185	161	573	233

Для каждой температуры  $T_i$  в калибровочной таблице подобраны значения глобального порога  $R_{min}$ , при которых обеспечивается максимальное качество сегментации на основе алгоритма бинаризация с нижним порогом.

Визуальная оценка результатов работы представлена на рисунке 9. Данные результатов работы разработанного алгоритма представлены на рисунке 10. Алгоритм позволяет обеспечить выделение лазерной линии на поверхности по-

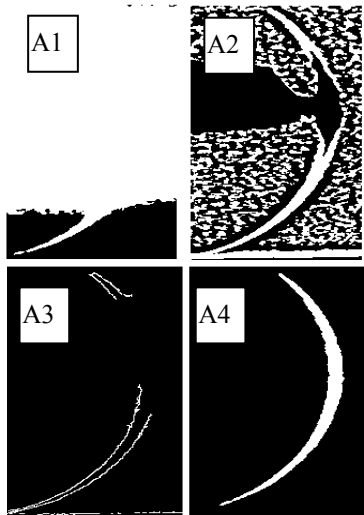


Рисунок 9 – А1–А4 – результат при 900 °С; А1 – Оцу; А2 – адаптивная бинаризация; А3 – Кэнни; А4 – разработанный алгоритм

ное сечение с высокой интенсивностью излучения в центре, убывающей к краям. На форму распределения интенсивности излучения оказывают влияние структура поверхности, нагрев объекта и прочие физические факторы. Следствием этого является проблема в определении положения точек на выделенной лазерной сканирующей линии, соответствующих профилю нагретой поковки.

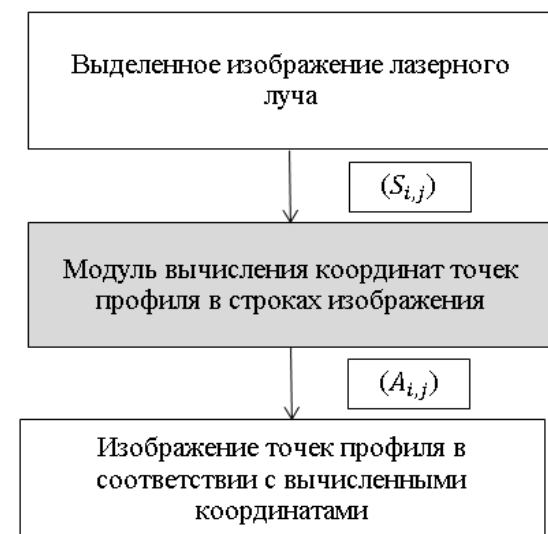


Рисунок 11 – Структурная схема алгоритма определения точек профиля

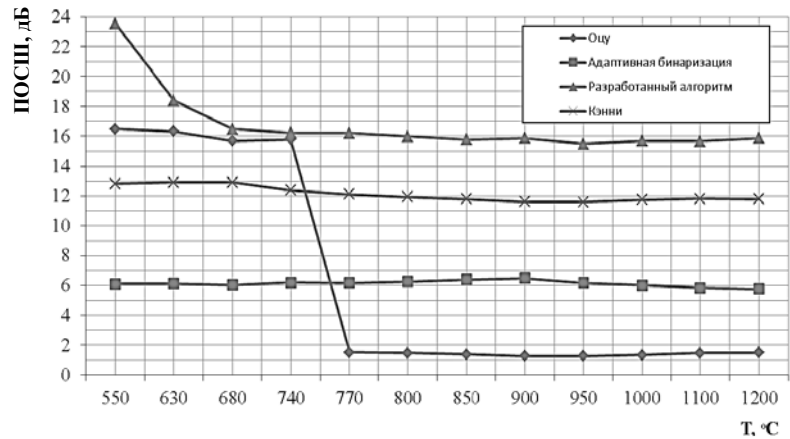


Рисунок 10 – Графики зависимости ПОСШ от моделируемой температуры поковки для различных алгоритмов сегментации

ковки при динамически меняющейся температуре в диапазоне 550 – 1200 °С и повысить ПОСШ изображения на 10 – 17 дБ.

Лазерная линия, проецируемая на поверхность поковки, в общем случае имеет поперечное сечение с высокой интенсивностью излучения в центре, убывающей к краям. На форму распределения интенсивности излучения оказывают влияние структура поверхности, нагрев объекта и прочие физические факторы. Следствием этого является проблема в определении положения точек на выделенной лазерной сканирующей линии, соответствующих профилю нагретой поковки.

Наибольшее распространение в системах контроля профиля, работающих в режиме реального времени, получил алгоритм поиска центра масс, основанный на вычислении для каждой строки  $j$  изображения:

$$i_{c.m.j} = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} i \times I_{i,j}}{\sum_{i=0}^{N-1} I_{i,j}}, \quad (6)$$

где  $i_{c.m.j}$  – значение координаты центра масс по оси  $i$  строки  $j$ ,  $N$  – количество пикселей в строке  $j$ ,  $I_{i,j}$  – значение функции распределения яркости  $i$  – го пикселя в  $j$  – й строке изображения.

Данный алгоритм хорошо работает в

условиях отсутствия помех на изображении нагретой поковки. Но при наличии помех, например импульсных на бинаризованном изображении, определение центра масс в строке изображения осуществляется с учетом пикселей, соответствующих помехам, что приводит к смещению найденной точки от положения, соответствующего действительной точке профиля поковки.

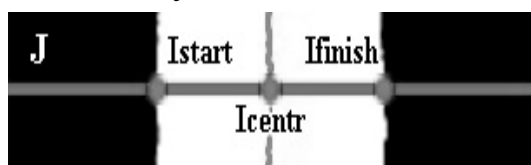


Рисунок 12 – Определение точек профиля поковки по крайевым точкам на бинаризованном изображении лазерного луча

В каждой строке  $J$  изображения расположена группа белых пикселей начиная от  $I_{start}(i_{start}, J)$  слева и заканчивая  $I_{finish}(i_{finish}, J)$  справа.

Это крайевые точки изображения лазерного луча в строке  $J$ . Координата  $i$  искомой точки  $I_{centr}(i_{centr}, J)$ , соответствующей точке профиля поковки для строки  $J$ , будет находиться из выражения:

$$i_{centr} = i_{start} + \frac{i_{finish} - i_{start}}{2}. \quad (7)$$

Условие принадлежности точки левой границе с учетом проверки граничных условий по нескольким пикселям в строке (улучшение помехозащищенности):

$$\begin{cases} I(i, j) = 0 \\ I(i + 1, j) > 0 \\ I(i + 2, j) > 0 \\ \dots \\ I(i + k, j) > 0 \end{cases} \quad k \in Z_+, \quad (8)$$

где  $k$  определяет минимальную длину связной области из последовательно расположенных белых пикселей, следующих за черным пикселем.  $k$  выбирается исходя из минимальной ширины выделенного изображения сканирующего лазерного луча и не должно его превышать. Для правой краевой точки:

$$\begin{cases} I(i, j) = 0 \\ I(i - 1, j) > 0 \\ I(i - 2, j) > 0 \\ \dots \\ I(i - k, j) > 0 \end{cases} \quad k \in Z_+. \quad (9)$$

Такой подход позволяет отсеять случайные единичные белые пиксели и группы пикселей (длиной менее  $k$ ), не имеющих отношения к изображению луча и не являющихся крайевыми для правой и левой его границы. Результат применения алгоритма для  $k=5$  в сравнении с алгоритмом поиска центра масс для различного уровня зашумленности представлен на рисунке 13. Из визуальной оценки результатов следует, что разработанный алгоритм определения точек профиля нагретой поковки обеспечивает лучшие результаты при существенном уровне шума. Для количественного сравнения результатов работы разработан-

ного алгоритма с алгоритмом поиска центра масс проведен анализ изображений, представленных на рисунке 13.

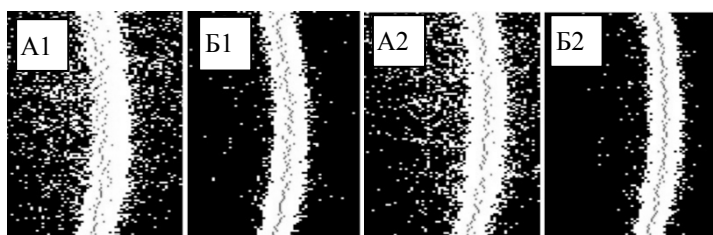


Рисунок 13 – А1, Б1 – алгоритм поиска центра масс при  $R_{min}=80$  и  $R_{min}=85$  соответственно; А2, Б2 – разработанный алгоритм ( $R_{min}=80$  и  $R_{min}=85$ )

Результат определения положения точек профиля в условиях наличия шума для обоих методов в сравнении с положением точек профиля в условиях отсутствия помех приведен в таблице 3.

Используя выражение:

$$D_{cp} = \frac{\sum_{j=0}^{j_{max}} d_j}{(j_{max} + 1)}, \quad (10)$$

где  $d_j$  – отклонение положения пикселя профиля поковки в строке  $j$  на зашумленном изображении от положения пикселя в строке  $j$  на незашумленном изображении профиля поковки,  $D_{cp}$  – среднее отклонение положения пикселя профиля поковки в строках с  $j = 0$  до  $j = j_{max}$  на зашумленном изображении от положения пикселя в строке  $j$  на незашумленном изображении профиля поковки, и данные таблицы 3, получаем результат сравнения (таблица 4).

Таблица 3 – Отклонение положения пикселя профиля поковки в строке  $j$  на зашумленном изображении от положения пикселя в строке  $j$  на незашумленном изображении профиля поковки для соответствующих алгоритмов

Строка	Алгоритм поиска центра масс		Разработанный алгоритм	
	$d_{j,px}$		$d_{j,px}$	
$j$	$R_{min}=80$	$R_{min}=85$	$R_{min}=80$	$R_{min}=85$
0	17	7	5	3
1	29	7	5	3
2	29	4	7	3
3	29	6	7	3
4	29	6	10	9
5	17	6	10	9
6	17	13	4	9
7	17	7	4	9
8	17	7	7	6
9	29	7	7	4
10	29	7	2	4
11	29	7	2	4
12	29	5	3	3
13	29	5	3	3
14	41	5	3	3
15	41	5	3	3

Таблица 4 – Среднее отклонение положения пикселя профиля поковки в строке  $j$  на зашумленном изображении от положения пикселя в строке  $j$  на незашумленном изображении профиля поковки для соответствующих алгоритмов

Алгоритм поиска центра масс		Разработанный алгоритм	
$D_{cp}, px$		$D_{cp}, px$	
$R_{min}=80$	$R_{min}=85$	$R_{min}=80$	$R_{min}=85$
26,75	6,50	5,13	4,88

Сравнение результатов работы алгоритма поиска центра масс и разработанного алгоритма показало лучшие результаты работы разработанного алгоритма. Применение данного алгоритма обеспечивает снижение влияния помех на вычисление координат профиля поковки в диапазоне от 1,3 до 5 раз (в зависимости от степени зашумления изображения).

**Четвертая глава** посвящена разработке программного обеспечения экспериментальной установки для контроля профиля нагретых поковок методами компьютерного зрения, его применению для контроля профиля нагретых поковок в процессековки и в прочих системах компьютерной обработки изображений промышленных изделий в условиях воздействия физических факторов при их производстве. Структура программного обеспечения имеет вид, представленный на рисунке 14. Разработка программного обеспечения (ПО) осуществлена в среде Microsoft Visual Studio 2013 на языке C++ с применением библиотек OpenCV.3.0 и BaslerPylon 4 SDK. Экспериментальная установка для контроля профиля нагретых поковок методами компьютерного зрения показана на рисунке 15.



Рисунок 14 – Структурная схема программного обеспечения экспериментальной установки

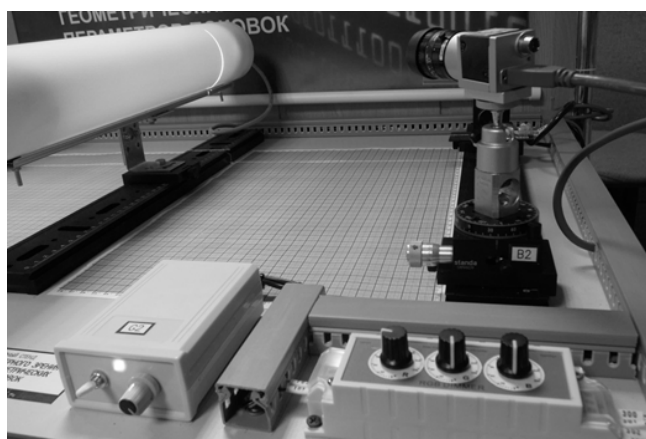


Рисунок 15 – Экспериментальная установка для контроля профиля нагретых поковок методами компьютерного зрения

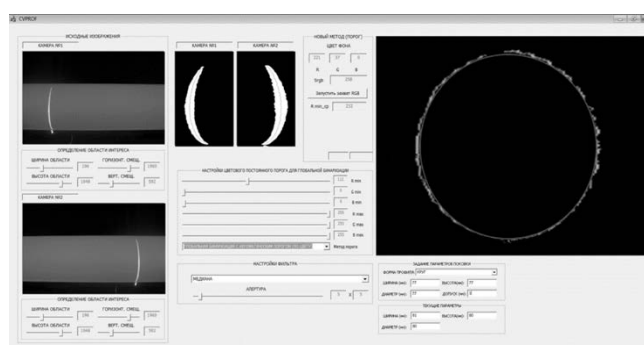


Рисунок 16 – Пользовательский интерфейс программного обеспечения экспериментальной установки

Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016610714 «Программа компьютерного зрения для контроля геометрических параметров поковок». Интерфейс программного обеспечения представлен на рисунке 16. Рассмотрено использование элементов разработанного программного обеспечения для прочих систем компьютерной обработки изоб-



ражений промышленных изделий в условиях воздействия различных физических факторов. Получен патент на полезную модель №26490 «Программно-аппаратный комплекс машинного зрения для определения и контроля ширины межвиткового зазора».

**В заключении** диссертации подводятся основные итоги работы:

1. Выполнен обзор существующих методов контроля профиля нагретых поковок в процессековки. Обзор показал, что визуальное наблюдение и инструментальное измерение профиля поковок не обеспечивают требуемых точностных характеристик поковок и снижают производительность ковочного оборудования.

2. Исследование показало, что процессковки сопровождается физическими факторами (топология поверхностиковки, тепловое излучениековки, излучениековки в видимом диапазоне и конвективные потоки воздуха у поверхностиковки), воздействие которых затрудняет процесс контроля профиля нагретых поковок при помощи существующих методов.

3. Выполнен анализ применения приборных методов контроля профиля, показавший, что все существующие в металлургии способы контроля профиля нагретых объектов в основном ориентированы на контроль горячего проката и не могут быть в своем неизменном виде применены для контроля профиля нагретых поковок в процессековки.

4. Выполнен анализ применения методов компьютерного зрения для контроля профиля нагретых поковок в условиях процессаковки, показавший, что контроль профиля нагретых поковок в процессековки может быть осуществлен на основе применения оптических бесконтактных методов совместно с методами компьютерного зрения.

5. Проведено исследование влияния топологии поверхности на формирование изображенияковки, выявившее наличие мультипликативного (спекл) шума в области проекции лазерного луча на поверхностьковки.

6. Произведена оценка влияния температуры нагрева на формирование изображенияковки, выявившая, что при увеличении температурыковки от 550 до 950 °С яркость поверхностинагретойковки на изображении возрастает в 2 раза, а контрастность в локальной области перепада яркости на границе зоны перехода лазер – поверхностьнагретойковки уменьшается в 3 раза.

7. Разработана методика, позволяющая проводить моделирование воздействия физических факторов процессаковки на формирование изображенияковки. Моделирование процесса нагрева и остыванияковки с соответствующим изменением цвета поверхности в видимом диапазоне, основанное на искусственном свечении моделиковки, позволяет реализовать применение методов компьютерного зрения для контроля ее профиля в диапазоне ковочных температур 550–1200 °С без непосредственного нагрева модели.

8. Предложен алгоритм предварительной обработки изображениянагретойковки на основе комплексного применения методов медианной фильтрации и линейного растяжения шкалы яркости, позволяющий снизить влияние физических факторов процессаковки на формирование изображенияковки и существенно повысить ПОСШ изображения (до 10 дБ).

9. Разработан алгоритм выделения лазерной сканирующей линии на изображениинагретойковки, в котором выбор порога бинаризации изображениянагретойковки осуществляется на основе определения зависимости величины оптимального порога от цвета поверхностинагретойковки. Алгоритм

обеспечивает выделение лазерной линии на поверхности поковки при динамически меняющейся температуре в диапазоне 550–1200 °С и позволяет повысить ПОСШ изображения на 10 – 17 дБ.

10. Разработан алгоритм определения положения точек профиля нагретой поковки. Данный алгоритм, основанный на анализе положения краевых точек выделенной лазерной линии, учитывающем наличие случайных пикселей в строках изображения нагретой поковки, обеспечивает снижение влияния помех на вычисление координат профиля поковки в диапазоне от 1,3 до 5 раз (в зависимости от степени зашумления изображения).

11. Разработано программное обеспечение, позволяющее проводить качественный и количественный анализ результатов применения полученных алгоритмов при моделировании воздействия физических факторов процессаковки на формирование изображения нагретой поковки и осуществлять контроль профиля модели поковки.

12. Реализована экспериментальная установка, позволяющая моделировать процесс нагрева и остывания поковки в диапазоне температур от 550 °С до 1200 °С, проводить качественный и количественный анализ изображения поковки, полученного в процессе моделирования, а также осуществлять контроль профиля поковки методами компьютерного зрения на основе разработанного программного обеспечения.

## **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Работы, опубликованные в научных журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий ВАК РФ**

1. Нестеров, А. В. Анализ методов цифровой обработки информации в системах компьютерного зрения / А. В. Нестеров // Вестник РГРТУ. – 2008. – №4 (выпуск 26). – С. 91–94.

2. Нестеров, А. В. Комплексная обработка изображений в системах машинного зрения в условиях машиностроительного производства / А. В. Нестеров // Вестник РГРТУ. – 2013. – №4 (выпуск 46). – С. 31–34.

3. Нестеров, А. В. Автоматизация процессов измерения и контроля ширины зазора при промышленном производстве фильтрующих элементов / А. В. Нестеров, А. К. Мусолин // Автоматизация и современные технологии. – 2013. – №12. – С.3–7.

4. Нестеров, А. В. Автоматизация процессов измерения и контроля формы поволоков при свободной механической ковке / А. В. Нестеров, А. К. Мусолин, С. М. Хориков // Автоматизация и современные технологии. – 2014. – №5. – С. 3–9.

### **Работы, опубликованные в сборниках трудов научно-технических конференций и в межвузовских сборниках**

5. Нестеров, А. В. Системы компьютерного зрения в промышленных технологических процессах / А. В. Нестеров // Межвузовский сборник научных трудов «Информационные технологии». – Рязань, 2011. – С.117–121.

6. Нестеров, А. В. Системы компьютерного зрения / А. В. Нестеров // Межвузовский сборник научных трудов «Методы и средства обработки и хранения информации». – Рязань, 2011. – С.17–25.

7. Нестеров, А. В. Обработка информации в системах машинного зрения и перспективы применения таких систем в области промышленности и сфере

информационных технологий / А. В. Нестеров // Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании : материалы XII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов, Рязань, 19–21 апреля 2007 г. / РГРТУ. – Рязань, 2007. – С.235–236.

8. Нестеров, А. В. Перспективы применения систем машинного зрения в сфере информационных технологий / А. В. Нестеров, А. К. Мусолин, А. А. Щукин // Новые технологии в учебном процессе и производстве : материалы V межвузовской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов, Рязань, 14–18 мая 2007 г. / Рязанский институт МГОУ (филиал). – Рязань, 2007. – С.23.

9. Нестеров, А. В. Анализ методов цифровой обработки информации в системах компьютерного зрения / А. В. Нестеров, А. К. Мусолин // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций : материалы XV Международной научно-технической конференции, Рязань, 13–15 февраля 2008 г. / РГРТУ. – Рязань, 2008. – С.144–146.

10. Нестеров, А. В. Универсальная система дистанционного управления электронными устройствами на основе компьютерного зрения / А. В. Нестеров // Приоритетные направления современной российской науки глазами молодых ученых : материалы Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, Рязань, 4–6 ноября 2009 г. / РГУ им. С. А. Есенина. – Рязань, 2009. – С.108–111.

11. Нестеров, А. В. Универсальная система промышленного компьютерного зрения / А. В. Нестеров // У.М.Н.И.К. – 2010 : тезисы докладов I регионального итогового конкурса, Рязань, 16 марта 2010 г. / РГРТУ. – Рязань, 2010. – С.34–40.

12. Нестеров, А. В. Системы компьютерного зрения в промышленных технологических процессах / А. В. Нестеров // Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании : материалы XV Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов, Рязань, 17–19 ноября 2010 г. / РГРТУ. – Рязань, 2010. – С.309–310.

13. Нестеров, А. В. Программная библиотека OpenCV в системах компьютерного зрения / А. В. Нестеров // Новые информационные технологии в научных исследованиях : материалы XVI всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов, Рязань, 16–18 ноября 2011 г. / РГРТУ. – Рязань, 2011. – С.269–270.

14. Нестеров, А. В. Устранение помех при измерении ширины зазора фильтрующих элементов средствами машинного зрения / А. В. Нестеров // Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании : материалы XVIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов, Рязань, 13–15 ноября 2013 г. / РГРТУ. – Рязань, 2013. – С.265–266.

15. Нестеров, А. В. Измерение геометрических параметров поковок в процессе свободной машиннойковки / А. В. Нестеров // Новые информационные технологии в научных исследованиях : материалы XVIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов, Рязань, 13–15 ноября 2013 г. / РГРТУ. – Рязань, 2013. – С.267–268.

16. Нестеров, А. В. Применение методов компьютерного зрения для неразрушающего контроля при производстве поковок / А. В. Нестеров, А. К. Мусолин // Современные технологии в науке и образовании : сборник трудов меж-

дународной научно-технической и научно-методической конференции, Рязань, 2–4 марта 2016 г. / РГРТУ. – Рязань, 2016. – Том 1. – С.272–275.

17. Нестеров, А. В. Автоматизированная система компьютерного контроля профиля нагретых поковок в процессе свободной машиннойковки / А. В. Нестеров, А. К. Мусолин, А. М. Володин, С. М. Хориков // Состояние и перспективы развития отечественных технологий обработки металлов давлением и оборудования кузнечно-прессового машиностроения : сборник научных статей и докладов XIII Конгресса «Кузнец-2017», Рязань, 12–15 сентября 2017 г. / РКА им. проф. А.И. Зимина. – Рязань, 2017. – С.127–137.

18. Нестеров, А. В. Метод и алгоритм распознавания точек профиля нагретой поковки в процессековки / А. В. Нестеров // Новые информационные технологии в научных исследованиях : материалы XXII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов, Рязань, 15–17 ноября 2017 г. / РГРТУ. – Рязань, 2017. – С.275–277.

#### **Патенты**

19. Программно-аппаратный комплекс машинного зрения для определения и контроля ширины межвиткового зазора : пат. 26490 Рос. Федерация : МПК G06K 9/46 / Нестеров А. В. (РФ). – № 2012128173/08 ; заявл. 03.07.2012 ; опубл. 27.03.2013, Бюл. № 9. – 1 с. : ил.

#### **Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ**

20. Программа компьютерного зрения для контроля геометрических параметров поковок : свидетельство о государственной регистрации ПрЭВМ 2016610714 Рос. Федерация / Нестеров А. В. ; заявитель и правообладатель ООО «СИНЭЛТ». – № 2015661325 ; заявл. 23.11.2015 ; опубл. 20.02.2016.

Нестеров Андрей Викторович

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПРОФИЛЯ НАГРЕТЫХ ПОКОВОК МЕТОДАМИ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 11.01.2019 г. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,25.

Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.