

На правах рукописи



Пивоварова Ксения Григорьевна

**МЕТОДОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ
МЕТИЗНОГО ПРОИЗВОДСТВА С ЭЛЕМЕНТАМИ РОБАСТНОГО
ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

Специальность 05.02.23 – Стандартизация и управление качеством продукции

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Магнитогорск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Научный консультант	доктор технических наук, профессор Корчунов Алексей Георгиевич
Официальные оппоненты:	Айдаров Дмитрий Васильевич, доктор технических наук, ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», кафедра «Техносферная безопасность и сертификация производств», профессор Лонщик Павел Абрамович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», кафедра автоматизации и управления, профессор Пантюхин Олег Викторович, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», кафедра «Технологические системы пищевых, полиграфических и упаковочных производств», доцент
Ведущая организация	ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Защита состоится «31» мая 2022 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.111.05 на базе ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по адресу: 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, МГТУ им. Г.И. Носова, малый актовзый зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и на сайте <https://magtu.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Полякова Марина Андреевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Метизное производство является крупной отраслью современной индустрии с довольно сложными производственными процессами и оборудованием. Выпускаемый сортамент включает около 90 тыс. типоразмеров продукции более чем из 180 марок стали. Метизы, представляющие стандартизованные металлические изделия разнообразной номенклатуры, используются во многих отраслях промышленности – от строительства до машиностроения, поэтому процессы производства и требования к качеству продукции метизного производства достаточно разнообразны и специфичны.

Технологический процесс производства металлических изделий представляет собой комплекс взаимосвязанных процессов, осуществляющих глубокую переработку продукции. Интенсивное развитие метизного производства в настоящее время приводит к необходимости рассмотрения производственных процессов как сложных систем, состоящих из множества технологических операций, реализующих методы обработки различной физико-химической природы. В таких системах управление качеством продукции, связанное с анализом и обработкой больших объемов разнородной информации, усложняется из-за возникающей на различных уровнях технологической системы неопределенности данных, вызываемой входными возмущениями. Для выбора, обоснования и построения эффективной технологической схемы, обеспечивающей достижение заданного уровня свойств конечной продукции, при проектировании многостадийного процесса производства необходимо учитывать неполноту информации в условиях воздействия возмущающих факторов.

Существующие методологии управления качеством продукции метизного производства предусматривают широкое использование экономических, организационных, технических, технологических и других методов. Однако они недостаточно эффективны при решении практических задач в условиях существующей параметрической неопределенности, так как не учитывают влияние возмущающих факторов. В связи с этим возникает потребность в разработке методологии, позволяющей организовать поддержку принятия решений в условиях неопределенности, обеспечить оперативность и точность информации для управления качеством продукции метизного производства.

Одним из приоритетных и активно развивающихся направлений в настоящее время является робастный подход, который обеспечивает решение задач управления качеством продукции для теоретически недостаточно изученных технологических систем, подверженных различным видам возмущающих воздействий. Разработка, адаптация и применение данного подхода для производства металлических изделий позволит снизить производственные вариации путем выбора оптимальных технологических режимов, а следовательно, повысить устойчивость процесса к воздействиям возмущающих факторов.

Это определяет актуальность разработки и применения научно обоснованного методологического инструментария с элементами робастного подхода для управления качеством продукции при проектировании новых и совершенствовании действующих технологических процессов метизного производства.

Степень разработанности темы исследования

Материалы диссертации опираются на научные труды многих исследователей научных, образовательных учреждений, промышленных предприятий: Белорусский национальный технический университет (Минск), Брянский государственный технический университет, Вологодский государственный университет, Институт проблем управления имени В.А. Трапезникова РАН (Москва), Иркутский государственный технический университет, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Московский авиационный институт, Национальный университет «Запорожская политехника», Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева (Красноярск), Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова (Москва), Тамбовский государственный технический университет, Тольяттинский государственный университет, Томский политехнический университет, Тульский государственный университет, Юго-Западный государственный университет (Курск), АО «АвтоВАЗ» (Тольятти), АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева (Железногорск), АО «Кордиант» (Ярославль), АО «Ракетно-космический центр «Прогресс» (Самара), ЗАО «Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем» (Нижний Новгород), ОАО «Магнитогорский метизно-калибровочный завод «ММК-МЕТИЗ», ООО «Русэлпром» (Москва), Beihang University (Пекин, Китай), Bundelkhand Institute of Engineering & Technology (Джханси, Индия), Hanoi University of Industry (Ханой, Вьетнам), Nagaoka University of Technology (Нагаока, Япония), Sultan Qaboos University (Маскат, Оман), Universiti Kebangsaan Malaysia (Банги, Малайзия), Universiti Teknikal Malaysia Melaka (Малакка, Малайзия), University of Dar es Salaam (Дар эс-Салам, Танзания), University of Ottawa (Оттава, Канада) и др.

Большой вклад в становление и развитие теории и практики управления качеством продукции внесли Ю.П. Адлер, В.Н. Азаров, Г.Г. Азгальдов, О.К. Антонов, И.З. Аронов, В.А. Барвинок, В.Я. Белобрагин, Б.Л. Бенцман, В.М. Бехтерев, Б.В. Бойцов, В.В. Бойцов, А.А. Богданов, А.Я. Боярский, В.А. Васильев, В.Г. Версан, Г.П. Воронин, А.В. Гличев, Б.В. Гнеденко, Э. Голдратт, Г.С. Гун, Э. Деминг, Дж. Джуран, Л.А. Долгих, П. Друкер, Б.А. Дубовиков, Е.А. Ерманский, Ю.А. Зыков, К. Исикава, З.Н. Крапивенский, Ф. Кросби, Ю.Л. Кураченко, В.А. Лapidус, В.М. Ларин, Д.С. Львов, В.В. Окрепилов, О.В. Олешко, И.Г. Резник, В.И. Седов, Г. Тагути, Ф. Тейлор, Д.Л. Томашевич, А.И. Улицкий, М.В. Федоров, А. Фейгенбаум, Г. Форд, Дж. Харрингтон, И.И. Чайка, Н.Ф. Чарновский, В.М. Шкловский, Я.Б. Шор, В. Шухарт, Л.Я. Шухвальтер и многие другие ученые.

В работах Ю.В. Брагина, Ю.А. Вашукова, Г.С. Вересникова, И.В. Волокитиной, А.Я. Дмитриева, П.А. Дронова, Е.А. Жирнова, Р.С. Загидуллина, А.А. Ивахненко, Г.Г. Кобко, О.А. Курченко, А.Н. Лисенкова, О.В. Луценко, Т.А. Митрошкиной, А.Д. Немцева, Д.В. Нестеренко, В.Б. Протасьева, К.Л. Разумова-Раздолова, П.С. Серенкова, Я.И. Солера, Г.В. Табунщик, В.Е. Токарева, Е.Э. Фельдштейна, Л.М. Червякова, Ю.К. Черновой, В.В. Щипанова, Т. Agrawal, М. Balaji, Р. Bharath, Y. D. Chethan, М. Durairaj, А. Elias-Zuñiga, R. Gautam, Н. Hanizam, М. Hernández-Avila, Z. Hussain, V. S. Jatti, S. Khan, Нuu-Phan Nguyen, М. А. Razak, М. S. Salleh, J. Sudeepan, S. Tilekar и многих других специалистов были рассмотрены вопросы теории и практики управления качеством продукции с применением робастного параметрического проектирования. Несмотря на многочисленные исследования отечественных и зарубежных ученых в данной области, до сих пор не было предложено комплексной методологии управления качеством продукции метизного производства, учитывающей влияние возмущающих воздействий.

Целью работы является разработка и реализация методологии управления качеством металлических изделий с элементами робастного параметрического проектирования для повышения устойчивости технологических процессов метизного производства к возмущающим воздействиям и обеспечения заданного уровня свойств готовой продукции.

Для поставленной указанной цели поставлены следующие **задачи**:

1. Разработать методологический подход к управлению качеством продукции, реализующий возможности робастного параметрического проектирования применительно к технологическим процессам метизного производства.

2. Формализовать процедуры идентификации возмущающих факторов и количественной оценки их влияния на комплекс показателей качества продукции и параметры управления в технологиях метизного производства.

3. Разработать научно-обоснованные критерии устойчивости технологических процессов к возмущающим воздействиям, учитывающие особенности метизного производства и множественность показателей качества.

4. Разработать процедуру робастного параметрического проектирования в технологиях метизного производства с целью обеспечения заданного уровня качества готовой продукции.

5. Разработать математические модели управления показателями качества металлических изделий, используемые для параметрической оптимизации технологических процессов метизного производства.

6. С применением предложенной методологии решить практические задачи по управлению качеством продукции при разработке новых и совершенствовании действующих технологических процессов метизного производства на примере изготовления калиброванной стали, стабилизированных арматурных канатов, высокопрочной арматуры.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана методология управления качеством металлических изделий, реализующая возможности робастного параметрического проектирования применительно к технологическим процессам метизного производства, на основе определения режимов обработки, устойчивых к воздействиям возмущающих факторов и обеспечивающих заданный уровень свойств готовой продукции.

2. Предложена и формализована процедура идентификации возмущающих воздействий в технологических процессах метизного производства и матрица для оценки влияния возмущающих факторов на показатели качества продукции и параметры процесса.

3. Разработана комплексная система количественной оценки технологической неопределенности в процессах метизного производства на основе авторской классификации возмущающих факторов, учитывающей источники их возникновения и объект воздействия.

4. Обоснованы и формализованы критерии, позволяющие оценить степень устойчивости технологических процессов метизного производства к воздействиям возмущающих факторов при управлении качеством продукции.

5. Разработаны математические модели управления показателями качества металлических изделий в технологических процессах обработки калиброванной стали, стабилизированных арматурных канатов, высокопрочной арматуры, обеспечивающие заданный уровень потребительских свойств продукции.

6. Получены новые научные знания о формировании показателей качества в технологических процессах обработки калиброванной стали, стабилизированных арматурных канатов, высокопрочной арматуры с учетом влияния возмущающих воздействий.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Предложены методики идентификации возмущающих воздействий применительно к процессам метизного производства, позволяющие выявить наиболее существенные возмущающие факторы, влияющие на неопределенность показателей качества, и предпринять целенаправленные действия по ее снижению.

2. Разработан методический подход количественной оценки неопределенности показателей качества и параметров управления процессом в зависимости от возмущающих воздействий оборудования, персонала, метода управления и измерительной системы.

3. Решена задача параметрической оптимизации технологических процессов производства калиброванной стали, стабилизированных арматурных канатов, высокопрочной арматуры на основании разработанного показателя технологической устойчивости с учетом значимости показателей качества.

4. Подготовлены к практическому использованию методики управления показателями качества калиброванной стали, арматурных канатов, высоко-

прочной арматуры, позволяющие существенно сократить время на анализ и принятие решений по обеспечению заданного уровня качества готовой продукции.

5. Результаты диссертационной работы внедрены в ОАО «Магнитогорский метизно-калибровочный завод «ММК-МЕТИЗ», АО «Белорецкий металлургический комбинат», АО «Композит» (Королев), АО «Научно-исследовательский центр «Строительство» (Москва), ООО «БИЗНЕС-КОНСАЛТ» (Тольятти), используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» для подготовки обучающихся по направлениям 22.03.02 Металлургия (уровень бакалавриата), 22.04.02 Металлургия (уровень магистратуры).

Методология и методы исследования

Теоретические и расчетно-экспериментальные исследования возмущающих факторов в технологических процессах метизного производства выполнены на основе многомерных статистических методов, методов планирования экспериментов, методов робастного параметрического проектирования, серого реляционного анализа, теории случайных процессов, квалиметрических методов оценки качества.

Положения, выносимые на защиту:

1. Концепция управления качеством металлических изделий, отличающаяся использованием принципов робастного параметрического проектирования в технологиях метизного производства.

2. Формализация понятий «технологическая неопределенность», «показатель технологической устойчивости», определяющих логическую связь между целевыми критериями и разработанными математическими моделями для получения количественной оценки робастности при управлении качеством продукции в технологиях метизного производства.

3. Комплексный подход к поддержке принятия решений в задачах управления качеством продукции, связанных с повышением технологической устойчивости к возмущающим воздействиям при разработке новых и совершенствовании действующих технологических процессов метизного производства.

4. Результаты практической апробации и внедрения методологии управления качеством металлических изделий с элементами робастного параметрического проектирования в технологиях изготовления калиброванной стали, стабилизированных арматурных канатов, высокопрочной арматуры с заданным уровнем свойств.

Степень достоверности и апробация результатов

Обоснованность результатов диссертационного исследования подтверждается адекватно применяемыми методами математического моделирования; логичностью формулировок; отсутствием противоречий между разработанным подходом и теоретическими и практическими знаниями, полученными другими исследователями; проведением численных экспериментов, подтверждающих теоретические разработки автора. Достоверность подтверждается использованием современных представлений об оценке качества технологических систем, многомерных статистических методов, теории вероятностей.

Основные положения диссертации были доложены и обсуждены на: V и X Конгрессах прокатчиков (Череповец, 2003 г.; Липецк, 2015 г.); III, IV и V Школах-семинарах «Фазовые и структурные превращения в сталях» (Кусимово, Башкортостан, 2003, 2004, 2006 гг.); II Международной научно-технической конференции «Механика пластического формоизменения. Технологии и оборудование обработки материалов давлением» (Тула, 2004 г.); Международной научно-технической конференции «Теория и технология процессов пластической деформации» (Москва, 2004 г.); IV, V и VI Международных научно-технических конференциях молодых специалистов (Магнитогорск, 2004-2006 гг.); Международной научно-технической конференции «Образование через науку» (Москва, 2005 г.); Международной научно-технической конференции «Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов» (Санкт-Петербург, 2005, 2007 гг.); научно-технической конференции «Новые стали для машиностроения и их термическая обработка» (Тольятти, 2011 г.); XXI Международной конференции по металлургии и материаловедению «METAL 2012» (Брно, Чехия, 2012 г.); XII Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство» (Старый Оскол, 2015 г.); XVI Международной научной конференции «New Technologies and Achievements in Metallurgy, Material Engineering and Production Engineering» (Ченстохова, Польша, 2015 г.); VIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Наследственность в литейно-металлургических процессах» (Самара, 2018 г.); Международной научно-технической конференции «Функциональные материалы: прогнозирование свойств и технологии изготовления» (Пермь, 2019); национальной научной конференции «Современные достижения университетских научных школ» (Магнитогорск, 2020 г.); V Международной молодежной научно-технической конференции «Magnitogorsk Rolling Practice 2020» (Магнитогорск, 2020 г.); I Национальной научно-практической конференции «Современные проблемы и перспективы развития науки, техники и образования» (Магнитогорск, 2020); ежегодных научно-технических конференциях «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (Магнитогорск, 2002-2006, 2011-2021 гг.).

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в 65 публикациях, из них 20 статей в журналах из Перечня, рекомендованного ВАК РФ, 5 статей в журналах, индексируемых в международных базах Scopus и Web of Science, 1 монография, 1 патент на изобретение, 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 345 наименований и 7 приложений, изложена на 275 страницах машинописного текста, включает 104 рисунка, 82 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов, изложены основные положения, выносимые на защиту и сведения об апробации работы.

В первой главе рассмотрены современные принципы и подходы к управлению качеством металлоизделий. Исследованиям в области управления и обеспечения качества в технологических процессах производства металлоизделий посвящены труды отечественных и зарубежных ученых. Известные авторы в этом направлении Ю.П. Адлер, Г.Г. Азгальдов, А.Г. Варжапетян, Э.М. Голубчик, Г.С. Гун, А.Г. Ивахненко, А.Г. Корчунов, М.А. Полякова, В.Б. Протасьев, Г.Ш. Рубин, М.В. Чукин, P. Bharath, M. Durairaj, V.G. Sridhar, D. Sudharsun, G. Taguchi и многие другие.

Отмечается, что одной из существующих проблем выбора, обоснования и построения эффективной многостадийной технологии производства является неопределенность данных на различных иерархических уровнях сложной системы, вызываемая воздействиями возмущающих факторов.

В известных моделях и методах управления качеством продукции метизного производства отсутствуют алгоритмы обоснованного принятия решений по организации производства в условиях воздействия возмущающих факторов, которые оказывают существенное влияние на показатели качества продукции и должны учитываться при разработке и совершенствовании технологических процессов метизного производства.

Проведенный анализ известных подходов к количественному оцениванию качества продукции метизного производства выявил отсутствие обобщенного показателя устойчивости технологического процесса к возмущающим воздействиям. Решение этой задачи делает возможным проведение всестороннего и глубокого анализа технологии производства и разработку организационно-технических мероприятий, направленных на обеспечение заданного уровня свойств готовой продукции.

В настоящее время широко применяется методология робастного параметрического проектирования, позволяющая решать задачи оптимизации технологических процессов, подверженных различным видам возмущающих воздействий. Применительно к задачам управления качеством продукции метизного производства указанный подход дает следующие преимущества:

1. Уменьшение разброса значений показателей качества путем повышения устойчивости технологических процессов к возмущающим воздействиям.
2. Возможность проектирования технологии на основании малого объема статистической информации.
3. Возможность улучшения качества продукции без существенного увеличения производственных затрат.
4. Учет индивидуальных требований потребителей при проектировании технологического процесса.

В настоящее время руководством по применению оптимизационного метода робастного параметрического проектирования является национальный стандарт ГОСТ Р ИСО 16336-2020 «Статистические методы. Применение к новым технологиям и процессу разработки продукции. Робастное параметрическое проектирование (RPD)». Анализ стандарта показал, что в нем слабо проработаны вопросы достижения устойчивости к производственным вариациям («шумам изготовления»), что затрудняет его применение для промышленных технологий. Стандарт малоинформативен и не отражает весь спектр необходимых действий по этапам применения методов для случая множественности показателей качества продукции. Кроме того, в нем отсутствуют примеры применения методологии робастного параметрического проектирования к многостадийным процессам производства.

Таким образом, методология робастного проектирования в ее существующем виде не может применяться в метизном производстве, поэтому целесообразно провести работы по ее усовершенствованию и адаптации к новым и действующим технологическим процессам.

Проведенный анализ подходов к организации управления качеством продукции в технологиях метизного производства с учетом возмущающих воздействий позволил сформулировать ряд ключевых направлений, реализованных в диссертационном исследовании:

- разработка процедур идентификации возмущающих факторов и оценки их влияния на качество продукции метизного производства;
- разработка критериев, позволяющих оценить степень устойчивости технологических процессов метизного производства к воздействиям возмущающих факторов;
- разработка методологии управления качеством металлических изделий, реализующей возможности робастного параметрического проектирования применительно к многостадийным процессам метизного производства.

Во второй главе предложен методологический подход к управлению качеством продукции, реализующий возможности робастного параметрического проектирования применительно к технологическим процессам метизного производства.

Разработка технологического процесса метизного производства, обеспечивающего достижение заданного уровня свойств продукции в условиях параметрической неопределенности, представляет собой решение сложной задачи, состоящей из концептуальной стадии, которая заключается в определении цели и выборе целевых критериев и стадии моделирования, состоящей из этапов построения, анализа и оптимизации модели технологического процесса.

В соответствии с робастным подходом цель проектирования технологического процесса заключается в обеспечении выпуска продукции требуемого качества с минимальными потерями для потребителя. Целевой критерий функционирования технологического процесса метизного производства зависит от параметров управления, структуры технологического процесса и возмущающих факторов. В соответствии с поставленной целью критерий должен обеспечивать робастность процесса, т.е. устойчивость технологического процесса к возмущающим воздействиям.

В целом технологический процесс метизного производства как объект управления реализуется в структуре параметров «вход-выход» как двумерный случайный процесс. Входные параметры можно разделить на регулируемые, относящиеся к управлению процесса, и нерегулируемые, относящиеся к характеристикам сырья, в то время как выходные параметры относятся к качеству готовой продукции.

В общем виде структурную схему технологического процесса метизного производства можно представить в виде модели «черного ящика» (рисунок 1), где $\mathfrak{M}(\cdot)$ – оператор модели технологического процесса метизного производства; $g(\cdot)$ – оператор технологических ограничений; \mathfrak{X} – технологическая схема процесса; $v = (v_1, v_2, \dots, v_p), v \in V$ – вектор характеристик входных материалов; $u = (u_1, u_2, \dots, u_k), u \in U$ – вектор параметров управления технологическим процессом; $\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_\alpha), \xi \in E$ – вектор возмущающих факторов; $y = (y_1, y_2, \dots, y_n), y \in Y$ – вектор показателей качества готовой продукции.

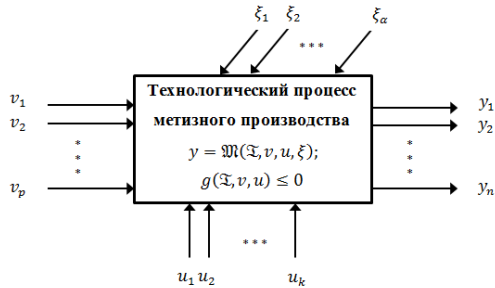


Рисунок 1 – Параметрическая схема технологического процесса метизного производства

Таким образом, математическую модель, описывающую процесс формирования показателей качества продукции, можно представить в виде функции параметров управления, характеристик материала и возмущающих факторов

$$y = \mathfrak{M}(u_1, \dots, u_k; v_1, \dots, v_p; \xi_1, \dots, \xi_\alpha), \quad (1)$$

где u_k – k -й параметр управления; v_p – p -я характеристика материала; ξ_α – α -й возмущающий фактор.

Производственные процессы метизной отрасли включают в себя множество операций, которые базируются на взаимодействии методов различной физико-химической природы (например, травление, обработка давлением, термическая обработка и др.), что затрудняет получение адекватной аналитической модели. Поэтому в настоящей работе для получения математических моделей для управления свойствами конечной продукции был использован экспериментальный подход.

Поскольку большинство возмущающих факторов в метизном производстве являются неуправляемыми, изучить их воздействие в ходе планируемого эксперимента представляется затруднительным. Поэтому предлагается сначала построить математические модели зависимостей показателей качества от параметров управления и характеристик материалов, а воздействие возмущающих факторов исследовать отдельно. Тогда математическая модель, описывающая процесс формирования показателей качества металлических изделий, может быть представлена выражением

$$y = \mathfrak{M}(u_1, \dots, u_k; v_1, \dots, v_p). \quad (2)$$

Для оптимизации технологического процесса предлагается использовать методологию робастного параметрического проектирования. Схема предлагаемого подхода приведена на рисунке 2.

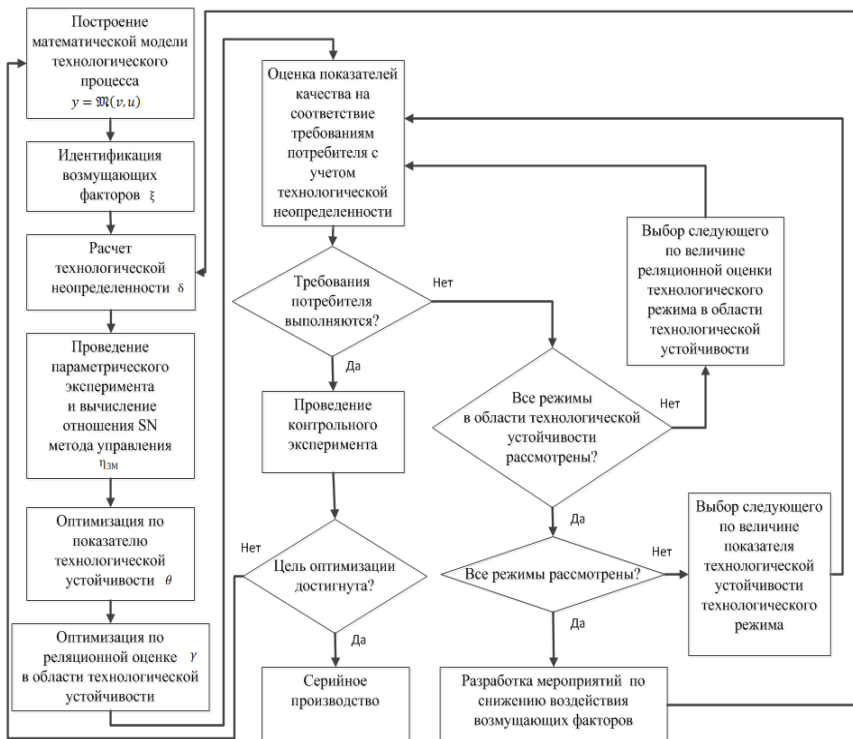


Рисунок 2 – Схема управления качеством металлических изделий с применением принципов робастного параметрического проектирования

Возмущающие факторы – это факторы, вызывающие вариации показателей качества продукции и входных параметров. Для решения поставленных в работе задач предлагается единая классификация возмущающих факторов по источнику возникновения и по направленности воздействия (рисунок 3).



Рисунок 3 – Классификация возмущающих факторов

Источники возникновения возмущающих факторов классифицируются по категориям 4М:

1М: Оборудование (англ.: Machine) – возмущающие факторы, связанные с технологическим оборудованием и инструментом;

2М: Персонал (англ.: Man) – возмущающие факторы, связанные с оператором процесса;

3М: Метод управления (англ.: Method) – возмущающие факторы, связанные с методом управления (параметрами управления и характеристиками материалов);

4М: Измерение (англ.: Measurement) – возмущающие факторы, связанные с измерительной системой.

В соответствии с принятой классификацией введены обозначения:

ξ_{1M}^{BX} , ξ_{2M}^{BX} , ξ_{3M}^{BX} , ξ_{4M}^{BX} – возмущающие факторы категорий 1М-4М, воздействующие на входные параметры процесса (параметры управления и характеристики материала);

$\xi_{1M}^{ПК}$, $\xi_{2M}^{ПК}$, $\xi_{3M}^{ПК}$, $\xi_{4M}^{ПК}$ – возмущающие факторы категорий 1М-4М, воздействующие на показатели качества.

С целью идентификации возмущающих факторов (ВФ) разработана матрица (рисунок 4), которая заполняется экспертами. В первую очередь заполняется таблица входных параметров (часть матрицы, выделенная рамкой) по результатам дисперсионного анализа математической модели. Знак «+» на пересечении входного параметра (ВХ) и показателя качества (ПК) означает, что данный входной параметр оказывает влияние на показатель качества, в противном случае ставится знак «-».

Далее заполняются остальные части матрицы – таблица возмущающих факторов, влияющих на входные параметры (слева от таблицы входных параметров) и таблица возмущающих факторов, влияющих на показатели качества (сверху над таблицей входных параметров). Для этого в клетках на пересечении возмущающих факторов и параметров ставится знак «+» или «-».

Возмущающие факторы, влияющие на показатели качества Возмущающие факторы, влияющие на входные параметры					ПК	Y_1	Y_2	Y_3
					ВФ							
					$\xi_{1M}^{ПК}$							
					$\xi_{2M}^{ПК}$							
					ПК	Y_1	Y_2	Y_3
ВФ	$\xi_{1M}^{ВХ}$	$\xi_{2M}^{ВХ}$	$\xi_{3M}^{ВХ}$	$\xi_{4M}^{ВХ}$	ВХ							
ВХ												
Параметры управления					Параметры управления							
	U_1					U_1						
	U_2					U_2						
	U_3					U_3						
						
Характеристики материалов					Характеристики материалов							
	V_1					V_1						
	V_2					V_2						
	V_3					V_3						
						

Рисунок 4 – Матрица возмущающих факторов

Степень воздействия каждого возмущающего фактора на свойства готовой продукции предлагается оценивать с помощью технологической неопределенности. Под технологической неопределенностью понимается интервал $\delta(\Pi)$, который с определенным уровнем значимости описывает ожидаемый диапазон значений параметра Π

$$\Pi = \bar{\Pi} \pm \delta(\Pi), \quad (3)$$

где $\bar{\Pi}$ – среднее арифметическое значение Π .

Технологическая неопределенность параметра Π определяется из выражения

$$\delta(\Pi) = \sqrt{(\delta_{1M}(\Pi))^2 + (\delta_{2M}(\Pi))^2 + (\delta_{3M}(\Pi))^2 + (\delta_{4M}(\Pi))^2}, \quad (4)$$

где $\delta_{1M}(\Pi)$, $\delta_{2M}(\Pi)$, $\delta_{3M}(\Pi)$, $\delta_{4M}(\Pi)$ – технологические неопределенности параметра Π , вызываемые возмущающими факторами категорий 1М, 2М, 3М, 4М, соответственно.

Вклад возмущающего фактора $\xi_{\mathcal{E}}^{\Pi}$ в общую неопределенность параметра Π определяется из выражения

$$\omega_{\mathcal{E}}(\Pi) = \frac{(\delta_{\mathcal{E}}(\Pi))^2}{(\delta(\Pi))^2}, \quad (5)$$

где \mathcal{E} – категория.

Непосредственное влияние на формирование качества готовых изделий оказывают машины, установки, станки, оснастка, инструмент и другое оборудование. Поэтому возмущающие факторы категории 1М будут включать в себя неопределенность, вносимую средствами технического оснащения.

Технологические системы метизного производства создаются и управляются людьми. Поэтому в классификации воздействий, влияющих на неопределенность технологического процесса, особое место занимает персонал. Человеческий фактор составляет основу менеджмента, поэтому управление им является важной и актуальной задачей.

Для количественной оценки технологической неопределенности, обусловленной влиянием оборудования и персонала, предлагается использовать статистический метод средних и размахов. Для этого проводится промышленный эксперимент, в ходе которого оценивается технологическая неопределенность параметров качества и параметров управления,

Технологическая неопределенность оборудования рассчитывается по формуле

$$\delta_{1M}(\Pi) = \frac{\max_{i=1,N}(\bar{X}_{i**}) - \min_{i=1,N}(\bar{X}_{i**})}{2}, \quad (6)$$

где $\bar{X}_{i**} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \bar{X}_{ij*}$ – среднее значение результатов измерений i -го образца, $\bar{X}_{ij*} = \frac{1}{Q} \sum_{k=1}^Q X_{ijk}$ – среднее значение результатов измерений i -го образца j -го оператора, X_{ijk} – значение результата k -го измерения i -го образца j -го оператора; $i = 1 \dots N$ – номер образца; $j = 1 \dots M$ – номер оператора; $k = 1 \dots Q$ – номер измерения.

Технологическая неопределенность персонала рассчитывается по формуле

$$\delta_{2M}(\Pi) = \frac{\max_{i=1,M}(\bar{X}_{*j*}) - \min_{i=1,M}(\bar{X}_{*j*})}{2}, \quad (7)$$

где $\bar{X}_{*j*} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{X}_{ij*}$ – среднее значение результатов измерений образцов j -го оператора.

Для количественной оценки технологической неопределенности метода управления используются результаты математического моделирования в виде зависимости (2). Оценка технологической неопределенности метода управления для показателей качества находится из выражения

$$\delta_{3M}(\Pi) = \frac{\partial y}{\partial u_1} \delta(u_1) + \dots + \frac{\partial y}{\partial u_k} \delta(u_k) + \frac{\partial y}{\partial v_1} \delta(v_1) + \dots + \frac{\partial y}{\partial v_p} \delta(v_p). \quad (8)$$

Возмущающие факторы измерительной системы также являются источником вариаций значений измеряемых параметров. Измерительная система должна обеспечивать получение достоверных результатов, быть поверенной и/или калиброванной, а неопределенность измерительной системы должна быть оценена количественно и сведена к минимуму.

Технологическая неопределенность измерений рассчитывается по формуле

$$\delta_{4M}(\Pi) = \frac{k_\alpha GRR}{2}, \quad (9)$$

где GRR – сходимость и воспроизводимость результатов измерений, определенная методом MSA (Measurement Systems Analysis); k_α – коэффициент толерантности, определяемый по таблице значений функции Лапласа.

Робастное параметрическое проектирование позволяет получить эффективную оценку технологии производства на основе критерия робастности. В предлагаемой методологии в качестве критерия робастности предлагается использовать отношение «сигнал/шум» метода управления.

Отношение «сигнал/шум» метода управления вычисляется по формуле

$$\eta_{3M}(y_i) = 10 \lg \frac{y_i(u_1, \dots, u_k; v_1^N, \dots, v_p^N)}{\delta_{3M}(y_i)}, \quad (10)$$

где $y(u_1, \dots, u_k; v_1^N, \dots, v_p^N)$ – значение показателя качества y_i , вычисленное для параметров управления u_1, \dots, u_k и номинальных значений характеристик материала v_1^N, \dots, v_p^N ; $\delta_{3M}(y_i)$ – технологическая неопределенность метода управления для показателя качества y_i .

Количественные оценки робастности должны быть получены для всех возможных комбинаций параметров проекта (таблица 1).

Таблица 1 – Матрица планирования эксперимента

№ эксперимента	Параметры управления				Технологическая неопределенность показателя качества δ_{3M}	Значение показателя качества y	Отношение сигнал/шум метода управления η_{3M}
	u_1	u_2	...	u_k			
1					$\delta_{3M}(y_1)$	y_1	$\eta_{3M}(y_1)$
2					$\delta_{3M}(y_2)$	y_2	$\eta_{3M}(y_2)$
...							
n					$\delta_{3M}(y_n)$	y_n	$\eta_{3M}(y_n)$

Для сведения показателей робастности в единую целевую функцию предлагается использовать показатель технологической устойчивости, который определяется по формуле

$$\theta_j = \sum_{i=1}^n \alpha_i \eta_{3M}(y_{ij}), \quad (11)$$

где α_i – коэффициент значимости i -го показателя качества, $\eta_{3M}(y_{ij})$ – отношение «сигнал/шум» метода управления для i -го показателя качества в j -м эксперименте.

Первый этап робастной оптимизации заключается в максимизации показателя устойчивости за счет минимизации чувствительности к возмущающим факторам.

Таким образом, решается следующая задача робастной оптимизации

$$\max_u \theta(u, v^N, \xi) \quad (12)$$

при связях и ограничениях

$$y = \mathfrak{M}(v, u); y_{i\min} \leq \bar{g}_i(v, u) \equiv y_i \leq y_{i\max}, i = 1, \dots, n, \quad (13)$$

где $y = \mathfrak{M}(v, u)$ – оператор математической модели технологического процесса метизного производства; $y_{i\min}$ – минимально допустимое значение i -й выходной переменной; $y_{i\max}$ – максимально допустимое значение i -й выходной переменной; $\bar{g}_i(v, u), i = 1, \dots, n$ – функции ограничений.

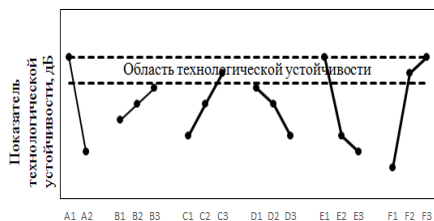


Рисунок 5 – Диаграмма эффектов параметров управления

Для оценки влияния параметров управления на показатель технологической устойчивости используется диаграмма эффектов факторов (рисунок 5). Диаграмма показывает, каким образом каждый исследуемый параметр управления влияет на показатель технологической устойчивости. Чем больше градиент параметра управления, тем большее влияние он оказывает.

На втором этапе оптимизации осуществляется регулировка средних значений показателей качества к целевым значениям. Для сведения показателей качества в единую целевую функцию используется серый реляционный анализ GRA.

На первом этапе GRA проводится нормирование данных в диапазоне от 0 до 1 для цели «номинал – лучше» по зависимости

$$z_{ij} = 1 - \frac{|y_{ij} - y_j^*|}{\max_j |y_{ij} - y_j^*|}, \quad (14)$$

где y_{ij} – величина отклика для j -го эксперимента; y_j^* – целевое (номинальное) значение отклика.

Для цели «больше – лучше» нормирование проводится по зависимости

$$z_{ij} = \frac{y_{ij} - \min_j y_{ij}}{\max_j y_{ij} - \min_j y_{ij}}. \quad (15)$$

Для цели «меньше – лучше» нормирование проводится по зависимости

$$z_{ij} = \frac{\max_j y_{ij} - y_{ij}}{\max_j y_{ij} - \min_j y_{ij}}. \quad (16)$$

Серый реляционный коэффициент, который рассчитывается для определения соотношения между идеальным и фактическим экспериментальными результатами, определяется как

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\min_j |z_i^0 - z_{ij}| + \varphi \max_j |z_i^0 - z_{ij}|}{|z_i^0 - z_{ij}| + \varphi \max_j |z_i^0 - z_{ij}|}, \quad (17)$$

где $z_i^0 = 1$ – это лучший нормализованный результат для i -й характеристики качества; $\varphi = [0,1]$ – коэффициент отличия, целью которого является ослабление эффекта $\max_j |z_i^0 - z_{ij}|$, когда он становится слишком большим и, следовательно, увеличивает разницу значимости серого реляционного коэффициента.

Для сведения полученных значений коэффициентов ε_{ij} для каждого эксперимента в интегрированную реляционную оценку используется метод весовых коэффициентов. Общая реляционная оценка характеристик качества определяется по зависимости

$$\gamma_j = \sum_{i=1}^n \alpha_i \varepsilon_{ij}, \quad (18)$$

где α_i – коэффициент значимости i -го показателя качества.

На втором этапе оптимизации осуществляется регулировка средних значений показателей качества к целевым значениям.

Решается следующая задача оптимизации

$$\max_u \gamma(u, v^N) \quad (19)$$

при связях и ограничениях

$$(1 - \beta) \max_u \theta(u, v, \xi) \leq \theta \leq \max_u \theta(u, v, \xi), \quad (20)$$

где $\beta \in [0,1]$ – коэффициент, задающий область технологической устойчивости (рекомендуемое значение $\beta = 0,05$).

После определения оптимального технологического режима проводится оценка соответствия показателей качества требованиям потребителя в соответствии с таблицей 2.

В случае, когда требования по какому-либо параметру не выполняются, необходимо выбрать другой технологический режим из области устойчивости в качестве оптимального и провести оценку на соответствие требованиям потребителя. В случае, когда все режимы из области устойчивости оказались несоответствующими требованиям потребителя, делается выбор из оставшихся режимов по убыванию показателя технологической устойчивости. Если обнаруживается, что требования к показателям качества не обеспечиваются ни при одном из технологических режимов, то требуется разработка мероприятий по снижению технологической неопределенности. Из таблицы 2 можно определить возмущающие факторы, которые вносят наиболее существенный вклад в общую технологическую неопределенность. Разработка мероприятий по снижению данных возмущающих факторов позволит эффективно направить усилия на совершенствование технологического процесса.

Таблица 2 – Оценка показателей качества при оптимальном режиме на соответствие требованиям потребителя

Показатель качества	Возмущающий фактор	Технологическая неопределенность	Вклад, %	Фактический допуск	Требуемый допуск	Оценка соответствия требованиям	Мероприятие по снижению технологической неопределенности
y_i	$\xi_{1M}^{y_i}$	$\delta_{1M}(y_i)$	$\omega_{1M}(y_i)$	$[y_{iopt} - \delta(y_i); y_{iopt} + \delta(y_i)]$	$[y_{imin}; y_{imax}]$	Соответствует/ не соответствует	Требуется/ не требуется
	$\xi_{2M}^{y_i}$	$\delta_{2M}(y_i)$	$\omega_{2M}(y_i)$				
	$\xi_{3M}^{y_i}$	$\delta_{3M}(y_i)$	$\omega_{3M}(y_i)$				
	$\xi_{4M}^{y_i}$	$\delta_{4M}(y_i)$	$\omega_{4M}(y_i)$				
	$\xi_{\Sigma}^{y_i}$	$\delta(y_i)$	-				

Примечание: y_{iopt} – значение показателя y_i для оптимальных условий проектирования

Для подтверждения достоверности результатов расчета следует провести контрольный эксперимент в базовых и оптимальных условиях проектирования и вычислить значения показателя технологической устойчивости и его прироста (таблица 3).

Таблица 3 – Результаты контрольного эксперимента

Показатель	Базовые условия		Оптимальные условия		Прирост		
	Расчетное значение	Проверочное значение	Расчетное значение	Проверочное значение	Расчетное значение	Проверочное значение	
Показатель технологической устойчивости	θ_{base}	θ'_{base}	θ_{opt}	θ'_{opt}	$\Delta\theta$	$\Delta\theta'$	
Показатель качества	y_1	y_{1base}	y'_{1base}	y_{1opt}	y'_{1opt}	Δy_1	$\Delta y'_1$
	y_2	y_{2base}	y'_{2base}	y_{2opt}	y'_{2opt}	Δy_2	$\Delta y'_2$

	y_n	y_{nbase}	y'_{nbase}	y_{nopt}	y'_{nopt}	Δy_n	$\Delta y'_n$

Значения показателей для базовых и оптимальных условий проектирования y_{ibase} и y_{iopt} , соответственно, определяются из таблицы 1. Значения показателей θ_{base} и θ_{opt} определяются по формуле (11).

Прирост показателя технологической устойчивости и показателя качества y_i определяются как

$$\Delta\theta = \theta_{opt} - \theta_{base}, \quad (21)$$

$$\Delta y_i = y_{iopt} - y_{ibase}. \quad (22)$$

Проверочные значения показателей качества для базовых и оптимальных условий проектирования определяются по результатам фактических измерений как среднее размаха выборки

$$y'_{ibase} = \frac{y'_{ibasemin} + y'_{ibasemax}}{2}, \quad (23)$$

$$y'_{iopt} = \frac{y'_{ioptmin} + y'_{ioptmax}}{2}. \quad (24)$$

где $y'_{ibasemin}$, $y'_{ibasemax}$ – минимальное и максимальное значение показателя качества в выборке при базовых условиях проектирования; $y'_{ioptmin}$, $y'_{ioptmax}$ – минимальное и максимальное значение показателя качества в выборке при оптимальных условиях проектирования.

Для определения значений θ'_{base} и θ'_{opt} рассчитывается отношение «сигнал/шум» метода управления для каждого показателя качества в базовых условиях

$$\eta'_{3M}(y_{ibase}) = 10 \lg \frac{y'_{ibase}}{\delta'_{ibase}}, \quad (25)$$

где $\delta'_{ibase} = \frac{y'_{ibasemax} - y'_{ibasemin}}{2}$ – технологическая неопределенность показателя качества y_i при базовых условиях проектирования и в оптимальных условиях

$$\eta'_{3M}(y_{iopt}) = 10 \lg \frac{y'_{iopt}}{\delta'_{iopt}}, \quad (26)$$

где $\delta'_{iopt} = \frac{y'_{ioptmax} - y'_{ioptmin}}{2}$ – неопределенность показателя качества y_i при оптимальных условиях проектирования.

Проверочные значения θ'_{base} и θ'_{opt} для базовых и оптимальных условий проектирования определяются как

$$\theta'_{base} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \eta'_{3M}(y_{ibase}), \quad (27)$$

$$\theta'_{opt} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \eta'_{3M}(y_{iopt}). \quad (28)$$

Проверочное значение прироста показателя технологической устойчивости определяется по формуле

$$\Delta\theta' = \theta'_{opt} - \theta'_{base}. \quad (29)$$

Проверочный прирост показателя качества y'_i определяется по формуле

$$\Delta y'_i = y'_{i\text{opt}} - y'_{i\text{base}}. \quad (30)$$

Если проверочные и расчетные значения приростов для показателя технологической устойчивости и показателей качества практически одинаковы, то результаты робастного параметрического проектирования демонстрируют высокую воспроизводимость и останутся таковыми в реальных условиях. В противном случае необходимо перепроверить выполнение всех этапов методологии.

Если значения прироста показателя технологической неопределенности в проверочном эксперименте отличаются в большую сторону, чем расчетные значения, то это может указывать на наличие неизвестных возмущающих факторов, которые сильно влияют на технологическую неопределенность. В таком случае следует повторно провести идентификацию возмущающих факторов и количественную оценку технологической неопределенности.

В третьей главе приведены результаты реализации методологии при освоении новой продукции метизного производства – калиброванной стали марки С10С по спецификации N28 XS 0214 S001 в условиях ОАО «Магнитогорский метизно-калибровочный завод «ММК-МЕТИЗ».

Калиброванная сталь марки С10С предназначена для изготовления заготовки корпусов свечей зажигания, которые, в свою очередь, становятся составной частью свечи зажигания в сборе. Поскольку условия дальнейшего применения свечи зажигания предусматривают работу в агрессивных средах при перепадах температур, к данной продукции предъявляются повышенные требования по механическим свойствам. В качестве специальных характеристик помимо механических свойств потребитель выделяет также диаметральный размер.

В соответствии с описанной выше методологией получены математические модели формирования показателей качества калиброванной стали марки С10С, которые позволили выявить механизмы формоизменения и упрочнения калиброванного проката.

$$\begin{aligned} \sigma_b &= 428,4 - 0,1247T - 1,026\varepsilon_b + 0,00345\varepsilon_b T, \\ \psi &= 79,6 + 0,018T - 14,725t + 0,021Tt, \end{aligned} \quad (31)$$

где σ_b – временное сопротивление калиброванной стали, Н/мм²; ψ – относительное сужение калиброванной стали, %; ε_b – величина обжатия при волочении проката, %; T – рабочая температура отжига, °С; t – продолжительность выдержки при рабочей температуре отжига, ч.

Разработана стратегия управления возмущающими воздействиями при производстве калиброванной стали. Определены возмущающие факторы,

которые вызывают отклонения механических и геометрических свойств калиброванной стали в реальных производственных условиях. Проведена количественная оценка технологической неопределенности оборудования, персонала и измерительных систем.

На основе выполненных исследований осуществлено робастное параметрическое проектирование технологии производства калиброванной стали марки С10С. Диаграммы эффектов параметров управления, полученные в результате эксперимента, представлены на рисунке 6.

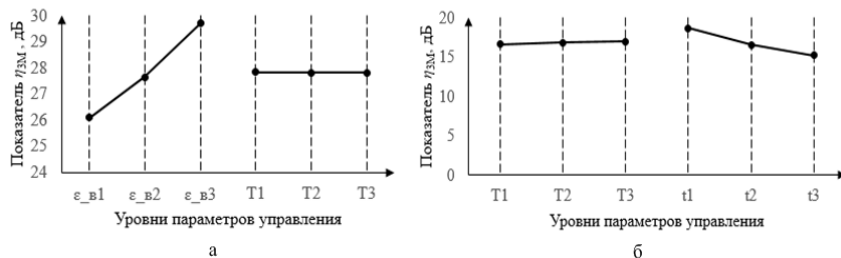


Рисунок 6 – Диаграммы эффектов калиброванной стали:
а – для временного сопротивления;
б – для относительного сужения

Выбрана оптимальная комбинация значений технологических параметров, максимизирующая показатель технологической устойчивости и реляционную оценку показателей качества калиброванной стали марки С10С: величина обжатия при волочении проката $\varepsilon_{в} = 23\%$, рабочая температура отжига $T_{раб} = 750\text{ }^{\circ}\text{C}$, продолжительность выдержки $t = 4\text{ ч}$ (рисунок 7).

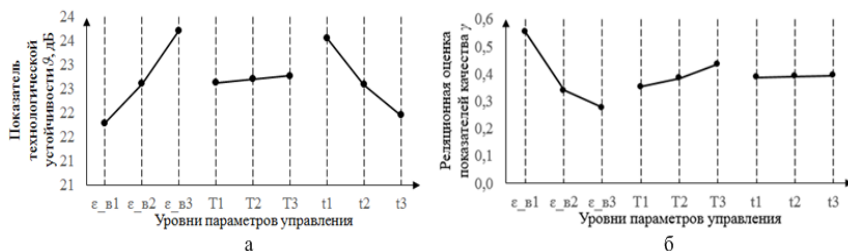


Рисунок 7 – Диаграммы эффектов калиброванной стали:
а – для показателя технологической устойчивости;
б – для реляционной оценки показателей качества

Проведена оценка соответствия показателей качества, получаемых при оптимальном режиме, требованиям потребителя (таблица 4).

Таблица 4 - Оценка соответствия показателей качества калиброванной стали марки С10С требованиям спецификации N28 XS 0214 S001

Показатель качества	Возмущающий фактор	Технологическая неопределенность	Вклад, %	Фактический допуск	Требуемый допуск	Оценка соответствия требованиям	Мероприятие по снижению технологической неопределенности
Временное сопротивление σ_B , Н/мм ²	$\xi_{3M}^{\sigma_B}$	0,64	4,1	[367,7; 374,1]	330-390	Соответствует	Не требуется
	$\xi_{4M}^{\sigma_B}$	3,10	95,9				
	$\xi_{\Sigma}^{\sigma_B}$	3,17	-				
Относительное сужение ψ , %	ξ_{3M}^{ψ}	0,93	77,6	[70,1; 71,3]	Не менее 60	Соответствует	Не требуется
	ξ_{4M}^{ψ}	0,50	22,4				
	ξ_{Σ}^{ψ}	1,06	-				
Диаметр d , мм	ξ_{1M}^d	0,014	5,8	[12,817; 12,933]	12,82-12,93	Не соответствует	Уменьшение допуска на диаметральный размер с 0,11 мм до 0,09 мм
	ξ_{2M}^d	0,010	3,0				
	ξ_{3M}^d	0,055	89,7				
	ξ_{4M}^d	0,007	1,5				
	ξ_{Σ}^d	0,058	-				

По результатам оценки можно сделать вывод о несоответствии диаметра калиброванной стали марки С10С требуемому диапазону. В качестве корректирующего мероприятия предложено уменьшить допускаемое отклонение с 0,11 мм до 0,09 мм.

Для подтверждения достоверности результатов проведенных исследований изготовлена опытная партия калиброванной стали с применением разработанных технологических режимов в условиях сталепроволочного производства ОАО «ММК-МЕТИЗ». Проведенные испытания и опытная переработка показали полное соответствие продукции по уровню качества требованиям потребителя.

В четвертой главе приведены результаты реализации методологии при совершенствовании действующей технологии производства стабилизированных арматурных канатов диаметром 12,5 мм по ГОСТ Р 53772-2010.

Стремление к максимальной продолжительности эксплуатационного срока продукции и необходимость создания строительных конструкций с новым уровнем потребительских свойств приводят к тому, что потребители постоянно ужесточают требования к качеству арматурных канатов. Поэтому жизненно важными для метизных предприятий являются вопросы обеспечения заданного уровня потребительских свойств арматурных канатов на основе эффективного управления качеством.

В условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ» исследован процесс формирования механических свойств арматурных канатов в процессе изготовления. Разработаны математические модели взаимосвязи параметров управления процессом с показателями механических свойств арматурных канатов

$$\begin{aligned}
 \sigma_b &= -4391 - 2,3667V + 33,8667T + 0,0467V^2 - 0,0075VT - 0,0446T^2, \\
 P &= -523,6 - 0,4035V + 3,7837T + 0,006V^2 - 0,0007VT - 0,005T^2, \\
 P_{\sigma_{0,1}} &= -551 - 0,4705V + 3,8863T + 0,0065V^2 - 0,0007VT - 0,0051T^2, \\
 \sigma_{0,1} &= -5305,7 - 4,0724V + 38,3737T + 0,0608V^2 - 0,0071VT - 0,0505T^2, \\
 \delta_{\max} &= 48,8 - 0,0431V - 0,221T - 0,000708V^2 + 0,00028VT + 0,00027T^2, \\
 \Delta P_r &= 100,19 - 0,0825V - 0,5067T + 0,000917V^2 + 0,00067T^2,
 \end{aligned} \tag{32}$$

где σ_b – временное сопротивление, Н/мм²; P – разрывное усилие, кН; $P_{\sigma_{0,1}}$ – нагрузка при условном пределе текучести, кН; $\sigma_{0,1}$ – условный предел текучести, Н/мм²; δ_{\max} – полное относительное удлинение при максимальной нагрузке, %; ΔP_r – потери напряжения от релаксации, %; V – скорость обработки канатов на совмещенной линии, м/мин; T – температура нагрева канатов, °С.

Для управления качеством стабилизированных арматурных канатов проведена идентификация возмущающих факторов, вызывающих вариабельность механических свойств, и количественная оценка технологической неопределенности, возникающей при производстве арматурных канатов.

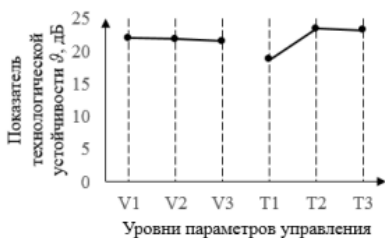


Рисунок 8 – Диаграмма эффектов арматурных канатов для показателя технологической устойчивости

На основе выполненных исследований осуществлено робастное параметрическое проектирование технологии производства стабилизированных арматурных канатов. На рисунке 8 приведена диаграмма эффектов параметров управления для показателя технологической устойчивости процесса производства стабилизированных арматурных канатов.

Разработаны промышленные режимы производства стабилизированных арматурных канатов, обеспечивающие повышение уровня качества готовых изделий: скорость обработки канатов на совмещенной линии $V = 50$ м/мин, температура нагрева канатов $T = 380$ °С.

С целью подтверждения результатов оптимизации проведен контрольный эксперимент, результаты которого представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты контрольного эксперимента

Показатель		Базовые условия		Оптимальные условия		Прирост	
		Расчетное значение	Проверочное значение	Расчетное значение	Проверочное значение	Расчетное значение	Проверочное значение
Показатель технологической устойчивости		21,58	21,19	27,89	26,51	6,31	5,32
Показатель качества	Временное сопротивление σ_b , Н/мм ²	1873	1841	1894	1892	21	52
	Разрывное усилие P , кН	174,6	170,9	176,6	174,6	2,0	3,7
	Нагрузка при условном пределе текучести $P_{\sigma_{0,1}}$, кН	166,8	159,1	168,8	167,1	2,0	8,0
	Условный предел текучести, $\sigma_{0,1}$, Н/мм ²	1778	1740	1798	1766	20	26
	Полное относительное удлинение при максимальной нагрузке δ_{max} , %	4,5	4,5	4,8	4,7	0,3	0,2
	Потери напряжения от релаксации ΔP_r , %	2,9	2,8	2,1	2,0	-0,8	-0,7

Усовершенствованная технология производства стабилизированных арматурных канатов была реализована в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ», что обеспечило повышение показателя технологической устойчивости процесса и уровня качества готовой продукции. По результатам промышленной апробации разработана и внедрена в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ» технологическая карта КП.00187240.05-КТП «Изготовление наноструктурированных арматурных канатов диаметром 12,5 мм».

В пятой главе приведены результаты реализации методологии при совершенствовании отдельно взятой технологической операции на примере операции стабилизации высокопрочной арматуры диаметром 9,6 мм по ТУ 0930-011-01115863-2008 для железобетонных шпал, используемых на тяжелонагруженных участках железных дорог. Показано, что робастный подход может быть эффективно применен не только для технологического процесса в целом, но и для отдельной операции технологического процесса.

В условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ» выполнены экспериментальные исследования и получены математические модели, описывающие взаимосвязь параметров управления операции стабилизации с показателями механических свойств высокопрочной арматуры.

$$\begin{aligned}
 P &= 105700 + 3,1633N + 124,3344T - 0,0003N^2 - 0,001NT - 0,2349T^2, \\
 \sigma_b &= 1378,8 + 0,0423N + 1,8465T - 0,00000352N^2 - 0,000017695NT - 0,0033T^2, \\
 \sigma_{0,2} &= 1995,3 - 0,0567N - 1,0454T + 0,000002256N^2 + 0,0001NT - 0,001T^2, \\
 \delta_{10} &= -7,7 + 0,0012N + 0,0668T - 0,000000176N^2 + 0,0000010884NT - \\
 &\quad 0,000098029T^2,
 \end{aligned}
 \tag{33}$$

где P – разрывное усилие, Н; σ_b – временное сопротивление, Н/мм²; $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести, Н/мм²; δ_{10} – относительное удлинение, %; N – установленная тяга, кгс; T – температура нагрева, °С.

Результаты эксперимента показывают, что наиболее существенную роль в динамике изменения механических свойств арматуры в процессе стабилизации играет температура нагрева. На основе выполненных экспериментальных исследований идентифицированы производственные вариации, возникающие на операции стабилизации высокопрочной арматуры. Определен вклад каждого из факторов в технологическую неопределенность показателей качества.

С помощью робастного параметрического проектирования разработаны технологические режимы операции стабилизации, позволяющие снизить чувствительность данного процесса к возмущающим воздействиям. На рисунке 9 приведена диаграмма эффектов параметров управления для показателя технологической устойчивости операции стабилизации высокопрочной арматуры диаметром 9,6 мм. В результате проведенных исследований определен



Рисунок 9 – Диаграмма эффектов высокопрочной арматуры для показателя технологической устойчивости

оптимальный режим стабилизации высокопрочной арматуры: установленная тяга $N = 4750$ кгс, температура нагрева $T = 320$ °С. Результаты контрольного эксперимента подтвердили повышение показателя технологической устойчивости процесса и улучшение показателей качества высокопрочной арматуры.

Реализация методологии позволила усовершенствовать операцию стабилизации высокопрочной арматуры для железобетонных шпал в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ».

Результаты испытаний механических и специальных свойств показали, что полученная высокопрочная арматура по техническим характеристикам соответствует ведущим мировым аналогам.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработан методологический подход к управлению качеством продукции, реализующий возможности робастного параметрического проектирования применительно к технологическим процессам метизного производства. Предложен понятийный аппарат управления качеством металлических изделий, предусматривающий понятия «технологическая неопределенность» и «показатель технологической устойчивости», определяющие логическую связь между целевыми критериями и разработанными математическими моделями для получения количественной оценки робастности в технологиях метизного производства.

2. Формализована процедура идентификации возмущающих факторов в технологических процессах метизного производства на основе разработанной авторской классификации возмущающих факторов, учитывающей источники их возникновения – оборудование, персонал, метод управления, измерительную систему и объект воздействия. Разработана матрица для оценки влияния возмущающих факторов на показатели качества продукции и параметры технологического процесса, а также методика по ее заполнению. Предложена методика количественной оценки технологической неопределенности, основанная на опытно-промышленном исследовании возмущающих воздействий на показатели качества и параметры процесса, позволяющая выбирать эффективную стратегию повышения устойчивости технологического процесса к возмущающим воздействиям.

3. Применительно к управлению качеством в технологиях метизного производства разработан научно-обоснованный критерий робастности технологического процесса в виде отношения «сигнал/шум» метода управления, характеризующий чувствительность технологического процесса к возмущающим факторам по отдельным показателям качества, определяемый на основе количественной оценки технологической неопределенности метода управления и значения показателя качества. Разработан показатель технологической устойчивости процесса к воздействиям возмущающих факторов, характеризующий комплексное состояние технологической неопределенности системы с учетом значимости показателей качества метизных изделий.

4. Разработана двухэтапная процедура оптимизации технологического процесса, обеспечивающая реализацию концепции робастного параметрического проектирования при управлении качеством металлических изделий, на основе комплексной оценки технологической неопределенности процесса и реляционной оценки показателей качества для обоснования выбора технологических режимов по целевым критериям с учетом требований потребителя. Предложена процедура оценки соответствия показателей качества, полученных при оптимальном режиме, требованиям потребителя, обеспечивающая

определение возможных интервалов варьирования показателей качества и принятие решений в случае их несоответствия. Формализована процедура контрольного эксперимента для проверки улучшений по результатам оптимизации, включающая расчет и опытное определение показателя технологической устойчивости и показателей качества продукции в базовых и оптимальных условиях проектирования.

5. Проведены исследования и получены математические модели формирования показателей качества калиброванной стали марки С10С с учетом специфики взаимодействия режимов деформационной и термической обработок. Установлено влияние деформационных и температурных режимов обработок на временное сопротивление и относительное сужение калиброванной стали. На основе выполненных исследований осуществлено робастное параметрическое проектирование технологии производства калиброванной стали марки С10С и определены оптимальные режимы деформационной и термической обработок, обеспечивающие получение заданного уровня показателей качества готовой продукции.

6. Проведены исследования и получены математические модели, описывающие взаимосвязь параметров управления механотермической обработки с механическими свойствами стабилизированных арматурных канатов диаметром 12,5 мм, позволяющие определять температурно-скоростные режимы обработки. На основе выполненных исследований осуществлено робастное параметрическое проектирование технологии производства стабилизированных арматурных канатов диаметром 12,5 мм и определены оптимальные режимы механотермической обработки, обеспечивающие получение заданного уровня показателей качества готовой продукции, применяемой в качестве напрягаемой арматуры в предварительно напряженных железобетонных конструкциях.

7. Проведены исследования и получены математические модели, описывающие взаимосвязь параметров управления операции стабилизации с показателями качества арматуры диаметром 9,6 мм, обеспечивающие формирование необходимого комплекса свойств по механическим показателям. На основе выполненных исследований осуществлено робастное параметрическое проектирование операции стабилизации высокопрочной арматуры для железобетонных шпал диаметром 9,6 мм и определен оптимальный режим обработки, обеспечивающий заданный уровень механических свойств.

8. С применением предложенной методологии решены следующие практические задачи:

- разработана и апробирована в условиях сталепроволочного производства ОАО «ММК-МЕТИЗ» технология производства калиброванной стали марки С10С по спецификации N28 XS 0214 S001, предназначенной для изготовления заготовок корпусов свечей зажигания;

- разработана и внедрена в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ» усовершенствованная технология производства стабилизированных арматурных канатов диаметром 12,5 мм по ГОСТ Р 53772-2010, применяемых в предварительно напряженных железобетонных конструкциях;

- разработан и апробирован в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ» усовершенствованный режим стабилизации высокопрочной арматуры диаметром 9,6 мм по ТУ 0930-011-01115863-2008 для железобетонных шпал, используемых на тяжелонагруженных участках железных дорог.

Практическая ценность диссертационной работы подтверждена актами внедрения и принятия к использованию результатов исследований на ряде промышленных предприятий и организаций, а также в ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» для подготовки обучающихся по направлениям 22.03.02 Metallургия (уровень бакалавриата) и 22.04.02 Metallургия (уровень магистратуры).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Публикации в журналах из Перечня ВАК РФ:

1. Корчунов, А.Г. Изменение механических свойств и шероховатости поверхности металла при обточке и калибровании / А.Г. Корчунов, В.В. Чукин, К.Г. Пивоварова, В.Н. Челищев // Производство проката. – 2004. – № 9. – С. 31-33.

2. Использование малых пластических деформаций в технологических процессах формирования качества метизных изделий / А.Г. Корчунов, К.Г. Пивоварова, В.Н. Лебедев, В.Е. Семенов, Е.А. Слабожанкин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2007. – № 3 (19). – С. 52-55.

3. Применение адаптационных механизмов для повышения качества продукции с глубокой степенью переработки / Э.М. Голубчик, А.Г. Корчунов, К.Г. Пивоварова, А.В. Лысенин // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7. – № 5. – С. 131-134.

4. Корчунов А.Г. Прогнозирование изменения показателей качества калиброванного проката при различных режимах деформационной обработки / А.Г. Корчунов, В.Н. Лебедев, К.Г. Пивоварова // Сталь. – 2012. – № 2. – С. 120.

5. Совершенствование производства калиброванной стали на основе мониторинга деформационных и энергосиловых режимов обработки / А.Г. Корчунов, В.Н. Лебедев, Б.А. Коломиец, К.Г. Пивоварова, А.В. Лысенин // Горный журнал. Специальный выпуск. – 2012. – № S3. – С. 71-74.

6. Особенности структурообразования стальной углеродистой проволоки перлитного класса после комбинированной деформационной обработки / М.А. Полякова, К. Narasimhan, M. J. N. V. Prasad, К.Г. Пивоварова, А.Е. Гулин, Ю.Ю. Ефимова // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2018. – № 10 (1426). – С. 74-82.

7. Исследование структуры и некоторых свойств проволоки из углеродистой стали марки 50 при волочении / М.В. Чукин, М.А. Полякова, К.Г. Пивоварова, Ю.Ю. Ефимова, А.Е. Гулин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2018. – Т. 61. – № 7. – С. 572-578.

8. Исследование текстуры и остаточных напряжений в проволоке из стали перлитного класса после комбинированной пластической деформации / М.А. Полякова, Д.А. Горленко, К.Г. Пивоварова, А.Е. Гулин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2018. – Т. 20. – № 6 (86). – С. 78-85.

9. О формировании наследственных связей при комбинированной деформационной обработке углеродистой проволоки / М.А. Полякова, Э.М. Голубчик, А.Г. Корчунов, А.Е. Гулин, К.Г. Пивоварова // Металлургия машиностроения. – 2019. – № 4. – С. 45-48.

10. Влияние свойств сухой смазки на качество поверхности холоднотянутой калиброванной стали со специальной отделкой / А.Г. Корчунов, Г.С. Гун, М.А. Полякова, К.Г. Пивоварова // Черные металлы. – 2019. – № 12. – С. 32-37.

11. Калориметрические исследования высокоуглеродистой проволоки после различных видов деформации / М.А. Полякова, Г.С. Гун, К.Г. Пивоварова, М. Дабала, А. Комазетто // Сталь. – 2019. – № 4. – С. 43-47.

12. Пивоварова, К.Г. Влияние технологических свойств смазочных материалов на качество поверхности калиброванной стали при волочении / К.Г. Пивоварова, Г.С. Гун, А.Г. Корчунов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2019. – Т. 17. – № 6. – С. 261-265.

13. Полякова, М.А. Особенности текстурообразования высокоуглеродистой проволоки после комбинированной деформационной обработки / М.А. Полякова, К.Г. Пивоварова, А.Е. Гулин // Технология металлов. – 2020. – № 9. – С. 24-30.

14. Пивоварова, К.Г. Методология управления показателями качества мезитизной продукции с элементами робастного проектирования / К.Г. Пивоварова, А.Г. Корчунов // Черные металлы. – 2020. – № 12 (1068). – С. 38-43.

15. Влияние комбинированной деформационной обработки на микроструктуру и механические свойства высокоуглеродистой проволоки / М.А. Полякова, К. Нарасимхан, К.Г. Пивоварова, А.Е. Гулин, М. Дж. Н. В. Прасад // Сталь. – 2020. – № 1. – С. 25-29.

16. Пивоварова, К.Г. Оптимизация технологических параметров производства калиброванного проката с использованием метода Тагути / К.Г. Пивоварова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 6. – С. 280-285.

17. Пивоварова, К.Г. Управление качеством метизной продукции на основе робастного параметрического проектирования / К.Г. Пивоварова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2021. – Т. 19. – № 3. – С. 84-89.

18. Пивоварова, К.Г. Современные методы исследования фазовых превращений в высокоуглеродистой катанке для обеспечения качества высокопрочной арматуры / К.Г. Пивоварова // Заготовительные производства в машиностроении. – 2021. – Т. 19. – № 9. – С. 408-411.

19. Пивоварова, К.Г. Особенности окисления и обезуглероживания поверхности катанки из высокоуглеродистой стали / К.Г. Пивоварова // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2021. – Т. 77. – № 12. – С. 1296-1302.

20. Пивоварова, К.Г. Обеспечение качества поверхности высокоуглеродистой стальной катанки / К.Г. Пивоварова // Теория и технология металлургического производства. – 2021. – № 3 (38). – С. 24-29.

Публикации в изданиях, входящих в международные наукометрические базы Web of Science и Scopus:

1. Study of structural transformation of hot-rolled carbon billets for highstrength ropes for responsible applications via the method of thermal analysis / A. G. Korchunov, G. S. Gun, K. G. Pivovarova, O. P. Shiryayev // CIS Iron and Steel Review. – 2017. – Vol. 13. – P. 38-40.

2. Modern approaches for study of eutectoid steel oxidation and decarburization / K. Pivovarova, M. Polyakova, M. Dabala, A. Korchunov, A. Shymchenko // Materials Physics and Mechanics. – 2018. – Vol. 40. – Iss. 2. – P. 212-220.

3. Approach to obtaining medium carbon steel wire with a specified set of mechanical properties after combined deformational processing / M. A. Polyakova, I. Calliari, K. G. Pivovarova, A. E. Gulin // Materials Physics and Mechanics. – 2018. – Vol. 36. – Iss. 1. – P. 53-59.

4. Structure and Properties of Carbon Steel Wire in Drawing / M. V. Chukin, M. A. Polyakova, K. G. Pivovarova, Yu. Yu. Efimova, A. E. Gulin // Steel in Translation. – 2018. – Vol. 48. – Iss. 7. – P. 441-445.

5. Improvement of production of billet rods of metallic shell of automotive spark plug for rising usability of finished products / G. S. Gun, K. G. Pivovarova, A. A. Sokolov, N. V. Tokareva // CIS Iron and Steel Review. – 2019. – Vol. 18. – P. 35-37.

Монография:

1. Формирование качества поверхности стали при калибровании в монолитной волоке: монография / А.Г. Корчунов, В.Н. Лебедев, В.Е. Семенов, К.Г. Пивоварова, В.П. Рудаков. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2007. – 88 с.

Публикации в иных изданиях:

1. Возможности повышения качества калиброванной стали в рамках традиционной технологии / Е.П. Носков, В.П. Рудаков, Г.С. Гун, В.В. Чукин, А.Г. Корчунов, К.Г. Пивоварова // *Обработка сплошных и слоистых материалов: межвуз. междунар. сб. науч. тр. / Под ред. проф. Г.С. Гуна. – Магнитогорск: МГТУ, 2003. – С. 240-243.*
2. Влияние способа обработки на состояние поверхности калиброванного металла / В.П. Рудаков, В.В. Чукин, А.Г. Корчунов, К.Г. Пивоварова, В.В. Андреев // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2003. – № 3. – С. 41-42.*
3. Использование специальной отделки поверхности в производстве калиброванного металла / А.Г. Корчунов, К.Г. Пивоварова, А.Г. Виноградов, В.М. Одинаева // *Моделирование и развитие технологических процессов: темат. сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2004. – С. 125-128.*
4. Технологические аспекты производства калиброванного металла со специальной отделкой поверхности / А.Г. Корчунов, К.Г. Пивоварова, В.В. Андреев, С.М. Вершигора, В.П. Рудаков // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2005. – № 1 (9). – С. 46-49.*
5. Освоение технологии сфероидизирующего отжига бунтовой стали 40X «Селект» в садочных печах / И.Ю. Мезин, В.В. Чукин, В.П. Рудаков, А.Г. Корчунов, К.Г. Пивоварова // *Фазовые и структурные превращения в сталях: сб. науч. тр., в 2 т., Т. 2 / Под ред. В.Н. Урцева. – Магнитогорск: МДП, 2006. – С. 191-194.*
6. Гун, Г.С. Закономерности развития микрорельефа поверхности металла при калибровании / Г.С. Гун, А.Г. Корчунов, К.Г. Пивоварова // *Наука и технологии. Избранные труды Российской школы. Серия Технология и машины обработки давлением. – М.: РАН, 2006. – С. 41-44.*
7. Исследование деформационного упрочнения сталей с различной исходной структурой / А.Г. Корчунов, К.Г. Пивоварова, В.В. Андреев, Е.А. Слабожанкин // *Фазовые и структурные превращения в сталях: сб. науч. тр. / Под ред. В.Н. Урцева. – Магнитогорск: МДП, 2007. – С. 496-502.*
8. Корчунов, А.Г. Исследование изменения высотных параметров шероховатости поверхности стали при калибровании в монолитной волоке / А.Г. Корчунов, К.Г. Пивоварова, М.С. Бяков // *Технологическая механика материалов: темат. сб. науч. тр. / Под ред. С.А. Зайдеса. – Иркутск: ИрГТУ, 2008. – С. 113-118.*
9. Определение параметров волочильного инструмента с учётом деформационной специфики обработки калиброванной стали / А.Г. Корчунов, А.Г. Ульянов, К.Г. Пивоварова, В.Н. Лебедев, В.Е. Семенов, А.А. Соколов // *Производство конкурентоспособных метизов. Вып. 3: сб. науч. тр. / Под ред. А.Д. Носова. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2009. – С. 96-103.*

10. Статистическое исследование уровня механических свойств высокопрочной арматуры для железобетонных шпал нового поколения / А.Г. Корчунов, К.Г. Пивоварова, Б.А. Коломиец, Н.В. Литвинова, А.В. Лысенин, Д.К. Долгий // *Обработка сплошных и слоистых материалов*. Вып. 37: межвуз. сб. науч. тр. / Под ред. М.В. Чукина. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. – С. 112-122.

11. Корчунов, А.Г. Выбор оптимальной конструкции профиля высокопрочной арматуры / А.Г. Корчунов, Э.М. Голубчик, К.Г. Пивоварова, А.В. Мохнаткин, А.В. Лысенин // *Метизы*. – 2011. – № 2. – С. 16.

12. Корчунов, А.Г. Технологические аспекты производства высокоточной калиброванной стали / А.Г. Корчунов, К.Г. Пивоварова, А.Г. Ульянов // *Обработка сплошных и слоистых материалов*. – 2012. – № 38. – С. 85-89.

13. Построение целевых функции взаимосвязи механических свойств и структурных параметров конструкционных наносталей при интенсивной пластической деформации / М.В. Чукин, А.Г. Корчунов, К.Г. Пивоварова, А.В. Лысенин // *Инновационные технологии в металлургии и машиностроении: сб. науч. трудов*. – Екатеринбург: Унив. Тип. «Альфа Принт», 2013. – С. 690-692.

14. Моделирование упругого последствия металла при волочении / Г.С. Гун, А.Г. Корчунов, К.Г. Пивоварова, А.Г. Ульянов // *Обработка сплошных и слоистых материалов*. – 2014. – № 1 (40). – С. 67-71.

15. Возможности совмещения различных схем пластической деформации для получения углеродистой проволоки с заданным уровнем механических свойств / М.В. Чукин, М.А. Полякова, К.Г. Пивоварова, А.Е. Гулин, Д.Г. Емалева // *Многофункциональные конструкционные материалы нового поколения: сборник статей / Под общ. ред. В.Е. Громова*. Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2015. – С. 174-182.

16. Ширяев, О.П. Особенности применения интервальной математики при управлении качеством продукции в технологиях метизного производства / О.П. Ширяев, А.Г. Корчунов, К.Г. Пивоварова // *Обработка сплошных и слоистых материалов*. – 2016. – № 2 (45). – С. 57-60.

17. Ширяев, О.П. Моделирование технологических процессов метизного производства в условиях неопределенности исходных данных / О.П. Ширяев, А.Г. Корчунов, К.Г. Пивоварова // *Обработка сплошных и слоистых материалов*. – 2017. – № 1 (46). – С. 45-49.

18. Ширяев, О.П. Моделирование и оптимизация процессов формирования показателей качества арматурных канатов / О.П. Ширяев, А.Г. Корчунов, К.Г. Пивоварова // *Качество в обработке материалов*. – 2018. – № 1 (9). – С. 22-28.

19. Регулирование механических свойств высокоуглеродистой проволоки перлитного класса с учетом особенностей изменения микроструктуры / М.А. Полякова, Ю.Ю. Ефимова, А.Е. Гулин, К.Г. Пивоварова // *Теория и технология металлургического производства*. – 2018. – № 4 (27). – С. 21-26.

Публикации в сборниках трудов конференций:

1. Влияние поверхностной механической обработки на структуру и свойства калиброванного металла / В.В. Чукин, А.В. Сабадаш, А.Г. Корчунов, К.Г. Пивоварова, В.Н. Челищев, Е.А. Слабозжанкин // Труды пятого конгресса прокатчиков. – М.: Черметинформация, 2004. – Т. 1. – С. 410-412.
2. Развитие производства калиброванного металла со специальной отделкой поверхности / А.Г. Корчунов К.Г. Пивоварова, В.Н. Челищев, А.Г. Виноградов, В.М. Одинаева // Теория и технология процессов пластической деформации - 2004: сб. докл. междунар. науч.-техн. конф. М.: МИСиС, 2004. – С. 83-84.
3. Разработка сквозной технологии производства калиброванного металла под штамповку шаровых пальцев автомобилей / А.Г. Корчунов, К.Г. Пивоварова, В.П. Рудаков, А.А. Чупин // Механика пластического формоизменения. Технологии и оборудование обработки материалов давлением: сб. докл. II междунар. науч.-техн. конф. – Тула: ТулГУ, 2004. С. 86-87.
4. Особенности формирования шероховатости поверхности при волочении калиброванного металла / А.Г. Корчунов, К.Г. Пивоварова, Е.П. Носков, А.А. Чупин, А.Г. Виноградов // Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов: сб. докл. междунар. науч.-техн. конф. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2005. – С. 360-362.
5. Гун, Г.С. Пути повышения точности размеров калиброванного металла для машиностроения / Г.С. Гун, А.Г. Корчунов, К.Г. Пивоварова // Образование через науку: сб. докл. междунар. конф. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – С. 211-212.
6. Прогнозирование изменения качества поверхности стали при волочении с малыми деформациями / А.Г. Корчунов, В.Н. Лебедев, В.Е. Семенов, К.Г. Пивоварова // Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов: сб. докл. междунар. науч.-техн. конф. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2007. – С. 344-346.
7. Теоретические аспекты процесса патентирования стальной углеродистой проволоки больших диаметров / В.В. Чукин, Г.С. Гун, Н.В. Копцева, К.Г. Пивоварова // Новые стали для машиностроения и их термическая обработка: тез. докл. науч.-техн. конф. Тольятти: ОАО «АВТОВАЗ», 2011. – С. 75-76.
8. Formalization control algorithm of carbonaceous nanostructured steels structure and properties with indetermined nature of material state parameters / M.V. Chukin, A.G. Korchunov, M.A. Polyakova, K.G. Pivovarova, A.V. Lysenin, A.E. Gulin // Metal: 21st International Conference on Metallurgy and Materials, 2012. – P. 151-156.
9. Гун, Г.С. Исследование физико-химическими методами технологических свойств смазок для сухого волочения калиброванного металла / Г.С. Гун, А.Г. Корчунов, К.Г. Пивоварова // New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering: XVI International scientific conference. A collective monograph edited by Henryk Radomiak. Series: Monografie № 48. Czestochowa, 2015. – P. 170-173.

10. Гун, Г.С. Исследования технологических свойств смазок для сухого волочения калиброванного металла / Г.С. Гун, А.Г. Корчунов, К.Г. Пивоварова // Труды X конгресса прокатчиков. Липецк 14-16 апреля 2015 г. – М.: Черметинформация, 2015. – Т. 1. – С. 222-225.

11. Разработка концепции совмещения процессов пластического деформирования для формирования ультрамелкозернистой структуры в длинномерных изделиях / М.В. Чукин, М.А. Полякова, Д.Г. Емалеева, К.Г. Пивоварова, А.Е. Гулин // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство: материалы Двенадцатой Всероссийской научно-практической конференции. – Старый Оскол: СТИ НИТУ МИСиС, 2015. – Т.1 – С. 170-177.

12. Особенности формирования наследственных связей в процессе комбинированной деформационной обработки углеродистой проволоки / М.А. Полякова, Э.М. Голубчик, А.Г. Корчунов, А.Е. Гулин, К.Г. Пивоварова // Наследственность в литейно-металлургических процессах. VIII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием. – Самара: СамГТУ, 2018. – С. 281-288.

13. Особенности формирования свойств и микроструктуры углеродистой проволоки после комбинированной деформационной обработки / М.А. Полякова, К. Нарасимхан, К.Г. Пивоварова, А.Е. Гулин, М.Дж.Н.В. Прасад // Функциональные материалы: прогнозирование свойств и технологии изготовления. Материалы международной научно-технической конференции. – Пермь: ПНИПУ 2019. – С. 15-23.

14. Полякова, М.А. Исследование структурных превращений горячекатаной высокоуглеродистой заготовки для высокопрочных канатов ответственного назначения методом термического анализа / М.А. Полякова, К.Г. Пивоварова // Современные достижения университетских научных школ. Сборник докладов национальной научной школы-конференции. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2020. – С. 28-32.

15. Pivovarova, K. Application of thermal analysis method for structural transformation of hot-rolled carbon billets for highstrength ropes / K. Pivovarova, D. Emaleeva // Magnitogorsk Rolling Practice 2020: Proceedings of the 5th International Youth Scientific and Technical Conference. Ed. by A.G. Korchunov. – Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2020. – P. 67-69.

16. Пивоварова, К.Г. Управление показателями качества метизной продукции с использованием принципов робастного проектирования / К.Г. Пивоварова, А.Г. Корчунов // Современные проблемы и перспективы развития науки, техники и образования. Материалы I Национальной научно-практической конференции. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2020. – С. 720-723.

17. Пивоварова, К.Г. Разработка методологии управления показателями качества метизной продукции / К.Г. Пивоварова // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 79-й международной научно-технической конференции. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2021. – Т.1. – С. 199.

Охранные документы:

1. Пат. 2759179 РФ, МПК В21С 3/00 (2006.01). Составная волока / А.М. Песин, В.А. Харитонов, А.Г. Корчунов, А.Я. Белов, Е. Пастернак, Д.О. Пустовойтов, К.Г. Пивоварова. Заявл. 12.04.2021; опубл. 09.11.2021; Бюл. № 31.

2. Автоматизированный расчет механических свойств стали в процессе волочения с кручением и изгибом /А.Е. Гулин, Д.В. Грачев, Д.Г. Емалеева, К.Г. Пивоварова, М.А. Полякова // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2016617752, 14.07.2016. Заявка № 2016615334 от 25.05.2016.

3. Автоматизированный расчет параметров микроструктуры стали в процессе волочения с кручением и изгибом / А.Е. Гулин, Д.В. Грачев, Д.Г. Емалеева, К.Г. Пивоварова, М.А. Полякова // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2016617750, 14.07.2016. Заявка № 2016615330 от 25.05.2016.