

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»



На правах рукописи

Пивоварова Ксения Григорьевна

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

05.02.23 – Стандартизация и управление качеством продукции

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант:

доктор технических наук, профессор
Корчунов Алексей Георгиевич

Магнитогорск – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
Глава 1 Современные подходы к управлению качеством металлопродукции	14
1.1 Особенности технологических процессов метизного производства.....	14
1.2 Методы оценки качества металлопродукции.....	19
1.3 Анализ существующих моделей и методов управления качеством металлопродукции.....	24
1.4 Анализ процедуры робастного параметрического проектирования.....	35
1.4.1 Определение идеальной функции системы.....	38
1.4.2 Выбор фактора сигнала и его диапазона.....	38
1.4.3 Выбор метода измерения отклика на выходе.....	39
1.4.4 Разработка стратегии управления шумом, выбор факторов шума и их уровней.....	39
1.4.5 Выбор управляемых факторов и их уровней из параметров проекта.....	40
1.4.6 Распределение экспериментальных факторов между внутренней и внешней таблицами.....	41
1.4.7 Проведение эксперимента и сбор данных.....	42
1.4.8 Вычисление отношения сигнал/шум и чувствительности.....	43
1.4.9 Построение диаграмм эффектов факторов для отношения сигнал/шум и чувствительности.....	45
1.4.10 Выбор оптимальных условий.....	46
1.4.11 Оценка повышения робастности по приросту.....	47
1.4.12 Проведение проверочного эксперимента, контроль прироста и показателя «воспроизводимость».....	48
1.5 Выводы. Постановка цели и задач исследования.....	50
Глава 2 Разработка методологии управления качеством продукции метизного производства с элементами робастного параметрического проектирования.....	53
2.1 Формализация описания технологического процесса метизного производства в условиях параметрической неопределенности.....	53

2.2	Идентификация возмущающих факторов в технологиях метизного производства.....	64
2.3	Процедура количественной оценки технологической неопределенности	69
2.4	Стратегия робастного параметрического проектирования технологических процессов метизного производства.....	75
2.4.1	Количественная оценка робастности процесса	75
2.4.2	Оптимизация процесса по показателю технологической устойчивости.....	77
2.4.3	Оптимизация процесса по реляционной оценке.....	82
2.4.4	Оценка показателей качества продукции на соответствие требованиям потребителя.....	84
2.4.5	Контрольный эксперимент.....	87
2.5	Выводы по главе.....	91
Глава 3 Реализация методологии при освоении новой продукции метизного производства (на примере изготовления калиброванной стали)...		
3.1	Требования потребителя к калиброванной стали	94
3.2	Формализация описания технологии производства калиброванной стали.....	95
3.3	Разработка стратегии управления возмущающими факторами при производстве калиброванной стали.....	102
3.4	Робастное параметрическое проектирование технологии производства калиброванной стали	110
3.5	Промышленная реализация новой технологии производства калиброванной стали.....	123
3.6	Выводы по главе.....	128
Глава 4 Реализация методологии при совершенствовании действующей промышленной технологии (на примере производства стабилизированных арматурных канатов).....		
4.1	Характеристики стабилизированных арматурных канатов и порядок проведения технологического процесса.....	131
4.2	Разработка математических моделей для управления качеством стабилизированных арматурных канатов	134

4.3 Оценка технологической неопределенности, возникающей при производстве стабилизированных арматурных канатов.....	139
4.4 Оценивание робастности технологии производства стабилизированных арматурных канатов.....	153
4.5 Реализация усовершенствованной технологии производства стабилизированных арматурных канатов.....	172
4.6 Выводы по главе.....	173
Глава 5 Реализация методологии при совершенствовании отдельно взятой технологической операции (на примере операции стабилизации высокопрочной арматуры).....	175
5.1 Современные требования к высокопрочной арматуре и анализ технологии производства.....	175
5.2 Разработка математических моделей для управления качеством высокопрочной арматуры на операции стабилизации.....	181
5.3 Исследование воздействий возмущающих факторов при стабилизации высокопрочной арматуры	186
5.4 Оценивание робастности операции стабилизации высокопрочной арматуры	199
5.5 Реализация усовершенствованного режима стабилизации высокопрочной арматуры	215
5.6 Выводы по главе.....	217
Заключение.....	219
Список сокращений и условных обозначений.....	223
Список литературы.....	227
Приложение А	276
Приложение Б	278
Приложение В	279
Приложение Г.....	280
Приложение Д	281
Приложение Е	282
Приложение Ж	283

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Метизы, представляющие стандартизованные металлические изделия разнообразной номенклатуры, используются во многих отраслях промышленности – от строительства до машиностроения, поэтому процесс производства и требования к качеству метизной продукции достаточно разнообразны и специфичны.

Современный уровень развития метизного производства приводит к необходимости рассмотрения технологических процессов как сложных систем со многими элементами: стадиями производства, технологическими операциями, реализующими методы обработки различной физической природы, параметрами. В таких системах принятие решений по управлению качеством продукции сопряжено с анализом и обработкой значительного объема разнородной информации. Необходимость правильно интерпретировать информацию усложняется из-за возникающей неопределенности данных на различных иерархических уровнях технологической системы. Принятие решений в условиях возрастающей сложности и размерности систем метизного производства приводит к ошибкам, нарушению технологии производства и, в конечном счете, несоответствию продукции по качеству.

В задачах проектирования технологических процессов метизного производства всегда присутствует неопределенность в модели объекта и в знании входных возмущений. Современный период развития теории управления качеством продукции характеризуется постановкой и решением задач, учитывающих неточность наших знаний об объектах управления и действующих на них возмущающих факторов (шумов). Существующие методологии управления качеством металлических изделий предусматривают широкое использование экономических, организационных, технических, технологических и других методов. Однако, они недостаточно эффективны при решении

практических задач в условиях параметрической неопределенности, т.к. 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 метизной продукции.

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. Развитие и применение данного подхода для производства метизных изделий позволит снизить производственные вариации путем выбора оптимальных технологических режимов и обеспечить заданное качество готовой продукции. Это определяет актуальность разработки и применения научно обоснованной методологии управления качеством продукции на основе робастного подхода 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 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), ОАО «Магнитогорский метизно-калибровочный завод «ММК-МЕТИЗ», ООО «Русэлпром» (Москва), ЗАО «Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем» (Нижний Новгород), 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, Huu-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 факторов.

Целью диссертационной 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 достижения поставленной цели необходимо решить 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 и высокопрочной арматуры.

Научная новизна диссертационной 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 результатов 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, высокопрочной 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 технических 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, 2005, 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.).

Автор выражает глубокую благодарность Г.С. Гуну, М.А. Поляковой, А.Г. Ивахненко, В.А. Харитонову, Э.М. Голубчику, А.М. Песину, С.И. Платову, И.А. Михайловскому за научную и организационную помощь, ценные советы и критические замечания при подготовке диссертационной работы, сотрудникам ОАО «Магнитогорский метизно-калибровочный завод «ММК-МЕТИЗ» за помощь в проведении экспериментальных исследований.

ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К УПРАВЛЕНИЮ КАЧЕСТВОМ МЕТАЛЛОПРОДУКЦИИ

1.1 Особенности технологических процессов метизного производства

Метизное производство является мощной отраслью современного народного хозяйства с весьма сложными и разносторонними процессами и оборудованием. В период интенсивного развития отрасли выпускалось около 90 тыс. типоразмеров продукции более чем из 180 марок стали [1-11].

Метизные изделия – это стандартизованные металлические изделия разнообразной номенклатуры промышленного или широкого назначения. Метизы используются во многих отраслях промышленности – от строительства до машиностроения, поэтому процесс производства и требования к качеству метизной продукции достаточно разнообразны и специфичны [12-16].

Качество метизных изделий состоит из множества свойств, которые количественно характеризуются показателями качества. Номенклатура показателей качества метизной продукции включает в себя следующие группы свойств: эргономические, патентно-правовые, эстетические, безопасности, назначения, экономного использования сырья и материалов, транспортабельности, надежности, унификации, стандартизации, технологичности [17]. Выполнение такого множества требований невозможно без постановки и решения задачи оптимизации производственного процесса [18, 19].

Анализ тенденций развития отечественной промышленности указывает на то, что в кратко- и среднесрочной перспективе распространение получат технологические процессы производства металлоизделий с уникальным комплексом потребительских свойств. При этом известные традиционные подходы к разработке, анализу и исследованию таких процессов становятся малоэффективными [20].

Современный уровень развития метизного производства приводит к необходимости рассмотрения технологических процессов как сложных систем со многими технологическими операциями и параметрами. В таких системах принятие решений сопряжено с анализом и обработкой значительного объема разнородной информации. Необходимость правильно интерпретировать и агрегировать данную информацию усложняется из-за возникающей неточности и неопределенности данных на различных иерархических уровнях системы. Принятие решений в условиях возрастающей сложности и размерности систем метизного производства приводит к ошибкам, нарушению технологии производства и, в конечном счете, несоответствию продукции по качеству [21].

Для анализа сложных технологических процессов в научно-технической литературе введено понятие «многостадийные процессы», т.е. процессы, состоящие из последовательных во времени и пространстве стадий производства, через которые проходят вещества, обращающиеся в системе. Применительно к технологическим процессам метизного производства термин «многостадийность» рассматривается как набор последовательных одностадийных операций, связи между которыми жестко фиксированы [20].

Технологический процесс производства метизных изделий представляет собой комплекс взаимосвязанных и взаимодействующих процессов, осуществляющих глубокую переработку продукции черной металлургии. Особенностью технологических систем метизного производства является физическая разнородность входящих в нее подсистем. К числу базовых технологических процессов относятся технологии горячей и холодной обработки металлов давлением, обработки резанием, термической и химико-термической обработки [17].

В инженерных задачах проектирования технологических процессов метизного производства всегда присутствует неопределенность в модели объекта (математическая модель объекта, полученная на основе теории или в результате эксперимента, отличается от реальной технической системы) и в

знании входных возмущений. Современный период развития теории управления характеризуется постановкой и решением задач, учитывающих неточность наших знаний об объектах управления и действующих на них возмущающих факторов (шумов) [22]. Под шумами понимается любой фактор, который приводит к вариабельности продукции или процесса. На рисунках 1.1-1.4 приведены известные классификации шумов [22-28].

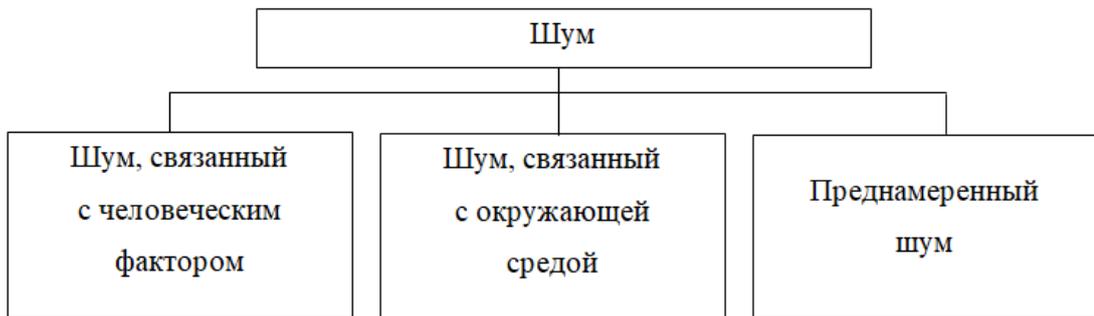


Рисунок 1.1 – Классификация шумов по Г. Тагути [23]

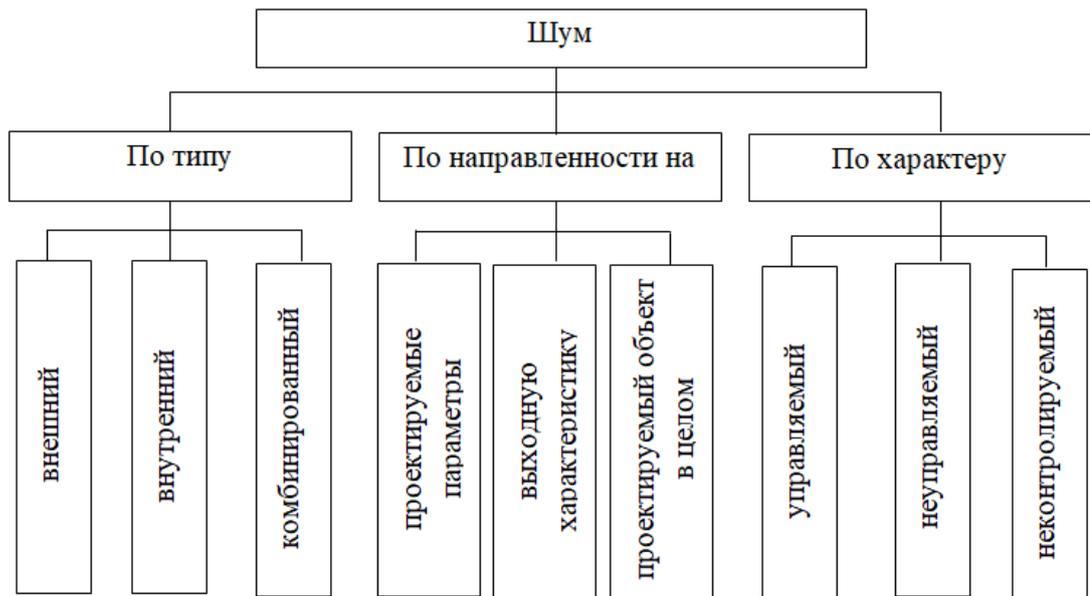


Рисунок 1.2 – Классификация шумов по Г.В. Табунщик [25-28]

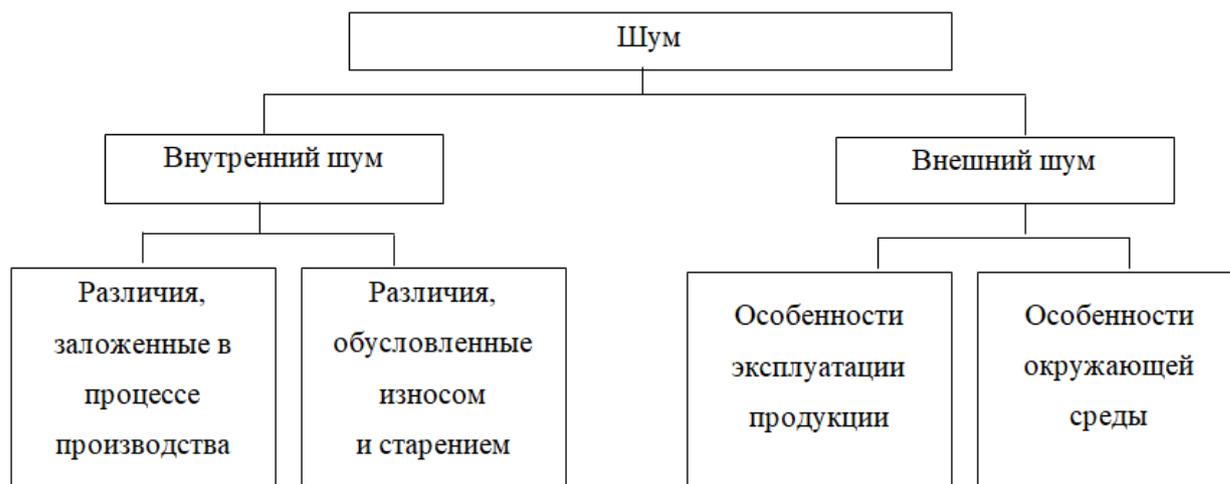


Рисунок 1.3 – Классификация шумов по Ю.В. Брагину [22]

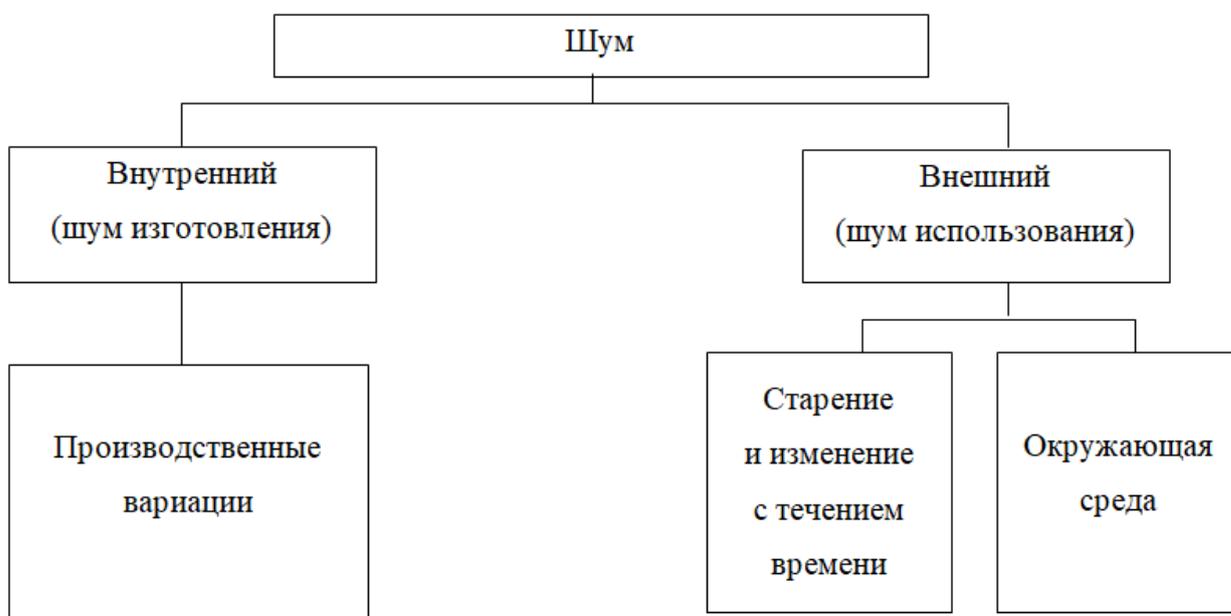


Рисунок 1.4 – Классификация шумов по ГОСТ Р ИСО 16336-2020 [28]

Шумы подразделяются на внешние и внутренние. Внешние шумы определяются как источники вариабельности, не зависящие от вида продукции:

- температура, влажность окружающей среды;
- наличие пыли;
- нежелательные входные воздействия, к которым чувствительна продукция [29].

Внутренние шумы обусловлены теми различиями, которые закладываются в продукцию на этапе производства. Как известно, все характеристики продукции свободным образом варьируются в пределах некоторых, наперед заданных допусков [22, 30-32]. Изменение параметров технологического процесса приводит к вариабельности продукции. Типичные примеры таких отклонений:

- неравномерное качество сырья;
- несовершенство технологического оборудования;
- неточность средств измерений.

Воздействие внутренних шумов в процессах метизного производства оказывает существенное влияние на показатели качества продукции. Ситуация усложняется тем, что большинство из этих шумов неуправляемые и неконтролируемые. Примерами таких шумов является износ оборудования и инструмента, ошибки оператора, неточность средств измерения. Эти шумы должны учитываться наряду с управляемыми шумами.

Таким образом, при разработке и совершенствовании технологических процессов метизного производства, направленных на обеспечение заданного уровня показателей качества, необходимо учитывать следующие особенности:

- широкую номенклатуру типоразмеров производимой продукции;
- индивидуальные характеристики каждого изделия;
- большое количество показателей качества продукции;
- многостадийность технологических процессов;
- совмещение методов обработки различной физико-химической природы в технологическом процессе производства;
- наличие неопределенности и неточности информации о технологическом процессе производства;
- воздействие возмущающих факторов различного происхождения, в большинстве своем неконтролируемых и неуправляемых.

1.2 Методы оценки качества металлопродукции

Качество метизной продукции определяется множеством показателей, часть из которых могут быть величинами метрическими, а часть – неметрическими, имеющими вербальное описание. Если даже эти показатели имеют представление в шкале физических значений, встает проблема определения обобщенного показателя качества. Без этого невозможен всесторонний и глубокий анализ качества и оценка влияния на него входных переменных [33, 34].

Методы обобщенной оценки получили широкое применение для решения различных задач количественного оценивания качества продукции. При выборе метода комплексной оценки качества необходимо руководствоваться критериями чувствительности метода к нелинейным изменениям оценки обобщенного показателя, учета совместного влияния нескольких единичных показателей качества на обобщенный показатель и минимальной собственной ошибки метода [35].

Комплексный показатель представляет собой функцию от единичных показателей качества продукции и может быть выражен:

- главным показателем, отражающим назначение продукции, чаще всего он функционально связан с исходными показателями;
- средневзвешенным показателем;
- интегральным показателем, характеризующим в общей форме эффективность работы изделия [36-38].

В работе [39] комплексный показатель (M) представляется в виде произведения оценок единичных показателей (K), определяемых как вероятность попадания в диапазон допуска

$$M = f \prod_1^k (1 - q_i), \quad (1.1)$$

где f – весовая поправка на оценку повышения качества за счет изменения условий производства;

q_i – вероятность выхода за поле допуска единичного показателя.

В работе [40] качество оценивается показателем $A_{\text{км}}$ – вероятностью выхода значений σ_i за нижнюю границу $\sigma_i^{\text{ГОСТ}}$

$$A_{\text{км}} = P(\sigma_i - \sigma_i^{\text{ГОСТ}}). \quad (1.2)$$

В работе [41] комплексная оценка качества проката K определяется как сумма оценок единичных показателей k_i

$$K = \sum_1^n \lambda_i k_i, \quad (1.3)$$

где λ_i – коэффициент весомости;

k_i – единичный показатель качества.

Коллективом ученых Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова (далее – МГТУ им. Г.И. Носова) под руководством Г.С. Гуна предложена методология комплексной оценки качества продукции [42], согласно которой свойства ранжируются по статусу на компенсируемые и доминирующие, а также ряд формул, отражающих этот статус свойств. По предложенной терминологии компенсируемые – это свойства, оценка которых повышает или понижает комплексную оценку свойств одного уровня, но не может обратить ее в ноль. Доминирующие – это свойства, нулевая оценка которых приводит к нулевой комплексной оценке всех свойств данного уровня.

Предлагается следующая формула комплексного показателя ства K_o

$$K_o = \left[\prod_{i=1}^n D_i^{\alpha_i} \sum_{j=1}^m \beta_j k_j \right]^{0,5}, \quad (1.4)$$

где α_i, β_j – параметры весомости доминирующих и компенсируемых показателей; D_i – оценка качества по i -му доминирующему показателю;

k_j – оценка качества по j -му компенсируемому показателю.

Эта формула используется для оценки качества разного рода металлопродукции, в том числе для оценки эффективности мероприятий по совершенствованию исходных материалов, оборудования, технологий [43-45].

В работе [46] предложена методология комплексной оценки качества металлопроката. Комплексный критерий состоит из единичных показателей качества q_{ij} . Оценка качества по выбранному показателю выполняется на основе расчета вероятности попадания его значений в заданный интервал от K^H до K^B , т.е. нижнюю и верхнюю границу соответственно. При нормальном распределении дифференциальная оценка качества проката определяется как вероятность попадания в интервал $K^H \dots K^B$

$$P_{ij} = F(K^H) - F(K^B), \quad (1.5)$$

где $F(K^B)$ и $F(K^H)$ – интегральная функция распределения в точках K^H и K^B .

При решении задач комплексной оценки качества продукции и технологических процессов ее производства перспективность использования показал теоретический и математический аппарат квалиметрии в детерминированной постановке [17]. Данный подход был использован при разработке квалиметрических моделей для оценки эффективности альтернативных вариантов технологии производства различных видов металлопродукции (высокоточные фасонные профили, канатная проволока, автомобильный крепеж, элементы подвески автомобилей, плоского проката) через оценку изменения качества продукции при изменении технологии [47-55].

Сложности управления качеством возникают вследствие невозможности четкого формального определения качества. Качество может характеризоваться как измеряемыми физическими величинами, так и показателями, которые имеют только субъективно-вербальную характеристику. Для автоматизации задачи мониторинга качества необходимо формальное представление значений и тенденций изменения качества, характеризуемого множеством показателей.

В работе [33] предложена методика оценки качества в виде вектора показателей качества. Показатели качества принимают значения, полученные как в результате измерений, так и при экспертных оценках вербальных признаков. Характеристикой состояния качества является ковариационная матрица, которая характеризует нестабильность значений показателей. В качестве скалярной характеристики качества предлагается использовать значение энтропии, определяемое с помощью ковариационной матрицы.

Одним из наиболее эффективных методов получения обобщенного показателя качества продукции является метод, основанный на использовании функции желательности Харрингтона, согласно которому натуральные значения единичных показателей различной размерности преобразуются в безразмерные величины [56]. Это позволяет получить качественную и количественную оценку показателей с учетом их предельно допустимых значений. Обобщенный показатель качества D рассчитывается по формуле [57]

$$D = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n d_i}, \quad (1.6)$$

где n – количество показателей, используемых в данной системе;

d_i – значение отклика по шкале функции желательности.

Функция Харрингтона позволяет устанавливать соответствие между числовыми интервалами предпочтений и лингвистическими оценками желательности значений показателя оценки [58]. Интервалы принимают значения, убывающие непрерывно от 1 до 0 при изменении соответствующего параметра качества от наиболее к наименее желательным значениям. Лицо, принимающее решения задает конкретный вид функции желательности исходя из его субъективных представлений [59].

Функция желательности имеет следующие преимущества:

- является единой, т.е. выражается одним числом;
- является количественной;
- универсальная, т.е. может применяться в различных областях;

- является однозначной, т.е. заданному набору значений частных параметров оценки соответствует одно значение функции;
- простота преобразования показателей с помощью одного графика для всех критериев;
- на конечный результат при построении шкалы желательности влияют только личные предпочтения;
- всесторонне характеризует объект, т.е. соответствует требованию полноты;
- является адекватной. Под адекватностью обобщенной и частной функций желательности понимается их эквивалентность измеренным значениям параметров оптимизации. Таким образом, с функциями желательности можно проделывать все алгебраические действия, определенные на множестве значений параметров оптимизации [60].

Для получения шкалы желательности используется таблица соответствий между отношениями предпочтения в числовой и эмпирической системах (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Числовые интервалы шкалы Харрингтона [61]

Лингвистическая оценка	Интервалы значений функции желательности
Очень хорошо	1,00-0,80
Хорошо	0,80-0,63
Удовлетворительно	0,63-0,37
Плохо	0,37-0,20
Очень плохо	0,20-0,00

Шкала должна быть одинаковой для всех объединяемых параметров. Однако значения интервалов на шкале желательности не являются строго обязательными. Это вносит некоторый элемент субъективности в расчет функции Харрингтона, что относится к недостаткам данной методики.

В последнее время для решения задач комплексной оценки качества продукции перспективность использования показал серый реляционный анализ GRA (Gray Relational Analysis). GRA – это метод измерения в теории серых систем, определяющий уровень и степень отношения разнородных параметров для их дискретной последовательности. Метод GRA заключается в нормировании значений показателей качества в виде безразмерных величин, которые затем сводятся в единый безразмерный показатель качества – серую реляционную оценку множественных показателей качества [62, 63].

1.3 Анализ существующих моделей и методов управления качеством металлопродукции

Процесс управления качеством продукции представляет собой комплекс организационно-технических мероприятий, необходимых для мониторинга и оценки состояния качества, разработки, реализации и определения эффективности мер, направленных на повышение качества. В настоящее время для управления качеством метизных изделий применяются различные подходы, предусматривающие широкое использование экономических, организационных, технических, технологических и других методов [64].

Традиционный метод управления качеством метизных изделий основан на анализе отдельных характеристик и принятии решения об их соответствии установленному регламенту. Решение о соответствии продукции принимается в результате сравнения показателя с допусками, установленными в нормативной документации. Параметр, находящийся в пределах установленного допуска, считается годным. Если контролируемые параметры выходят за установленные допустимые пределы, продукция бракуется или направляется на доработку [65-67].

Обобщенная методика предполагает оценку качества продукции на основе концепции пригодности. В соответствии с этой концепцией качествен-

ной считается продукция, комплексные или интегральные показатели качества которой не ниже заданных. Качественной считается продукция, для которой выполняется неравенство

$$IP \geq IP_3, \quad (1.7)$$

где IP – фактический уровень качества;

IP_3 – заданный (требуемый) уровень качества.

Считая значения IP и IP_3 детерминированными и полностью определенными (определяемыми), несложно оценить качество продукции, однако такая оценка будет очень приближенной. Это вызвано тем, что результаты оценок экспертами единичных показателей и коэффициентов их значимости нельзя считать полностью детерминированными величинами. Относительно заданного (требуемого) уровня качества продукции ситуация является также не полностью определенной, зачастую требования потребителей известны не точно, а представлены интервалом значений $[IP_n, IP_b]$ [68].

Современная концепция обеспечения качества заключается в создании условий, обеспечивающих качество продукции уже на стадии ее изготовления. Одним из эффективных способов для осуществления такой гарантии является система статистического управления процессом SPC (Statistical Process Control), широко используемая в метизном производстве [69]. Система SPC позволяет своевременно определить моменты разладки технологического процесса, которые могут привести к появлению дефектов.

Значения показателей качества всегда содержат некоторую неопределенность, случайную составляющую. В случае метрических показателей неопределенность связана с невозможностью однозначного контроля и воспроизведения продукции и технологии. В случае вербальных показателей случайность вызвана несовпадением субъективных оценок экспертов [70].

Средством обнаружения неуправляемой неопределенности в методике SPC служит контрольная карта Шухарта, позволяющая визуализировать ход

процесса. Контрольные границы на карте Шухарта проводят на уровне $\pm 3\sigma$ (стандартное отклонение). Если процесс находится в стабильном состоянии и подчиняется нормальному закону, то 99,73% значений показателей не будут выходить за рамки контрольных пределов [71].

SPC рассматривает два варианта фактической неопределенности. В первом случае фактическая вариация параметра вызывается только случайными факторами (обычными причинами), а особые причины (такие как использование несоответствующих сырья и материалов, несоблюдение технологических режимов, несвоевременная смена инструментов и т.д.) отсутствуют. Такая неопределенность называется собственной неопределенностью процесса. Неопределенность, вызванная действием как обычных, так и особых причин, называется полной неопределенностью процесса и фактически является проявлением пригодности процесса для удовлетворения требований потребителя [72].

Для того чтобы быть приемлемым, т.е. пригодным для получения заданного качества, процесс, во-первых, должен быть статистически управляемым, и, во-вторых, собственная неопределенность, присущая процессу, должна быть меньше установленного допуска [73].

В тех случаях, когда параметр качества измеряют по количественному признаку, и заданы значения пределов поля допуска на этот параметр, можно оценить возможности процесса с помощью индексов воспроизводимости (возможности) процессов. Индексы воспроизводимости C_p и C_{pk} используются для оценки возможности стабильного процесса, а индексы пригодности P_p и P_{pk} – для процессов, стабильность которых не подтверждена [73]. Причем индексы C_p и P_p учитывают только неопределенность процесса, а индексы C_{pk} и P_{pk} – как вариабельность, так и центрирование процесса. Как показывает опыт применения статистических методов в производственной практике, в тех организациях, где последовательно разворачиваются цели от уровня всего предприятия до уровня показателей отдельных процессов, достигается наилучший результат [74].

Необходимо отметить, что для наиболее эффективного использования статистических методов требуются большие массивы выборок [75]. Однако на практике разработчик технологии метизного производства находится в более жестких условиях, и должен принимать решения на основе малого объема данных. Таким образом, необходимы такие подходы и методологии, которые способны функционировать с использованием имеющегося статистического материала не только большого, но и малого объема.

К статистическим методам управления качеством также относится методология искусственных нейронных сетей [76]. Нейронные сети представляют собой самообучающиеся системы, имитирующие деятельность человеческого мозга. Учеными МГТУ им. Г.И. Носова под руководством В.М. Салганика выполнены научно-исследовательские работы по применению искусственных нейронных сетей для прогнозирования механических свойств проката. В частности, для широкополосного стана горячей прокатки 2000, сортовых станов 450, 370 и 170 ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (далее – ПАО «ММК») разработаны и адаптированы нейросетевые модели прогнозирования механических свойств [77].

Для получения эффекта от использования нейронных сетей необходимы большие объемы статистической информации, снимаемой автоматически в режиме реального времени с действующего технологического процесса, с целью его обучения. Это делает нецелесообразным или значительно усложняет применение нейронных сетей в условиях неполноты информации на этапе разработки технологических процессов и режимов [76].

Одним из путей решения проблемы неопределенности входных данных процесса является стохастический подход, при котором неточно известные данные считают случайными величинами с известным распределением. Допустимое решение задачи оптимизации должно удовлетворять ограничениям задачи с требуемой вероятностью, близкой к единице. В частности, предлагается применение данного метода для обработки давлением конструкционных углеродистых сталей [78-81].

Стохастическое моделирование не получило широкого развития в метизном производстве, что вызвано следующими его недостатками:

1. Прежде, чем ставить задачу управления на основе стохастических моделей и выбрать соответствующую модель, требуется определить плотность распределения исследуемого параметра. Однако на практике возникают существенные затруднения с получением плотностей распределения параметров стохастических моделей и их достоверностью в промышленных и лабораторных условиях. В большинстве случаев такая информация вообще отсутствует при разработке технологических процессов и режимов производства и требуется значительное время для ее сбора и обработки.

2. Стохастические формулировки задач оптимизации оказываются чрезвычайно трудоемкими с точки зрения вычислений, не позволяющими гарантированно отыскать приближенное решение за разумное время с высокой точностью.

Таким образом, стохастический подход является эффективным в условиях достаточного количества технологической информации, необходимой для управления показателями качества, однако, он достаточно сложен для реализации и не может эффективно применяться в условиях нечеткости и неполноты входных данных [82].

В настоящее время активно развиваются методы управления качеством на основе теории нечетких множеств, которые позволяют преодолевать затруднения, связанные с расплывчатостью и неполнотой информации. В результате этого создан математический аппарат для построения моделей управления на основе нечеткой логики, который отличается возможностью использования лингвистических и нечетких переменных. Благодаря этому, появилась возможность более адекватного описания реальной ситуации с учетом нечеткости и неполноты исходной информации [83].

Данный подход был успешно применен в метизном производстве. Магнитогорскими учеными Г.С. Гуном, Г.Ш. Рубиным и А.Г. Корчуновым на основе нечетких множеств и с помощью построения нечетких моделей

описания технологической наследственности разработан методологический подход к управлению качеством метизной продукции [17, 84].

С целью осуществления структурной идентификации математической модели была формализована процедура задания в виде лингвистических и нечетких переменных показателей качества продукции и параметров управления технологическими процессами [85-86].

В работах [87-89] предложены математические модели для формализации взаимосвязи между показателями качества изделий и параметрами управления, представляющие собой совокупность логических правил управления «если...то», в которых условия и заключения формулируются с применением лингвистических переменных, описывающих процесс управления качеством продукции. Адаптирован алгоритм принятия решений для работы с данными математическими моделями, состоящий из последовательности операций:

- фазификация входных параметров;
- агрегирование подусловий в логических правилах;
- композиция или активизация подзаключений в правилах;
- аккумуляирование заключений логических правил;
- выбор четкого значения нечеткой выходной переменной.

Разработанная методология позволяет выделить технологические режимы, снижающие неблагоприятные проявления наследственности и обеспечивающие требуемое качество продукции, которые затем фиксируются с помощью коэффициентов оперативной трансформации в виде системы технологических ограничений [87-89].

Несмотря на универсальность метода управления и оценки качества в технологических процессах метизного производства, представленный выше подход обладает следующими ограничениями:

1. Описанный подход не позволяет оперативно управлять качеством на отдельно взятой технологической операции, т.к. вклад отдельных влияющих параметров на данный показатель не всегда очевиден.

2. Предложенный метод не обеспечивает возможность прогнозирования уровня показателей качества готовой продукции. Данная задача встает перед производством в случае изготовления инновационной продукции, либо продукции с нестандартными показателями качества.

3. Для построения нечеткого множества необходимо знать распределение значений параметра внутри этого множества. Такая информация зачастую отсутствует, т.е. переменные могут принимать любые значения из заданного интервала.

В большинстве известных методов управления качеством в сложных технологических системах отсутствует методика принятия решений по организации производства в случаях, когда:

- отсутствует нормативная база на новый вид продукции, либо требуемые потребителем показатели расходятся с нормативной документацией;
- нечетко сформулированы и не до конца осознаны потребителем требования к продукции;
- производитель не имеет технологических возможностей, чтобы обеспечить в полном объеме показатели, требуемые потребителем.

Все это в совокупности усложняет построение эффективной комплексной технологической системы производства, а в отдельных случаях не позволяет изготовить продукцию с уровнем качества, необходимым для потребителя [90].

В МГТУ им Г.И. Носова группой ученых под руководством Э.М. Голубчика разработана методология адаптивного управления качеством в условиях технологической многовариантности, которая реализует методы оперативного технологического воздействия на показатели качества металлоизделий в процессе их изготовления [91]. В рамках предложенного методологического подхода была разработана система адаптивного управления качеством металлопродукции применительно к многовариантным технологическим системам [92].

Под термином «многовариантная технологическая система» предполагается система, в которой реализуется возможность обеспечения требуемого уровня показателей качества при помощи множества вариантов технологического воздействия на показатели на каждой производственной операции. Под «вариантом» понимается суммарное технологическое воздействие, приводящее к поэтапному изменению системы показателей качества продукции, что позволяет достичь нормируемого конечного значения. Понятие «технологическая адаптация» показателей качества подразумевает целенаправленный процесс изменения технологической системы согласно определенным критериям приспособления ее функций и структуры к условиям внешней среды. Это позволяет обеспечить достижение целей системы, например, ожиданий потребителей, соответствующего уровня показателей качества, гармонизации нормативной базы [93].

Разработанная система управления состоит из двух уровней. На первом (подготовительном) уровне управления происходит формирование и набор технологической базы данных обо всех возможных в условиях предприятия технологических схемах для каждого вида продукции с фиксированием достигаемого уровня качества, либо диапазона неопределенности показателей качества.

В ситуации, когда в технологической базе отсутствуют варианты, позволяющие обеспечить производство продукции с требуемым уровнем качества, происходит переход на второй (адаптивный) уровень, на котором собственно реализуется модель адаптивного управления качеством [94].

Для конкретного потребителя устанавливается комплекс нормируемых им показателей качества и оценивается набор технологических схем, которые могут реализовать достижение требуемого уровня качества. При этом каждый допустимый маршрут, представляющий собой совокупность определенных операций обработки на определенном оборудовании, представляет собой отдельный вариант многостадийной технической системы [93].

К недостаткам данной методики можно отнести следующее:

- сложность реализации методики адаптивного управления на практике и внедрения ее в систему управления предприятием;

- отсутствие единого информационного пространства на крупном предприятии, где у каждого подразделения есть свои цели и задачи, выполнение которых зачастую имеет более высокие приоритеты, чем достижение общих глобальных целей, например, повышение качества продукции.

Одним из приоритетных и активно развивающихся направлений в настоящее время является робастный подход, который обеспечивает решение задач управления качеством для теоретически недостаточно изученных технологических систем, подверженных различным видам возмущающих воздействий [95-107].

Робастность – это состояние, в котором характеристики технологии, процесса или продукции нечувствительны (в определенном диапазоне) к воздействию возмущающих факторов (внешней среды или производственных) [108-119]. Термин «робастность» происходит от английского слова «robust», что означает «грубый» и характеризует нечувствительность системы к возмущающему воздействию.

Вследствие несовершенства производства, неопределенности действий оператора, износа и старения инструмента и других тому подобных возмущающих факторов существуют неизбежные вариации показателей качества продукции [120-129]. Возмущающие факторы сложно убрать, но можно уменьшить их влияние на показатели качества.

Методология робастного параметрического проектирования RPD (Robust parameter design), разработанная Г. Тагути, представляет собой эффективный подход к совершенствованию процесса производства [130-135]. Основной идеей данной методологии является снижение разброса выходных показателей качества путем использования таких подходов, которые уменьшают чувствительность к источникам разбросов [136-149].

Общепринятой концепцией достижения качества для производителей всегда является попадание всех изделий в пределы технических специфика-

ций. При этом все изделия в пределах спецификации считаются хорошими (приемлемыми), а все остальные – плохими. Такую концепцию иногда называют «допусковым мышлением» [150-157].

Г. Тагути предложил функцию потерь качества, по которой показатели, значения которых полностью совпадают по величине с номинальными значениями, считаются качественными, а всякое отклонение от номинала приводит к той или иной потере качества продукции. Указанные потери возрастают по мере отклонения действительных значений показателя качества от номинального. Потери качества могут иметь место, как у изготовителя, так и у потребителя продукции. Согласно теории Г. Тагути, стоимость потерь и качество анализируются совместно в виде функции потерь качества. Кроме того, составляющими этих потерь являются дополнительные расходы производителя по гарантийным обязательствам, неудовлетворенность потребителей, ухудшение репутации компании, влекущее за собой утрату части ранее принадлежавшего ей рынка [158-162].

Г. Тагути предложил параболическую функцию потерь качества как стоимостную оценку потерь потребителя и изготовителя при отклонении от целевого значения [163-174]. Кривая функции потерь качества представлена на рисунке 1.5.

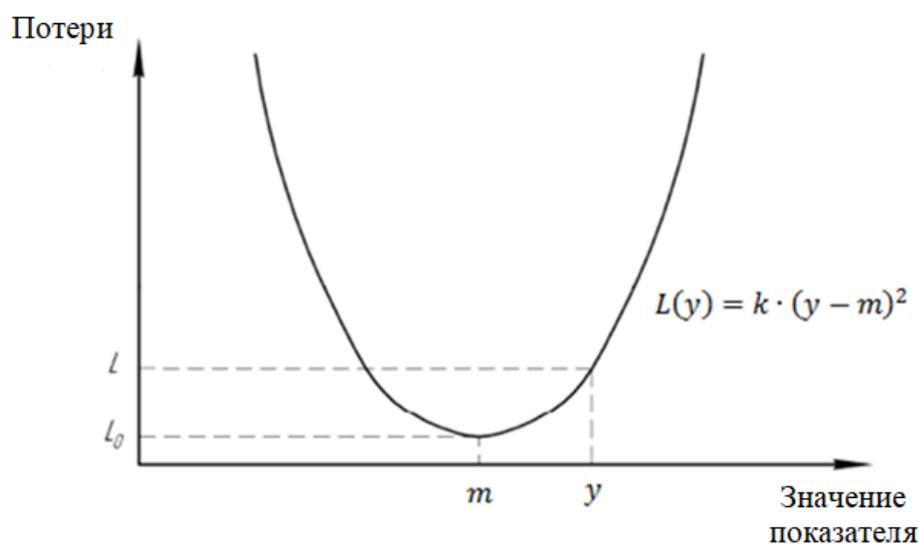


Рисунок 1.5 – Функция потерь качества по Г. Тагути [175]

В основе концепции робастного проектирования лежит положение, согласно которому любое отклонение рабочей характеристики от заданного значения наносит потери обществу. Степень отклонения от номинала оценивается с помощью функции потерь и имеет вид [176]

$$L(y) = k \cdot (y - m)^2, \quad (1.8)$$

где $L(y)$ – потери в стоимостном выражении из-за отклонения от середины поля допуска;

k – коэффициент потерь;

y – измеренное значение показателя качества;

m – номинальное значение показателя качества (середина поля допуска).

Коэффициент потерь определяется по формуле

$$k = \frac{A_0}{\Delta^2}, \quad (1.9)$$

где A_0 – потери в стоимостном выражении при выходе показателя качества за границы допуска;

Δ – величина допуска.

Основные принципы робастного параметрического проектирования технологического процесса и изделия по Г. Тагути [177-186]:

- при проектировании технологического процесса необходимо учитывать требования потребителей, а не предлагать потребителю характеристики, на которые настроен процесс;

- бессмысленно и невозможно улучшать все характеристики сразу, поскольку не все они одинаково важны. Необходимо и достаточно улучшить главные из них – выходные характеристики, а неблагоприятными факторами

управлять, исследовав их влияние, и изменяя их по такому закону, который позволял бы компенсировать их негативное влияние;

- необходимо стремиться не к попаданию размера в допустимый интервал, а в середину допустимого интервала;

- при любом прогнозируемом воздействии на изделие или технологический процесс его производства выходные характеристики изделия или стабильность производства не должны изменяться.

Внедрение методологии робастного проектирования для метизного производства дает следующие преимущества:

1. Робастный процесс производства отличается устойчивостью к влиянию нежелательных возмущающих факторов и потому обеспечивает своевременное производство и доставку продукта оптимального качества потребителю [187-190]. Затраты ресурсов при этом не превышают запланированных объемов [191-194].

2. При решении задачи робастного проектирования достаточно знать значение интервала изменения параметра, что дает возможность избежать процедуры вероятностного оценивания [195-197].

1.4 Анализ процедуры робастного параметрического проектирования

Вопросы управления качеством продукции с применением робастного параметрического проектирования были рассмотрены в работах [198-210].

Наиболее полно и последовательно методология робастного параметрического проектирования изложена в стандарте ГОСТ Р ИСО 16336-2020 «Статистические методы. Применение к новым технологиям и процессу разработки продукции. Робастное параметрическое проектирование (RPD)» [28].

Процедура робастного параметрического проектирования по ГОСТ Р ИСО 16336-20 представлена на рисунке 1.6.

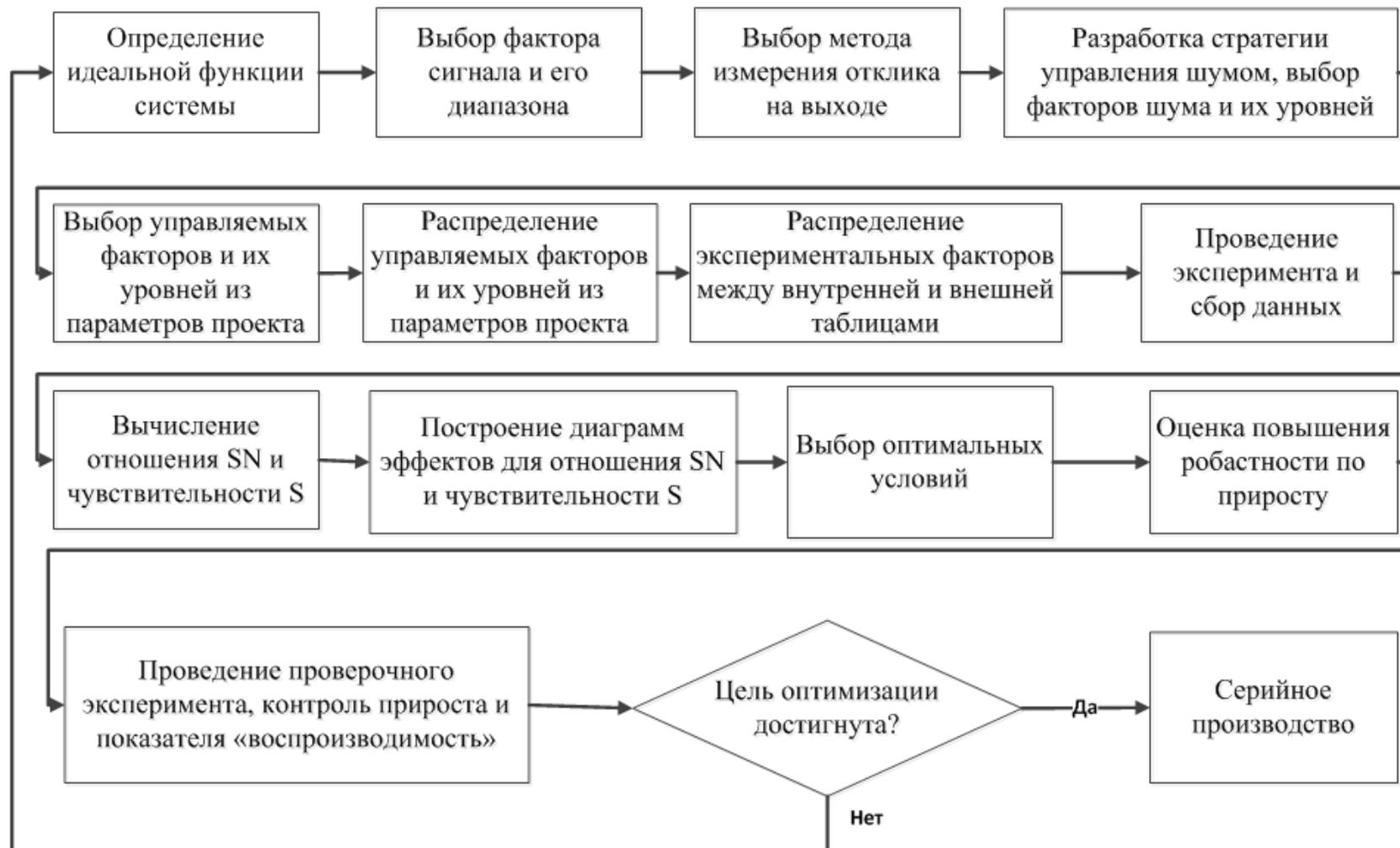


Рисунок 1.6 – Процедура робастного параметрического проектирования по ГОСТ Р ИСО 16336-2020

Стандарт ГОСТ Р ИСО 16336-2020 является руководством по применению методологии, основанной на методах Г. Тагути, для разработки робастной продукции. Термин «робастный» в стандарте означает минимальную вариабельность функции продукции при вариации факторов шума, т.е. нечувствительность функции продукции к изменениям уровней факторов шума.

Подход стандарта ГОСТ Р ИСО 16336-20 применим к широкому спектру изделий, включая продукцию пищевой, химической, машиностроительной промышленности, товары широкого потребления, электронику, программное обеспечение и т.д. Промышленные технологии также рассматриваются как продукция, которая используется в производственных процессах.

Целью робастного параметрического проектирования при разработке продукции является предотвращение появления дефектов, отказов и проблем с качеством при эксплуатации изделия под воздействием прежде всего «шумов использования», таких как температура, влажность, электрические помехи, фактическое напряжение питания, частота включения и нагрузка и т.д. Значительная часть метизов – это полуфабрикаты, предназначенные для дальнейшей переработки (например, калиброванный прокат, проволока, лента). Поэтому более актуальным для продукции метизного производства является достижение устойчивости к «шумам изготовления», возникающим из-за производственных вариаций, а не к «шумам использования».

В настоящее время робастное параметрическое проектирование имеет широкую область применения во многих отраслях промышленности [188-197], однако, несмотря на многочисленные исследования, до сих пор не было предложено комплексной методологии управления качеством продукции метизного производства, учитывающей влияние возмущающих факторов.

1.4.1 Определение идеальной функции системы

В стандарте ГОСТ Р ИСО 16336-20 используется термин «система», под которым подразумевается проектируемая продукция с входом и выходом. Под функцией системы понимаются действия, направленные на достижение цели системы. Функция обычно имеет вид математической зависимости между входной переменной и результатом на выходе.

Функцию, характеризующую идеальную зависимость между входом и выходом, называют идеальной функцией системы. Идеальную функцию невозможно реализовать в процессе производства продукции. Реальная функция будет отклоняться от идеальной функции из-за воздействий шума.

Таким образом, идеальная функция – это цель, к которой должна стремиться функция системы [30]. При оценке робастности реальная функция системы сравнивается с идеальной функцией данной системы. Для метизной продукции идеальной функцией системы будет зависимость

$$y = y^N, \quad (1.10)$$

где y – показатель качества;

y^N – номинальное (целевое) значение показателя качества.

1.4.2 Выбор фактора сигнала и его диапазона

Входом в систему является сигнал, т.е. переменная на входе в систему, которую намеренно изменяют для получения требуемого отклика на выходе [28]. Как видно из выражения (1.10) в случае метизной продукции сигнал отсутствует, таким образом, нет необходимости в его выборе.

1.4.3 Выбор метода измерения отклика на выходе

Выходом системы или откликом является характеристика, которая может быть двух типов: динамическая (отклик, зависящий от сигнала) и статическая (отклик, значение которого фиксировано) [28].

Для метизной продукции отклик является статической величиной, не зависящей от сигнала, поскольку сигнал отсутствует.

В свою очередь статические характеристики делятся на три группы в зависимости от целевого значения. Различают три вида характеристик:

- с двусторонним допуском («номинал – лучше»);
- с односторонним допуском с верхней границей («меньше – лучше»);
- с односторонним допуском с нижней границей («больше – лучше»).

1.4.4 Разработка стратегии управления шумом, выбор факторов шума и их уровней

Под шумом в робастном параметрическом проектировании понимают возмущающие факторы, которые нарушают функцию системы, т.е. изменяют значение отклика, отклоняя его от целевого значения. Поскольку шум оказывает негативное влияние на выход системы, то эффект от воздействия шума требуется минимизировать.

Как видно из рисунков 1.1-1.4, в большинстве приведенных классификаций проводится разделение внутреннего и внешнего шума. Наиболее развернутой является классификация, представленная на рисунке 1.2. В отличие от других классификаций в ней учитывается направленность действия и характер возмущающих факторов. Однако, ни в одной из классификаций не рассматриваются возможные источники возникновения шумов. При робастном параметрическом проектировании рекомендуется рассматривать как можно больше шумов, кроме того уровни факторов шума необходимо выбирать в широком диапазоне.

Согласно [28] составляется таблица факторов шума и его уровней (шумовая матрица). Использование шумовой матрицы усложняет и удорожает проведение эксперимента, т.к. каждый опыт должен проводиться несколько раз при разных уровнях фактора шума. Это приводит к тому, что исследователи отказываются от применения шумовой матрицы [98-107]. Проблема материально-технического обеспечения промышленного эксперимента остро стоит и перед производителями метизов. Существенное повышение стоимости и продолжительности проведения промышленных испытаний приводит к стремлению изыскивать способы минимизировать количество экспериментов.

1.4.5 Выбор управляемых факторов и их уровней из параметров проекта

Выбор управляемых факторов является важным этапом робастного параметрического проектирования, от которого зависит, насколько эффективно будет осуществляться управление процессом. Тем не менее в стандарте ГОСТ Р ИСО 16336-2020 отсутствует подробное описание алгоритма выбора управляемых факторов и их значимости. Более подробно этот вопрос рассмотрен в работе [29]. В других работах [97, 98] значимость управляемых факторов определяется путем дисперсионного анализа. Этот метод необходимо признать наиболее точным и подходящим для использования в технологических процессах метизного производства.

Поскольку оптимальный проект системы выбирается с учетом многих ограничений, то предпочтительно выбирать план экспериментов, охватывающий широкий диапазон в факторном пространстве, иначе может возникнуть ситуация, при которой оптимальные значения окажутся за областью эксперимента. В связи с этим рекомендуется выбирать уровни управляемых факторов в наиболее широком диапазоне.

1.4.6 Распределение экспериментальных факторов между внутренней и внешней таблицами

План эксперимента при параметрическом проектировании включает две ортогональные таблицы (см. рисунок 1.7): одна внутренняя – для управляемых факторов (матрица проектирования), другая внешняя – для факторов шума (матрица шумовых факторов). Столбцы внутренней таблицы представляют значения управляемых факторов, а каждая строка матрицы – вариант набора управляемых факторов. Столбцы внешней таблицы представляют шумовые факторы, а ее строки – различные комбинации уровней шумовых факторов.

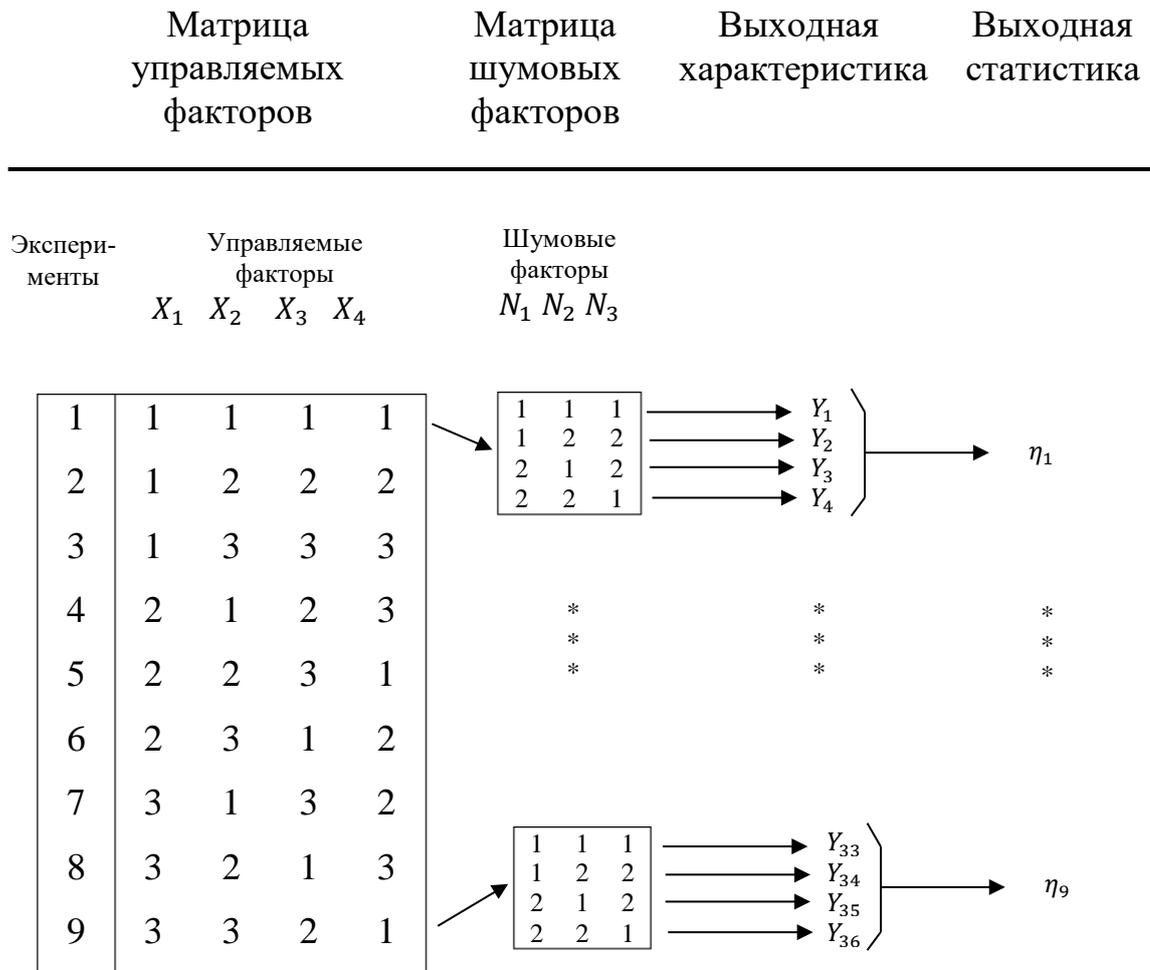


Рисунок 1.7 – План эксперимента с параметрами проектирования по Г. Тагути [97]

Если внутренняя таблица состоит из m строк, а внешняя таблица – из n строк, то общее число результирующих значений в эксперименте составит $m \times n$. Для каждой из m строк внутренней таблицы n строк внешней таблицы обеспечат n повторных результатов наблюдений за выходной характеристикой изделия [97]. Результаты наблюдений за характеристикой изделия для каждого набора управляемых факторов используются для вычисления критерия, называемого выходной статистикой.

В стандарте [28] рекомендуется при планировании эксперимента использовать ортогональные планы. Это позволяет, во-первых, сократить число опытов по сравнению с полным факторным экспериментом, во-вторых, разместить максимальное число управляемых факторов при том же числе опытов. Данный подход является эффективным для сокращения объема промышленных экспериментов в метизном производстве.

1.4.7 Проведение эксперимента и сбор данных

Проведение эксперимента является наиболее затратным этапом робастного параметрического проектирования. Затраты на его проведение можно избежать, используя методы математического моделирования для описания поведения сложных систем, подверженных воздействию различных возмущающих факторов. Применение данного подхода в технологиях метизного производства позволит:

- существенно экономить ресурсы за счет снижения стоимости и продолжительности испытаний;
- исследовать особенности функционирования системы в различных условиях, включающих критические;
- достигать оптимальные решения за счет гибкости и легкости варьирования структуры, алгоритмов и параметров.

1.4.8 Вычисление отношения сигнал/шум и чувствительности

Отношение сигнал/шум (далее – отношение SN) – это величина, количественно выражающая, насколько близко к идеальной функции находится фактическая зависимость между входом и выходом в различных условиях шума. Если отношение SN увеличивается, то реальная зависимость «вход-выход» приближается к идеальной, а потери уменьшаются, в противном случае реальная функция отклоняется от идеальной зависимости и потери возрастают.

Согласно концепции функции потерь качества Г. Тагути отношение SN можно преобразовать в общие потери качества, выраженные в денежных единицах. Общие потери качества включают в себя [28]:

- затраты на материалы;
- затраты на разработку продукции;
- затраты на производство;
- стоимость поставки;
- потери качества для потребителя;
- эксплуатационные расходы;
- расходы на утилизацию и т.д.

Различают три типа отношений SN:

- для динамических характеристик;
- для статических характеристик;
- для вычислительных систем.

Отношение SN для статических характеристик отражает стабильность выхода системы. Формула для расчета отношения SN для статических характеристик зависит от цели показателя качества. Существуют различные способы расчета отношения SN. Ниже представлена методика расчета в соответствии с [177].

Для цели «номинал – лучше»

$$\eta = 10 \lg \frac{\bar{y}^2}{s^2}, \quad (1.11)$$

где η – отношение SN;

\bar{y} – среднее измеренное значение показателя качества;

s – среднеквадратическая ошибка результатов измерений показателя качества.

Для цели «меньше – лучше»

$$\eta = 10 \lg \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{s^2}, \quad (1.12)$$

где y_i – измеренное значение показателя качества.

Для цели «больше – лучше»

$$\eta = -10 \lg \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}}{n}, \quad (1.13)$$

где n – количество измерений показателя качества.

Неудобство такого подхода заключается в невозможности сопоставления между собой отношений SN, рассчитанных при помощи разных формул. Метизная продукция часто характеризуется показателями качества с разными целями. Для обеспечения возможности их сравнения целесообразно выработать единый подход к расчету отношения SN.

Чувствительностью называется значение изменения отклика, вызванное изменением входной величины. Для статической характеристики чувствительность определяется как [29]

$$S = 10 \lg \bar{y}^2. \quad (1.14)$$

Причем чувствительность рассчитывается только для цели «номинал – лучше». Здесь снова проявляется разница в подходах для показателей качества с различными целями.

1.4.9 Построение диаграмм эффектов факторов для отношения сигнал/шум и чувствительности

Диаграмма эффектов факторов показывает влияние управляемых факторов, включенных в эксперимент, на функцию системы. Если какой-либо управляемый фактор имеет большой градиент, то он имеет большое влияние на функцию системы. Различают два типа диаграмм эффектов факторов: первый характеризует степень влияния факторов на отношение SN (рисунок 1.8), второй – на чувствительность (рисунок 1.9).

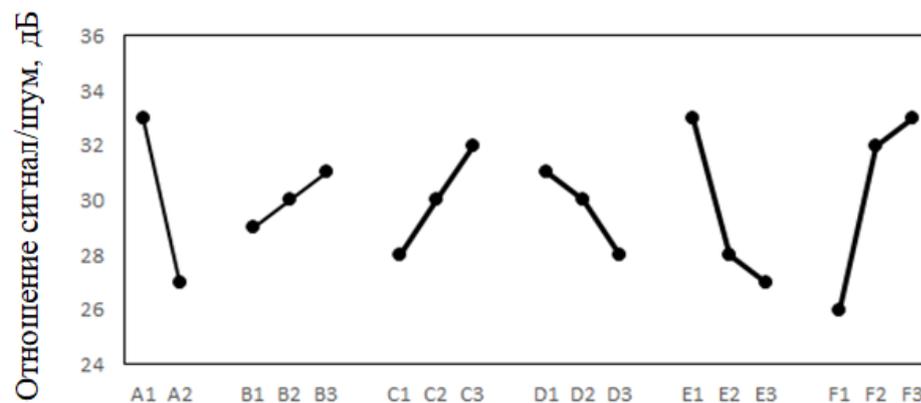


Рисунок 1.8 – Диаграмма эффектов для отношения SN [28]

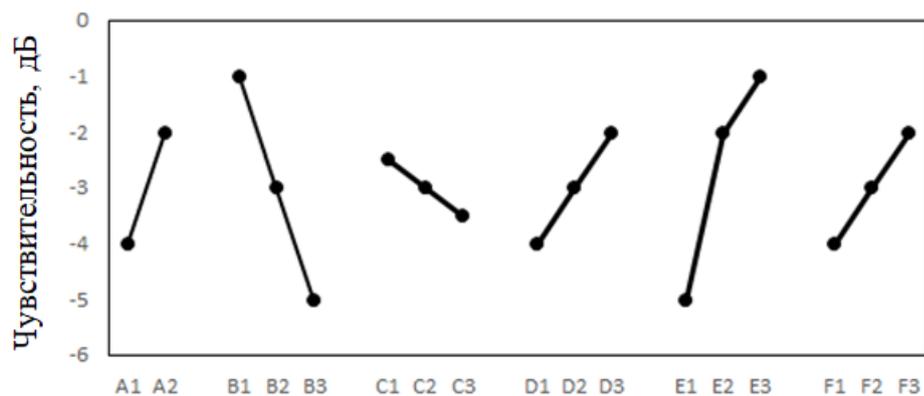


Рисунок 1.9 – Диаграмма эффектов факторов для чувствительности [28]

Диаграммы эффектов факторов используются для выбора оптимальных условий проекта.

1.4.10 Выбор оптимальных условий

При робастном параметрическом проектировании выбор оптимальных условий проекта достигается через максимизацию отношения SN. На первом этапе выбирают оптимальные уровни управляемых факторов, при которых обеспечивается максимальное отношение SN на соответствующей диаграмме эффектов факторов (см. рисунок 1.8).

На втором этапе корректируют среднее значение, т.е. чувствительность с целью достижения целевого номинала (см. рисунок 1.9). Для такой корректировки на диаграммах эффектов факторов желательно выбирать фактор с минимальным влиянием на отношение SN и максимальным влиянием на чувствительность. Такой фактор называется регулирующим [29].

Таким образом, двухэтапная оптимизация предполагает выполнение следующих шагов:

- максимизация отношения SN за счет минимизации чувствительности к возмущающим факторам;
- регулировка среднего значения к целевому номиналу.

Полученный вариант значений управляемых факторов соответствует робастному оптимальному режиму, который обеспечивает желаемое значение выходного показателя и одновременно минимизирует его изменчивость.

Однако найти регулирующий фактор можно далеко не всегда. В этом случае перед технологом встает выбор: что предпочесть – низкую изменчивость или близость к номиналу. В методологии [28] не дается указаний, что делать в такой ситуации.

1.4.11 Оценка повышения робастности по приросту

Для оценки эксперимента при робастном параметрическом проектировании важно определить величину прироста робастности. Этот показатель определяется как разность между отношениями SN, полученными для оптимального и базового условий проектирования. Вычисления прироста выполняются следующим образом.

Вычисляется отношение SN для оптимального режима [28]

$$\eta_{opt} = \bar{\eta} + \sum_{i=1}^n (\hat{\eta}_{iopt} - \bar{\eta}), \quad (1.15)$$

где $\bar{\eta}$ – среднее значение отношения SN;

$\hat{\eta}_{iopt}$ – среднее значение отношения SN при оптимальном значении i -го параметра управления;

n – количество параметров управления, существенно влияющих на целевую функцию.

Вычисляется отношение SN для базовых условий проектирования [28]

$$\eta_{base} = \bar{\eta} + \sum_{i=1}^n (\hat{\eta}_{ibase} - \bar{\eta}), \quad (1.16)$$

где $\hat{\eta}_{ibase}$ – среднее значение отношения SN при базовом значении i -го параметра управления.

Прирост отношения SN определяется как [28]

$$\Delta\eta = \eta_{opt} - \eta_{base}. \quad (1.17)$$

Прирост чувствительности вычисляют следующим образом. Чувствительность для оптимальных условий проектирования рассчитывается как [28]

$$S_{opt} = \bar{S} + \sum_{i=1}^n (\hat{S}_{i_{opt}} - \bar{S}), \quad (1.18)$$

где \bar{S} – среднее значение чувствительности;

$\hat{S}_{i_{opt}}$ – среднее значение чувствительности при оптимальном значении i -го параметра управления;

Чувствительность для базовых условий проектирования рассчитывается как [28]

$$S_{base} = \bar{S} + \sum_{i=1}^n (\hat{S}_{i_{base}} - \bar{S}), \quad (1.19)$$

где $\hat{S}_{i_{base}}$ – среднее значение чувствительности при базовом значении i -го параметра управления.

Тогда прирост чувствительности будет определяться как [28]

$$\Delta S = S_{opt} - S_{base}. \quad (1.20)$$

1.4.12 Проведение проверочного эксперимента, контроль прироста и показателя «воспроизводимость»

Для проверки прироста проводятся так называемые проверочные эксперименты в базовых и в оптимальных условиях проектирования. Затем вычисляют проверочные значения отношения SN, чувствительности и прироста [28].

В таблице 1.2 приведены значения отношения SN и чувствительности для базовых и оптимальных условий при робастном параметрическом проектировании.

Таблица 1.2 – Результаты проверочного эксперимента [28]

	Отношение SN, дБ		Чувствительность, дБ	
	Расчетное значение	Проверочное значение	Расчетное значение	Проверочное значение
Оптимальные условия	η_{opt}	η'_{opt}	S_{opt}	S'_{opt}
Базовые условия	η_{base}	η'_{base}	S_{base}	S'_{base}
Прирост	$\Delta\eta$	$\Delta\eta'$	ΔS	$\Delta S'$

Если проверочные и расчетные значения приростов для чувствительности и отношения SN практически одинаковы, то результаты робастного эксперимента демонстрируют высокую воспроизводимость и останутся таковыми в реальных условиях. В противном случае имеет место проблема с воспроизводимостью вследствие слабой аддитивности эффектов факторов. Тогда возникает необходимость в перепроверке определения идеальной функции, входных и выходных характеристик, стратегии управления шумом, плана эксперимента и т.д. [28].

Если значения прироста в проверочном эксперименте более воспроизводимы, чем расчетные значения, то это может указывать на наличие неизвестных шумовых факторов, которые сильно влияют на отклик или на отношение SN. Однако, если приросты воспроизводимы, то и эффекты рассматриваемых параметров управления тоже должны быть воспроизводимыми, и повышение робастности за счет выбора оптимальных условий относительно базового уровня будет воспроизводиться в реальных условиях.

Выгоду от улучшения базовой технологии при его оптимизации можно оценить через снижение потерь качества у потребителя и сравнение с затра-

тами на улучшение. Во многих случаях выбор оптимальных значений параметров требует очень незначительных затрат [28].

Проверочный эксперимент позволяет оценить адекватность робастного параметрического проектирования и достигнутый результат по улучшению показателей качества.

1.5 Выводы. Постановка цели и задач исследования

1. Технологический процесс метизного производства представляет собой сложную систему, характеризующуюся многостадийностью и физической разнородностью входящих в нее подсистем. В таких условиях решение задачи выбора, обоснования и построения эффективной технологической схемы производства, обеспечивающей достижение заданного уровня качества конечной продукции, сопряжено с анализом и обработкой значительного объема информации. Необходимость правильно интерпретировать и агрегировать информацию усложняется из-за неточности и неопределенности данных на различных иерархических уровнях технической системы, что связано с воздействием возмущающих факторов (шумов). Воздействие шумов оказывает существенное влияние на показатели качества продукции и должно учитываться при разработке новых и совершенствовании действующих технологических процессов метизного производства.

2. Проведен анализ известных подходов к количественному оцениванию качества металлопродукции, который выявил отсутствие обобщенного показателя устойчивости к возмущающим факторам технологической системы. Решение этой задачи делает возможным проведение всестороннего и глубокого анализа процесса производства и разработку организационно-технических мероприятий, направленных на повышение качества метизных изделий.

3. В современных условиях разработка эффективных методов управления качеством продукции является одной из актуальных проблем для

предприятий метизной отрасли. В известных методах управления качеством продукции метизного производства отсутствуют алгоритмы принятия решений по организации производства в условиях воздействия возмущающих факторов. В настоящее время широко применяется методология робастного проектирования, позволяющая решать задачи управления для теоретически недостаточно изученных систем, подверженных различным видам неопределенности. Разработка и внедрение данной методологии в метизное производство позволит разрабатывать новые и совершенствовать действующие технологические процессы, устойчивые к влиянию нежелательных возмущающих факторов, с минимальными затратами.

4. 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)». Подход настоящего стандарта применим к любой продукции, которую проектируют и изготавливают, включая станки, химикаты, электронику, пищевые продукты, потребительские товары, компьютерные программы, новые материалы, услуги, промышленные технологии. 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 робастного параметрического проектирования для многостадийных процессов производства. Таким образом, методология робастного параметрического проектирования, изложенная в стандарте ГОСТ Р ИСО 16336-2020, не может быть применена для решения практических задач метизной отрасли и должна быть усовершенствована и адаптирована к новым и действующим технологическим процессам производства.

Целью диссертационной 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 достижения поставленной цели необходимо решить 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 и высокопрочной арматуры.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ МЕТИЗНОГО ПРОИЗВОДСТВА С ЭЛЕМЕНТАМИ РОБАСТНОГО ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

2.1 Формализация описания технологического процесса метизного производства в условиях параметрической неопределенности

Современные технологии метизного производства базируются на принципах многостадийности и многовариантности. Многообразие возможных технологических схем, стадий и операций, участвующих в создании продукции, вызывает необходимость учета огромного числа факторов, воздействующих на процесс формирования комплекса свойств метизных изделий [20].

Формализация описания поведения сложных технологических систем в условиях параметрической неопределенности строится на представлении их в виде многоуровневых или иерархических систем с решением задач оптимизации. Процесс разработки проекта технологического процесса рассматривается в последовательных стадиях и этапах проведения. Фаза проектирования состоит из [211, 212]:

- концептуальной стадии, которая заключается в определении цели и выборе целевых критериев;
- стадии моделирования, которая состоит из этапов построения, анализа и оптимизации модели.

На этапе концептуальной стадии одним из наиболее проблемных вопросов является определение целевых критериев. Критерии должны соответствовать целям, но в то же время не могут полностью совпадать с ними, поскольку они выражаются по-разному: цели формулируются на основе ка-

чественных показателей, а целевые критерии должны быть оценены в тех или иных шкалах измерения [213].

В соответствии с робастным подходом цель проектирования технологического процесса метизного производства заключается в обеспечении выпуска продукции требуемого качества с минимальными потерями для потребителя.

Целевой критерий функционирования технологического процесса метизного производства – это числовая функциональная характеристика, оценивающая степень приспособления технологического процесса к выполнению поставленной перед нею задачи. В общем случае целевой критерий функционирования технологического процесса метизного производства зависит от параметров управления, структуры технологического процесса и возмущающих факторов [214]. В соответствии с поставленной целью критерий должен обеспечивать робастность процесса, т.е. устойчивость технологического процесса к различным видам возмущающих воздействий.

Следующей стадией разработки проекта технологического процесса метизного производства является его моделирование [215]. В последние годы для моделирования и анализа сложных систем широкое практическое применение получила теория графов. Графом в общем случае называется совокупность множества дуг и вершин. Представление технологической цепочки в форме ориентированного графа позволяет математически описать технологический процесс производства [216].

С помощью ориентированных графов обычно задается временная последовательность процесса обработки изделия. Например, множество вершин – это множество состояний изделия в процессе изготовления, а множество дуг – это множество операций изготовления изделия. Также при построении ориентированных графов можно использовать подход, согласно которому множество вершин – это множество технологических действий, выполняемых при изготовлении изделий, а множество дуг описывает временную последовательность действий [216].

Для описания многостадийного технологического процесса метизного производства предлагается использовать топологическую модель, представляющую собой графическое выражение связей между вершинами графа, где U -вершины обозначают параметры управления технологическим процессом, B -вершины – характеристики передельной заготовки, V -вершины – параметры качества исходной заготовки, Y -вершины – показатели качества, W -вершины – соотношения, уравнения, связывающие переменные (рисунок 2.1).

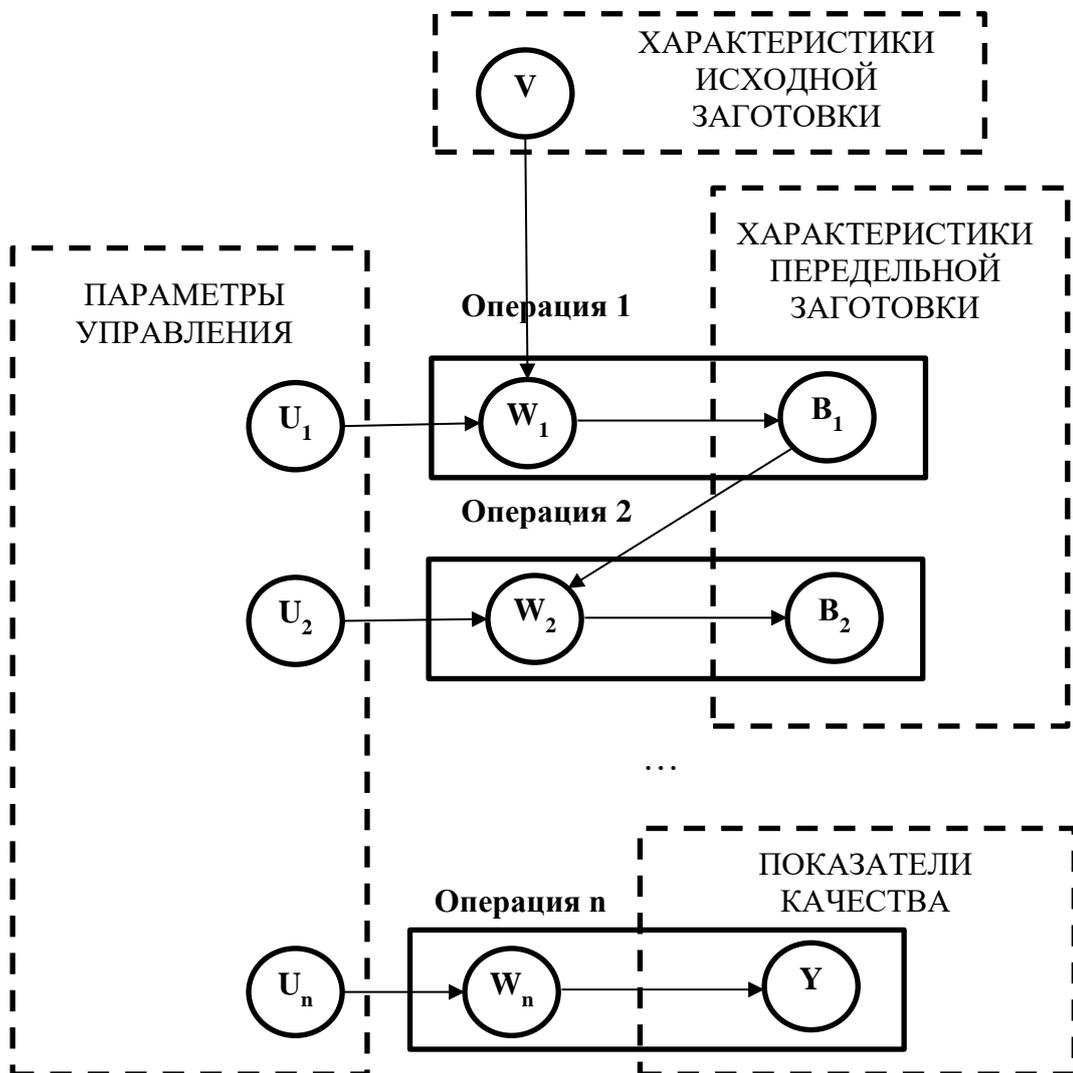


Рисунок 2.1 – Топологическая модель многостадийного технологического процесса

Построение графа позволяет наглядно представить структуру модели многостадийного технологического процесса. Однако, из-за большого количества технологических операций в многостадийном процессе, полученная модель может оказаться сложной для анализа, поэтому предлагается применять декомпозиционные подходы, которые сводятся к расчленению исходной системы на структурные составляющие.

Декомпозиция заключается в выделении одной или нескольких технологических операций из общей системы. Иными словами, если имеется модель технологического процесса M , состоящего из n операций, то из нее всегда можно выделить модель M' в качестве подсистемы, соответствующую операции m (рисунок 2.2). При выделении подмодели M' из M параметры U_m остаются управляющими параметрами, B_{m-1} становятся входными, B_m – выходными параметрами.

Частным случаем декомпозиции является выделение операции 1 , т.е. первой операции в технологической цепочке (рисунок 2.3). В этом случае параметры U_1 остаются управляющими, параметры V остаются входными, а B_1 становятся выходными параметрами.

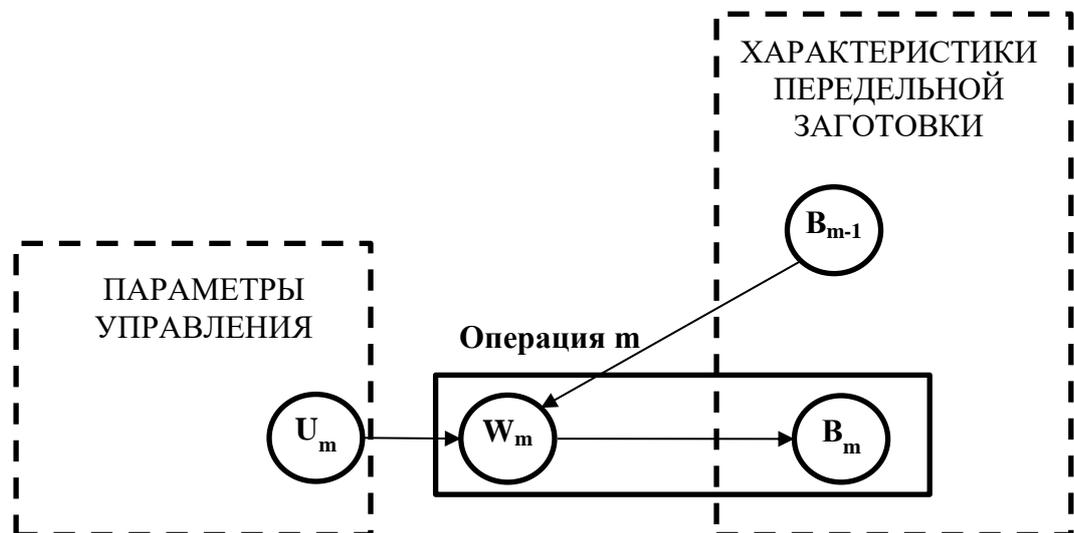


Рисунок 2.2 – Декомпозиция модели многостадийного технологического процесса: выделение операции m

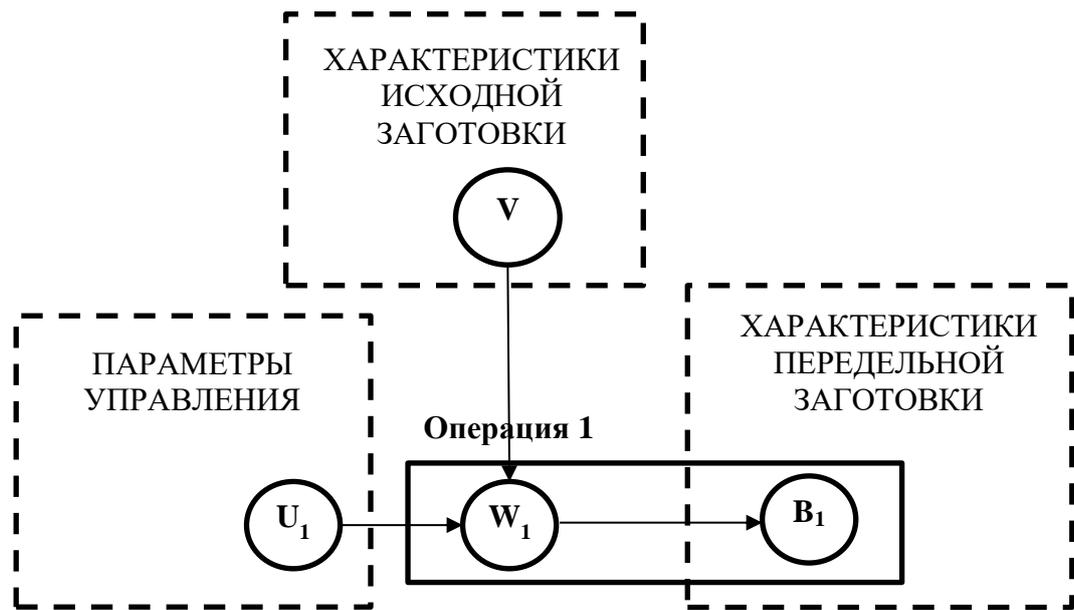


Рисунок 2.3 – Декомпозиция модели многостадийного технологического процесса: выделение операции 1

Другим частным случаем декомпозиции является выделение операции n , т.е. финишной операции в технологической цепочке (рисунок 2.4). В этом случае параметры U_n остаются управляющими параметрами, B_{n-1} становятся входными, Y остаются выходными параметрами.

Метод декомпозиции позволяет оценивать влияние как отдельно взятой технологической операции обработки, так и учитывать совокупный вклад смежных операций на комплекс свойств готового изделия.

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 [215-218].

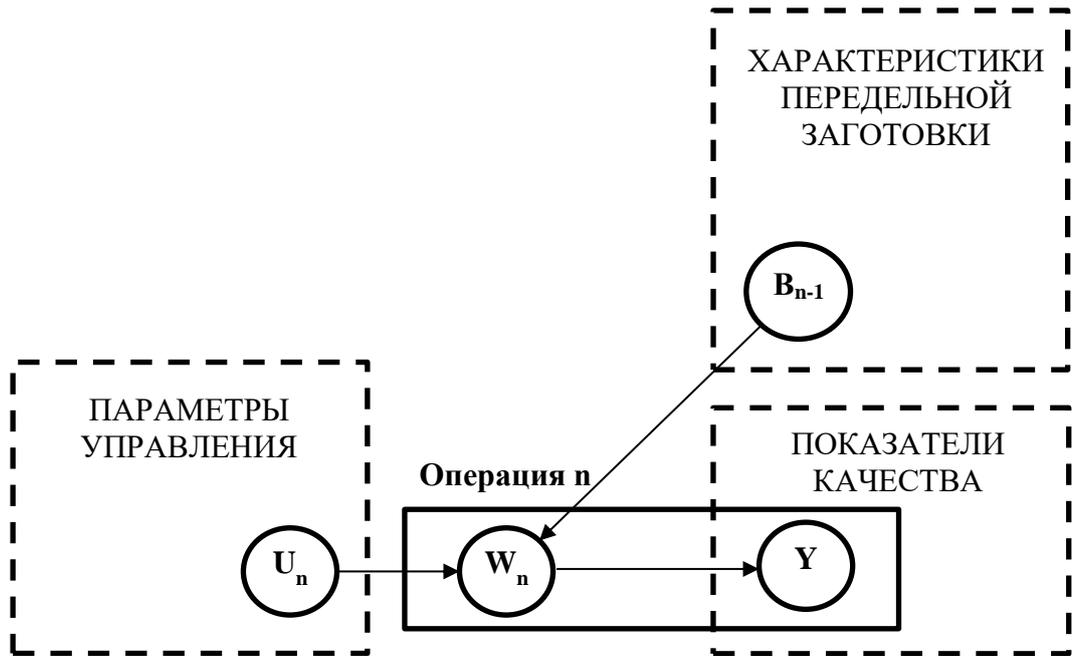


Рисунок 2.4 – Декомпозиция модели многостадийного технологического процесса: выделение операции n

Согласно [219-228] в общем виде структурную схему технологического процесса метизного производства можно представить в виде модели «черного ящика» (рисунок 2.5).

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

$$y_i = \mathfrak{M}(u_1, \dots, u_k; v_1, \dots, v_p; \xi_1, \dots, \xi_\alpha), \quad (2.1)$$

где u_k – k -й параметр управления;

v_p – p -я характеристика материала;

ξ_α – α -й возмущающий фактор.



$\mathfrak{M}(\cdot)$ – оператор модели; $g(\cdot)$ – оператор технологических ограничений;
 \mathfrak{Z} – 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; $\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_\alpha)$, $\xi \in E$ – вектор возмущающих факторов; $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$, $y \in Y$ – вектор показателей качества продукции

Рисунок 2.5 – Схема технологического процесса метизного производства

Процесс разработки математической модели многостадийного технологического процесса в виде блок-схемы представлен на рисунке 2.6.

Выделяют два основных подхода к получению математической модели: аналитический и экспериментальный [229].

При аналитическом подходе процессы функционирования элементов системы записываются в виде некоторых функциональных соотношений и логических условий.

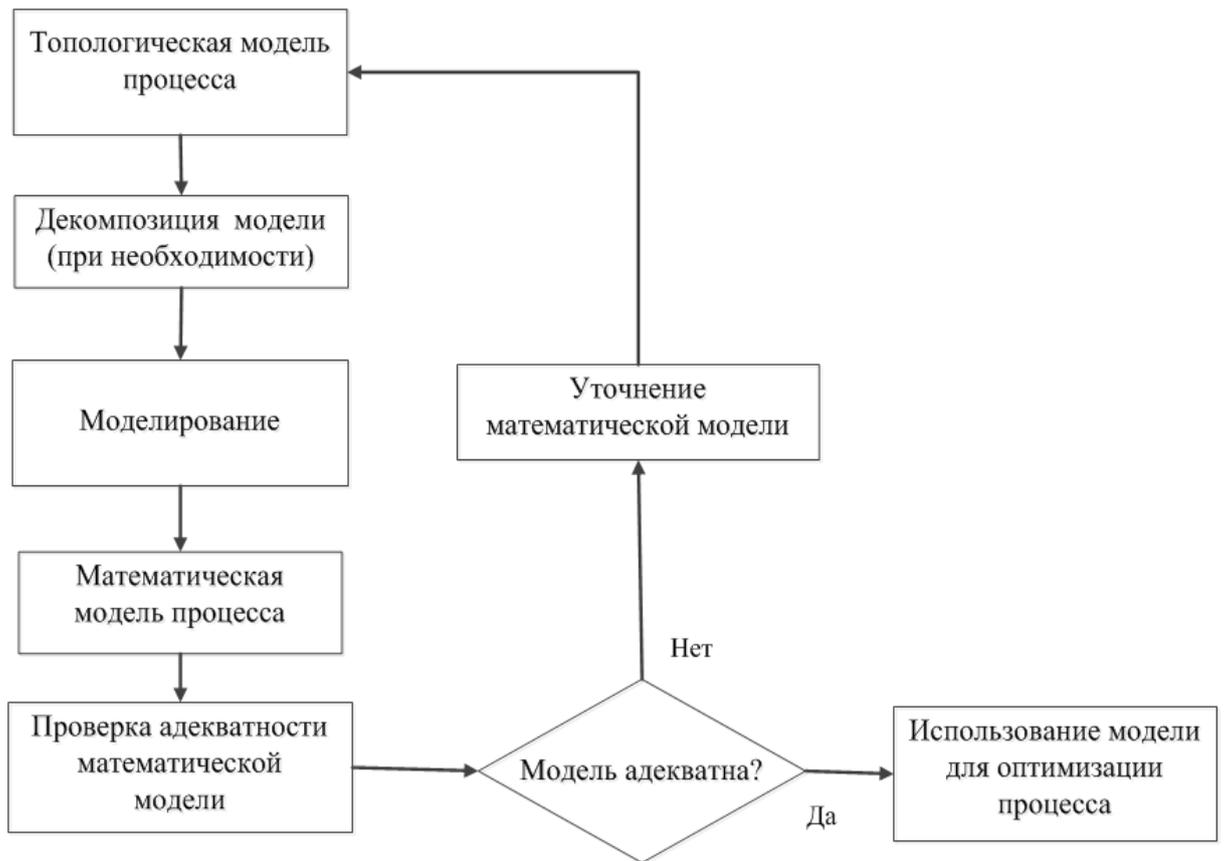


Рисунок 2.6 – Блок-схема разработки математической модели многостадийного технологического процесса

Разработка аналитических моделей состоит в теоретическом определении параметров уравнений статики и динамики по данным, которые получены при исследовании отдельных физико-химических процессов, происходящих в объекте. В аналитических моделях параметры имеют четкую физическую трактовку и представляют собой самостоятельную ценность, т.к. могут быть использованы в других задачах. Поэтому к параметрам модели предъявляют следующие требования:

- устойчивость к ошибкам измерения и расчета;
- адекватность исследуемому объекту.

При построении аналитических моделей сложных систем, как правило, принимаются допущения, упрощающие реальную систему, что может привести к искажениям результатов. Поэтому применение аналитического подхода оправдано при разработке и проектировании новых (несуществующих) видов продукции и технологий.

На сегодняшний день в метизной отрасли производственные процессы представляет собой сложную систему, характеризующуюся физической разнородностью входящих в неё подсистем. Технологические процессы метизного производства включают в себя множество операций, которые базируются на взаимодействии методов различной физико-химической природы (например, травление, холодная и горячая обработка давлением, термическая обработка и др.), что затрудняет получение адекватной аналитической модели. В этом случае для получения математических моделей оправдано использование экспериментального подхода.

Построение экспериментальной модели будет состоять из следующих этапов [230]:

- подготовка и планирование промышленного эксперимента;
- проведение эксперимента;
- обработка результатов эксперимента.

При экспериментальном построении математических моделей их параметры определяются по данным, полученным на действующем объекте, поэтому такие модели будут справедливы только для тех условий, в которых проводился промышленный эксперимент [231-233].

При проектировании технологического процесса необходимо корректно произвести выборку внешних и внутренних параметров системы,

оказывающих влияние на изменение наблюдаемого спектра показателей, с учетом технологической неопределенности, порождаемой возмущающими факторами. 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 единичных показателей качества продукции в технологиях метизного производства, может быть представлена выражением

$$y_i = \mathfrak{M}(u_1, \dots, u_k; v_1, \dots, v_p). \quad (2.2)$$

При робастном параметрическом проектировании оптимальные номинальные значения единичных показателей качества продукции можно установить за счет варьирования параметров управления и оценивания робастности под воздействием возмущающих факторов. Применение робастного параметрического проектирования позволяет выбрать оптимальные значения показателей качества и параметров управления технологическим процессом, которые обеспечивают робастность продукции. Такая стратегия проектирования промышленных технологий служит превентивной контрмерой против различного рода общественных потерь на рынке [28].

На рисунке 2.7 представлены этапы управления качеством продукции в технологиях метизного производства с использованием принципов робастного параметрического проектирования.

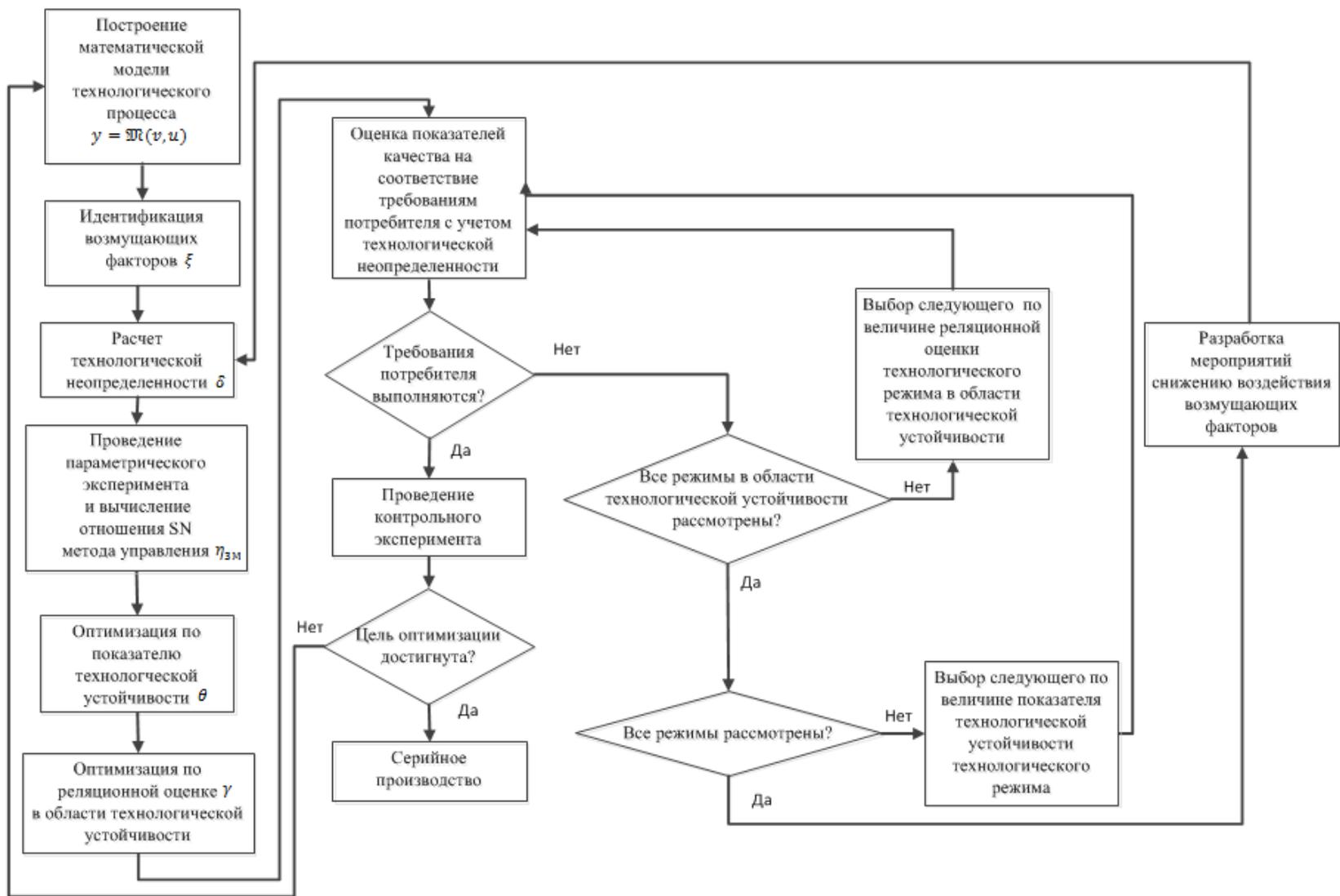


Рисунок 2.7 – Этапы управления качеством продукции в технологиях метизного производства

Сущность основных этапов раскрыта в пп. 2.2 - 2.4 настоящей главы.

Заключительной стадией разработки проекта является технологическая фаза, на которой реализуется спроектированная технология.

2.2 Идентификация возмущающих факторов в технологиях метизного производства

Возмущающие факторы – это факторы, вызывающие вариации показателей качества и входных параметров процесса. Ни один из показателей качества продукции не может быть постоянным, т.к. всегда имеются вариации данного показателя, вызванные возмущающими факторами и изменениями условий производства.

Разброс выходных характеристик может быть следствием различных факторов. Исследования источников вариации и их контроль позволяют повысить качество процессов, продукции и системы в целом. Известны различные подходы к классификации возмущающих факторов. Так, согласно [28] возмущающие факторы подразделяются на:

- внешние, воздействующие на продукцию в процессе ее эксплуатации;
- внутренние, обусловленные различиями, которые закладываются в продукцию на этапе производства.

В настоящем исследовании при проектировании технологического процесса рассматриваются только внутренние возмущающие факторы, обусловленные производственными вариациями.

Для решения поставленных в работе задач предлагается единая классификация возмущающих факторов по источнику возникновения и по направленности воздействия (рисунок 2.8).

Источники возникновения возмущающих факторов предлагается распределить по следующим категориям:

- 1М: Оборудование (англ.: Machine) – возмущающие факторы, связанные с несовершенством технологического оборудования и инструмента;

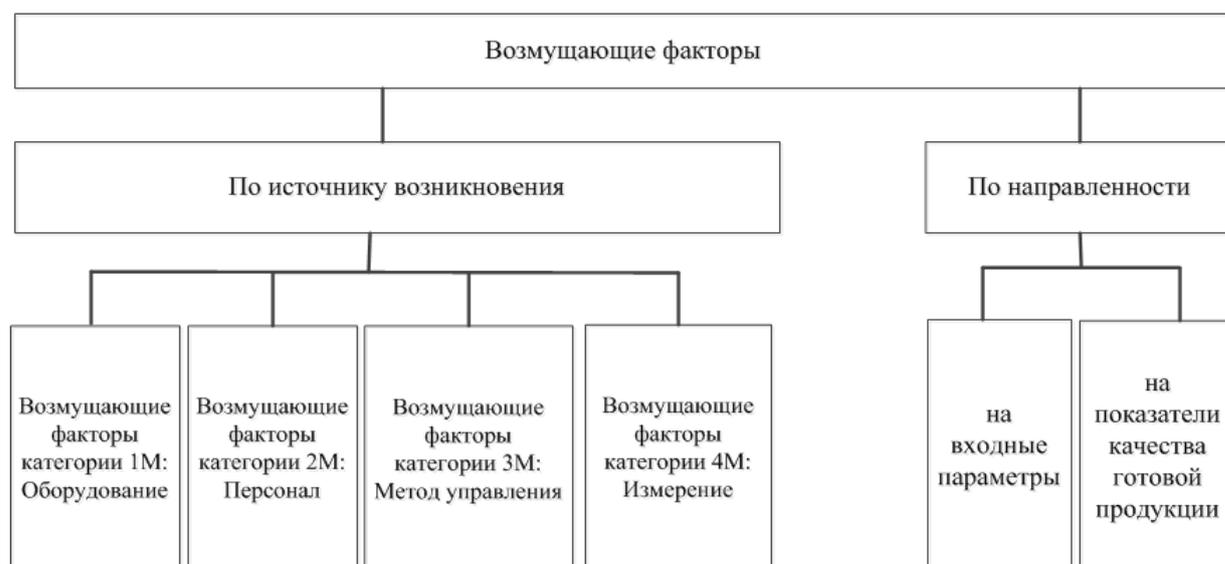


Рисунок 2.8 – Классификация возмущающих факторов

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

- 3М: Метод управления (англ.: Method) – возмущающие факторы, связанные с неопределенностью метода управления (параметров управления и характеристик материалов);

- 4М: Измерение (англ.: Measurement) – возмущающие факторы, связанные с погрешностью измерительных систем.

По направленности на объект влияния возможны 2 типа возмущающих факторов:

- влияющие на показатели качества;

- влияющие на входные параметры.

Введем соответствующие обозначения:

- $\xi_{1M}^{BX}, \xi_{2M}^{BX}, \xi_{3M}^{BX}, \xi_{4M}^{BX}$ – 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 разработана матрица возмущающих факторов (рисунок 2.9), которая заполняется экспертами.

					ПК	Y_1	Y_2	Y_3
					ВФ							
<p style="text-align: center;">Возмущающие факторы, влияющие на показатели качества</p> <p>Возмущающие факторы, влияющие на входные параметры</p>					$\xi_{1M}^{ПК}$							
					$\xi_{2M}^{ПК}$							
					$\xi_{3M}^{ПК}$							
					$\xi_{4M}^{ПК}$							
ВФ	$\xi_{1M}^{ВХ}$	$\xi_{2M}^{ВХ}$	$\xi_{3M}^{ВХ}$	$\xi_{4M}^{ВХ}$	ПК	Y_1	Y_2	Y_3
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 2.9 – Матрица возмущающих факторов

В первую очередь заполняется таблица входных параметров (часть матрицы, выделенная рамкой) по результатам дисперсионного анализа математической модели. Знак «+» на пересечении входного параметра и показателя качества 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 «-» в соответствии с требованиями таблиц 2.1 и 2.2.

Таблица 2.1 – Методика оценки влияния возмущающих факторов на показатели качества (ПК)

Условие	Возмущающий фактор			
	$\xi_{1M}^{ПК}$	$\xi_{2M}^{ПК}$	$\xi_{3M}^{ПК}$	$\xi_{4M}^{ПК}$
Влияет «+», если	ПК варьируется в некоторых пределах в зависимости от работы технологического оборудования	оператор может оказывать влияние на ПК	требования к ПК задаются в виде допуска (двустороннего или одностороннего)	ПК контролируется в процессе производства
Не влияет «-», если	ПК зависит от параметров управления и характеристик материала	ПК зависит от параметров управления и характеристик материала	требования к ПК задаются в виде номинального значения	ПК не контролируется в процессе производства

Таблица 2.2 – Методика оценки влияния возмущающих факторов на входные параметры

Параметры	Влияние	Возмущающий фактор			
		ξ_{1M}^{BX}	ξ_{2M}^{BX}	ξ_{3M}^{BX}	ξ_{4M}^{BX}
Параметр управления (ПУ)	Влияет «+», если	ПУ варьируется в некоторых пределах в зависимости от работы технологического оборудования	оператор может оказывать влияние на ПУ	требования к ПУ задаются в виде допуска (двустороннего или одностороннего)	ПУ контролируется оператором
	Не влияет «-», если	ПУ обеспечивается автоматической системой управления	ПУ обеспечивается автоматической системой управления	требования к ПУ задаются в виде номинального значения	ПУ обеспечивается автоматической системой управления
Характеристика материала (ХМ)	Влияет «+», если			требования к ХМ задаются в виде допуска (двустороннего или одностороннего)	ХМ контролируется в процессе производства
	Не влияет «-», если	«-»	«-»	требования к ХМ задаются в виде номинального значения	ХМ не контролируется в процессе производства

В случае, когда мнения экспертов по оценке влияния возмущающих факторов на входные параметры и показатели качества расходятся, на пересечении ставится знак «+».

2.3 Процедура количественной оценки технологической неопределенности

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

$$\Pi = \bar{\Pi} \pm \delta(\Pi), \quad (2.3)$$

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

Технологическая неопределенность параметра Π определяется из выражения

$$\delta(\Pi) = \sqrt{(\delta_{1M}(\Pi))^2 + (\delta_{2M}(\Pi))^2 + (\delta_{3M}(\Pi))^2 + (\delta_{4M}(\Pi))^2}, \quad (2.4)$$

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 $\xi_{\mathfrak{S}}^{\Pi}$ в общую неопределенность параметра Π определяется из выражения

$$\omega_{\mathfrak{S}}(\Pi) = \frac{(\delta_{\mathfrak{S}}(\Pi))^2}{(\delta(\Pi))^2}, \quad (2.5)$$

где \mathfrak{S} – 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 погрешности, вносимые средствами технического оснащения.

Технические системы создаются людьми, управляются людьми и служат им. Поэтому в классификации факторов, влияющих на неопределенность технологического процесса, всегда отдельной группой выделяется человеческий фактор (персонал). Человеческий фактор составляет основу менеджмента, поэтому управление им остается актуальной и важной задачей [234].

Для количественной оценки показателей $\delta_{1M}(П)$, $\delta_{2M}(П)$ предлагается использовать статистический метод средних и размахов. Для этого проводится промышленный эксперимент, в ходе которого оценивается технологическая неопределенность параметров качества и параметров управления, обусловленная влиянием оборудования и персонала.

Количественная оценка показателей $\delta_{1M}(y)$ и $\delta_{2M}(y)$ проводится на основании анализа работы персонала на промышленном оборудовании. Для обеспечения репрезентативности выборки в исследовании участвуют три оператора A , B , C и один контролер. При проведении исследований должны быть исключены другие источники неопределенности за исключением анализируемых.

Измерение показателей качества готовых изделий должны выполняться одним контролером, одними и теми же средствами, одним и тем же методом в одинаковых условиях и с одинаковой тщательностью.

Операторы A , B и C обрабатывают на исследуемом оборудовании по десять изделий каждый. Значения показателей качества образцов изделий измеряются контролером три раза и заносятся в регистрационную таблицу (рисунок 2.10).

ОТЧЕТ О ВЛИЯНИИ ОБОРУДОВАНИЯ И ПЕРСОНАЛА НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ПОКАЗАТЕЛЯ КАЧЕСТВА											
Нормативный документ			Наименование оборудования				Оператор А				
Наименование изделия							Оператор В				
Характеристика		Допуск					Оператор С				
Оператор/ Измер. №		Образцы									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. А		1									
2,		2									
3,		3									
4,		X _{ij} *									X ^{*j}
5. В		1									
6,		2									
7,		3									
8,		X _{ij} *									X ^{*j}
9. С		1									
10,		2									
11,		3									
12,		X _{ij} *									X ^{*j}
Образцы		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
13,		X _i **									
14,		Техн. неопр. оборудования				δ _{1М}					
15,		Техн. неопр. персонала				δ _{2М}					

Рисунок 2.10 – Лист регистрации для количественной оценки технологической неопределенности показателей качества

Обработка полученных результатов проводится в следующей последовательности:

1. Для каждого образца и каждого оператора рассчитывается среднее значение \bar{X}_{ij*} результатов измерений

$$\bar{X}_{ij*} = \frac{1}{Q} \sum_{k=1}^Q X_{ijk}, \quad (2.6)$$

где $i = 1 \dots N$ – номер образца;

$j = 1 \dots M$ – номер оператора;

$k = 1 \dots Q$ – номер измерения;

X_{ijk} – значение результата k -го измерения i -го образца j -го оператора.

2. Для каждого оператора рассчитывается среднее значение результатов измерений \bar{X}_{*j*}

$$\bar{X}_{*j*} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{X}_{ij*}. \quad (2.7)$$

3. Для каждого образца рассчитывается среднее значение \bar{X}_{i**} результатов его измерений

$$\bar{X}_{i**} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \bar{X}_{ij*}. \quad (2.8)$$

4. Технологическая неопределенность оборудования рассчитывается по формуле

$$\delta_{1M}(\Pi) = \frac{\max_{i=1,N}(\bar{X}_{i**}) - \min_{i=1,N}(\bar{X}_{i**})}{2}. \quad (2.9)$$

5. Технологическая неопределенность персонала рассчитывается по формуле

$$\delta_{2M}(\Pi) = \frac{\max_{i=1,M}(\bar{X}_{*j*}) - \min_{i=1,M}(\bar{X}_{*j*})}{2}. \quad (2.10)$$

Количественная оценка показателей $\delta_{1M}(u)$ и $\delta_{2M}(u)$ основывается на регистрации параметров управления процессом через равные промежутки времени.

Условия проведения исследования те же, что и описанные выше. Во время работы операторов A , B и C контролер регистрирует параметры управления процессом через десять равных промежутков времени трижды и заносит результаты в регистрационную таблицу (рисунок 2.11). Обработка результатов эксперимента осуществляется по формулам (2.6) - (2.10).

ОТЧЕТ О ВЛИЯНИИ ОБОРУДОВАНИЯ И ПЕРСОНАЛА НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ПАРАМЕТРА УПРАВЛЕНИЯ											
Нормативный документ			Наименование оборудования				Оператор А				
Наименование изделия							Оператор В				
Характеристика		Допуск					Оператор С				
Оператор/ Измер. №		Измерения через интервалы времени									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. А	1										
2,	2										
3,	3										
4,	X _{ij} *										X _j *
5. В	1										
6,	2										
7,	3										
8,	X _{ij} *										X _j *
9. С	1										
10,	2										
11,	3										
12,	X _{ij} *										X _j *
Точки изм.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
13,	X _i **										
14,	Техн. неопр. оборудования					δ _{1М}					
15,	Техн. неопр. персонала					δ _{2М}					

Рисунок 2.11 – Лист регистрации для количественной оценки
неопределенности параметров управления

Для количественной оценки показателя $\delta_{3M}(y)$ используются результаты математического моделирования в виде зависимости (2.2).

Полный дифференциал функции показателя качества, связанный с вариацией входных параметров будет выражен как

$$dy = \frac{\partial y}{\partial u_1} du_1 + \dots + \frac{\partial y}{\partial u_k} du_k + \frac{\partial y}{\partial v_1} dv_1 + \dots + \frac{\partial y}{\partial v_p} dv_p. \quad (2.11)$$

При замене $du_1, \dots, du_k, dv_1, \dots, dv_p$ на величины неопределенности $\delta(u_1), \dots, \delta(u_k), \delta(v_1), \dots, \delta(v_p)$, получим формулу для расчета технологической неопределенности показателей качества

$$\delta_{3M}(y_i) = \frac{\partial y}{\partial u_1} \delta(u_1) + \dots + \frac{\partial y}{\partial u_k} \delta(u_k) + \frac{\partial y}{\partial v_1} \delta(v_1) + \frac{\partial y}{\partial v_p} \delta(v_p). \quad (2.12)$$

Каждому параметру управления и характеристике материала, будет соответствовать неопределенность, зависящая от допусков $\Delta(u)$ и $\Delta(v)$. Допуски на параметры управления определяются технологической документацией предприятия-изготовителя (технологические инструкции, технологические карты и пр.). Допуски на характеристики материалов устанавливаются нормативными документами (стандарты, технические условия и пр.). Таким образом, показатели $\delta_{3M}(u)$ и $\delta_{3M}(v)$ будут определяться как

$$\delta_{3M}(u) = \frac{\Delta(u)}{2}, \quad (2.13)$$

$$\delta_{3M}(v) = \frac{\Delta(v)}{2}, \quad (2.14)$$

где $\Delta(u)$ – допуск, устанавливаемый технологическими документами на процесс;

$\Delta(v)$ – допуск, устанавливаемый нормативно-техническими документами на материал.

Возмущающие факторы измерительной системы также являются источником вариаций значений измеряемых параметров. Измерительная система должна обеспечивать получение достоверных результатов, быть поверен-

ной и/или калиброванной, а неопределенность измерительной системы должна быть оценена количественно и сведена к минимуму.

Для количественной оценки показателя $\delta_{4M}(\Pi)$ рекомендуется использовать формулу

$$\delta_{4M}(\Pi) = \frac{k_{\alpha}GRR}{2}, \quad (2.15)$$

где GRR – сходимости и воспроизводимости результатов измерений, определенная методом MSA (Measurement Systems Analysis);

k_{α} – коэффициент толерантности, определяемый по таблице значений функции Лапласа ($k_{\alpha} = 1,96$ при $\alpha = 0,95$).

Упрощенный подход допускает определять показатель $\delta_{4M}(\Pi)$ по формуле

$$\delta_{4M}(\Pi) = \delta_{изм}, \quad (2.16)$$

где $\delta_{изм}$ – погрешность средства измерения.

2.4 Стратегия робастного параметрического проектирования технологических процессов метизного производства

2.4.1 Количественная оценка робастности процесса

Робастность технологической системы связана с многочисленными факторами и параметрами, поэтому ее невозможно оценить простым измерением [235, 236]. 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

$$\eta_{3M}(y_i) = 10 \lg \frac{y_i(u_1, \dots, u_k; v_1^N, \dots, v_p^N)}{\delta_{3M}(y_i)}, \quad (2.17)$$

где $y(u_1, \dots, u_k; v_1^N, \dots, v_p^N)$ – значение показателя качества y , вычисленное для параметров управления u_1, \dots, u_k и номинальных значений характеристик материала v_1^N, \dots, v_p^N .

Количественные оценки робастности должны быть получены для всех возможных комбинаций параметров проекта (таблица 2.3).

Таблица 2.3 – 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_3	...	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	$\eta_{3M}(y_n)$

Оптимизация технологического процесса производства осуществляется по всем единичным показателям качества продукции.

2.4.2 Оптимизация процесса по показателю технологической устойчивости

Для получения обобщенной оценки робастности необходимо оценить значимость каждого единичного показателя качества продукции, т.е. оценить «степень обязательности» каждого из требований и ожиданий потребителей.

Для оценки значимости показателей качества представляется целесообразным использовать методологию FMEA (Failure Mode and Effects Analysis). Согласно методологии FMEA видам дефектов (отказов) присваиваются ранги значимости [237].

В таблице 2.4 приведены ранги значимости, определяемые по единой десятибалльной шкале, в зависимости от воздействия на завод-изготовитель, завод-получатель и на конечного пользователя изделия.

Таблица 2.4 – Критерии оценки значимости показателей качества

Ранг значимости R	Воздействие на завод-изготовитель	Воздействие на завод-получатель	Воздействие на конечного пользователя
10	Отказ может привести к риску, критическому для здоровья и/или безопасности для рабочего в изготовлении или на сборке	Отказ может привести к риску, критическому для здоровья и/или безопасности для рабочего в изготовлении или на сборке	Влияет на безопасную работу технического объекта
9	Отказ может привести к внутризаводскому несоблюдению нормативных правовых требований	Отказ может привести к внутризаводскому несоблюдению нормативных правовых требований	Несоблюдение нормативных правовых документов

Продолжение таблицы 2.4

Ранг значимости <i>R</i>	Воздействие на завод-изготовитель	Воздействие на завод-получатель	Воздействие на конечного пользователя
8	100 % затрагиваемого производственного объема может быть забраковано	Остановка линии больше, чем на полную производственную смену; возможна остановка отгрузки; требуется ремонт или замена в процессе	Потеря первичной функции технического объекта
7	Продукция, возможно, должна быть рассортирована и часть (менее 100 %) забракована в лом; отклонение от первичного процесса; сниженная скорость линии или добавленная рабочая сила	Остановка линии от одного часа до полной производственной смены; возможна остановка отгрузки; требуется ремонт или замена в процессе эксплуатации (узла у конечного пользователя), кроме несоблюдения нормативных правовых требований	Деградация первичной функции технического объекта
6	100 % производственного объема может быть подвергнуто доработке вне линии и приемке	Остановка линии до одного часа	Потеря вторичной функции технического объекта
5	Часть производственного объема может быть подвергнута доработке вне линии и приемке	Затронута менее 100 % продукции; большая возможность для дополнительной дефектной продукции; требуется сортировка; остановки линии нет	Деградация вторичной функции технического объекта

Продолжение таблицы 2.4

Ранг значимости R	Воздействие на завод-изготовитель	Воздействие на завод-получатель	Воздействие на конечного пользователя
4	100 % производственного объема может быть подвергнуто доработке прежде, чем он будет обработан	Дефектная продукция запускает значительный план реагирования; дополнительная дефектная продукция маловероятна; сортировка не требуется	Очень неприятный внешний вид, звук, вибрация, резкость или тактильные ощущения
3	Часть производственного объема может быть подвергнуто доработке прежде, чем он будет обработан	Дефектная продукция запускает малозначительный план реагирования; дополнительная дефектная продукция маловероятна; сортировка не требуется	Умеренно неприятный внешний вид, звук, вибрация, резкость или тактильные ощущения
2	Незначительное неудобство для процесса, операции или оператора	Дефектная продукция не запускает никакого плана реагирования; дополнительная дефектная продукция маловероятна; сортировка не требуется; требует обратной связи с поставщиком	Незначительно неприятный внешний вид, звук, вибрация, резкость или тактильные ощущения
1	Никакого заметного последствия	Никакого заметного последствия или никакого последствия	Никакого заметного последствия

Будем полагать, что чем выше коэффициент значимости α_i показателя качества, тем выше его ранг R_i , т.е.

$$\frac{\alpha_1}{R_1} = \frac{\alpha_2}{R_2} = \dots = \frac{\alpha_k}{R_k} = \dots = \frac{\alpha_n}{R_n}. \quad (2.18)$$

Пусть α_k и R_k – коэффициент значимости и ранг наименее важного показателя качества соответственно. Требуя выполнения условия

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n = 1, \quad (2.19)$$

распределим коэффициенты значимости показателей качества согласно их рангам

$$\alpha_k = \frac{1}{\frac{R_1}{R_k} + \frac{R_2}{R_k} + \dots + \frac{R_n}{R_k}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{R_i}{R_k}}, \quad (2.20)$$

$$\alpha_1 = \alpha_k \frac{R_1}{R_k}, \alpha_2 = \alpha_k \frac{R_2}{R_k}, \dots, \alpha_n = \alpha_k \frac{R_n}{R_k}. \quad (2.21)$$

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

$$\theta_j = \sum_{i=1}^n \alpha_i \eta_{3M}(y_{ij}), \quad (2.22)$$

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 по предлагаемой методологии заключается в максимизации показателя технологической устойчивости за счет минимизации чувствительности к возмущающим факторам.

Таким образом, решается задача робастной оптимизации

$$\max_u \theta(u, v^N, \xi) \quad (2.23)$$

при следующих связях и ограничениях

$$y = \mathfrak{M}(v, u),$$

$$y_{i\min} \leq \bar{g}_i(v, u) \equiv y_i \leq y_{i\max}, i = 1, \dots, n, \quad (2.24)$$

где $y = \mathfrak{M}(v, u)$ – оператор математической модели технологического процесса метизного производства;

$y_{j\min}$ – минимально допустимое значение i -й выходной переменной;

$y_{j\max}$ – максимально допустимое значение i -й выходной переменной;

$\bar{g}_i(v, u), i = 1, \dots, n$ – функции ограничений.

Для оценки влияния параметров управления на показатель технологической устойчивости используется диаграмма эффектов факторов (рисунок 2.12).

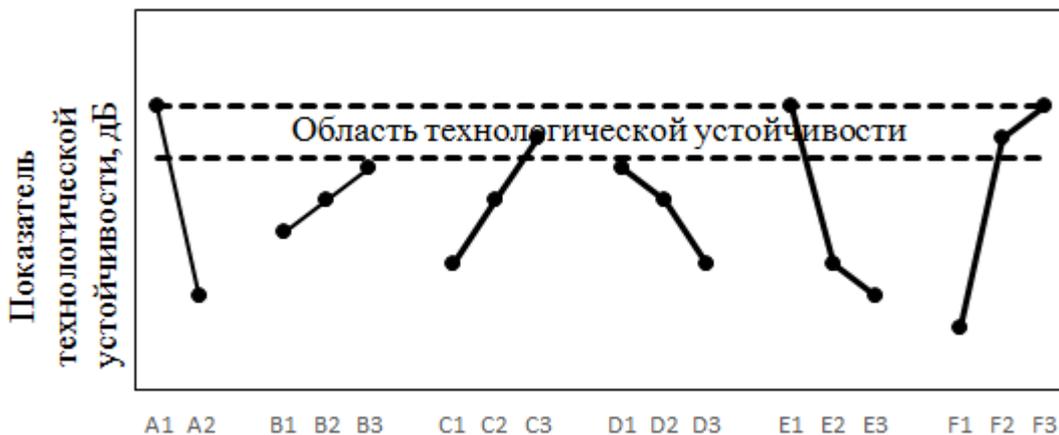


Рисунок 2.12 – Диаграмма эффектов параметров управления

Диаграмма показывает, каким образом каждый исследуемый параметр управления влияет на показатель технологической устойчивости. Чем больше градиент параметра управления, тем большее влияние он оказывает.

2.4.3 Оптимизация процесса по реляционной оценке

Поскольку оптимальные условия проекта, полученные в результате анализа, в общем случае неодинаковы для различных показателей качества продукции, для стратегического выбора оптимального проекта необходимо использовать метод принятия решений. Для объединения показателей качества в единую целевую функцию предлагается использовать серый реляционный анализ GRA.

На первом этапе GRA проводится нормирование данных в диапазоне от 0 до 1 для цели «номинал – лучше» по зависимости [62]

$$z_{ij} = 1 - \frac{|y_{ij} - y_j^*|}{\max_j |y_{ij} - y_j^*|}, \quad (2.25)$$

где y_{ij} – величина отклика для j -го эксперимента;

y_j^* – целевое (номинальное) значение отклика.

Для цели «больше – лучше» нормирование проводится по зависимости

$$z_{ij} = \frac{y_{ij} - \min_j y_{ij}}{\max_j y_{ij} - \min_j y_{ij}}. \quad (2.26)$$

Для цели «меньше – лучше» нормирование проводится по зависимости

$$z_{ij} = \frac{\max_j y_{ij} - y_{ij}}{\max_j y_{ij} - \min_j y_{ij}}. \quad (2.27)$$

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

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\min_j |z_i^0 - z_{ij}| + \varphi \max_j |z_i^0 - z_{ij}|}{|z_i^0 - z_{ij}| + \varphi \max_j |z_i^0 - z_{ij}|}, \quad (2.28)$$

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. В общем, его значение принимается равным 0,5, если все параметры процесса имеют равный вес [62].

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

$$\gamma_j = \sum_{i=1}^n \alpha_i \varepsilon_{ij}, \quad (2.29)$$

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

$$\max_u \gamma(u, v^N) \quad (2.30)$$

при связях и ограничениях

$$(1 - \beta) \max_u \theta(u, v, \xi) \leq \theta \leq \max_u \theta(u, v, \xi), \quad (2.31)$$

где $\gamma = \sum_{i=1}^n \alpha_i \varepsilon_i$ – общая реляционная оценка множественных показателей качества;

ε_i – серый реляционный коэффициент, рассчитанный для i -го показателя качества;

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

2.4.4 Оценка показателей качества продукции на соответствие требованиям потребителя

После определения оптимального технологического режима проводится оценка соответствия показателей качества требованиям потребителя (см. таблицу 2.5).

В случае, когда требования по какому-либо параметру не выполняются, необходимо выбрать другой технологический режим из области технологической 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.

Таблица 2.5 – 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.

Из таблицы 2.5 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 процесса.

Возможные способы снижения воздействия возмущающих факторов в технологических процессах метизного производства приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Способы снижения воздействия возмущающих факторов

Технологическая неопределенность	Способы снижения технологической неопределенности
Технологическая неопределенность оборудования (1М)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Своевременное проведение технического обслуживания и ремонта оборудования. 2. Внесение изменений в состав технологического оборудования. 3. Внесение изменений в схему технологического процесса.
Технологическая неопределенность персонала (2М)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Повышение квалификации персонала. 2. Автоматизация технологического процесса. 3. Внедрение устройств защиты от ошибок.
Технологическая неопределенность метода управления (3М)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Оптимизация допусков на параметры управления. 2. Оптимизация допусков на характеристики материалов. 3. Оптимизация допусков на показатели качества.
Технологическая неопределенность измерительной системы (4М)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Своевременная поверка/калибровка средств измерений. 2. Инструктаж, обучение, замена оператора. 3. Внеплановая аттестация средства измерения. 4. Пересмотр методики измерений. 5. Пересмотр конструкции калибра. 6. Применение более точного средства измерения.

Решение задачи оптимизации допусков позволяет определить оптимальные значения характеристик материалов и параметров управления технологического процесса по заданным допускам на показатели качества.

Задача оптимизации заключается в определении многомерной области допусков, в которой удовлетворяются требования к показателям качества, и нахождении оптимума целевой функции.

Рассмотрим задачу определения допусков на входные данные, обеспечивающие требуемые значения показателей качества. На основании выражения (2.12) технологическая неопределенность показателей качества является линейной комбинацией неопределенностей входных параметров.

Если технологическая неопределенность задана

$$\delta_{3M}(y) \leq \delta y_{max} , \quad (2.32)$$

то технологические неопределенности входных параметров должны удовлетворять неравенству

$$\frac{\partial y}{\partial u_1} \delta(u_1) + \dots + \frac{\partial y}{\partial u_k} \delta(u_k) + \frac{\partial y}{\partial v_1} \delta(v_1) + \dots + \frac{\partial y}{\partial v_p} \delta(v_p) \leq \delta y_{max} . \quad (2.33)$$

Оптимизация допусков начинается с наибольшего слагаемого в выражении (2.33). После уменьшения допуска проверяется справедливость выражения (2.32), если оно не соблюдается, то выбирается следующее слагаемое и так далее до тех пор, пока не будет выполняться выражение (2.32).

2.4.5 Контрольный эксперимент

Для подтверждения достоверности результатов расчета следует провести контрольный эксперимент в базовых и в оптимальных условиях проектирования и вычислить значения показателя технологической устойчивости и его прироста (таблица 2.7).

Таблица 2.7 – 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_3	y_{3base}	y'_{3base}	y_{3opt}	y'_{3opt}	Δy_3	$\Delta y'_3$

	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 2.3. Значения показателей θ_{base} и θ_{opt} определяются по формуле (2.22).

Прирост показателя технологической устойчивости определяется по формуле

$$\Delta\theta = \theta_{opt} - \theta_{base}. \quad (2.34)$$

Прирост показателя качества y_i определяется как

$$\Delta y_i = y_{iopt} - y_{ibase}. \quad (2.35)$$

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

$$y'_{ibase} = \frac{y'_{ibasemin} + y'_{ibasemax}}{2}, \quad (2.36)$$

$$y'_{iopt} = \frac{y'_{ioptmin} + y'_{ioptmax}}{2}, \quad (2.37)$$

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

$$\eta'_{3M}(y_{ibase}) = 10 \lg \frac{y'_{ibase}}{\delta'_{ibase}}, \quad (2.38)$$

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

$$\eta'_{3M}(y_{iopt}) = 10 \lg \frac{y'_{iopt}}{\delta'_{iopt}}, \quad (2.39)$$

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

$$\theta'_{base} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \eta'_{3M}(y_{ibase}), \quad (2.40)$$

$$\theta'_{base} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \eta'_{3M}(y_{iopt}). \quad (2.41)$$

Проверочное значение прироста показателя технологической устойчивости определяется по формуле

$$\Delta\theta' = \theta'_{opt} - \theta'_{base}. \quad (2.42)$$

Проверочный прирост показателя качества y'_i определяется по формуле

$$\Delta y'_i = y'_{iopt} - y'_{ibase}. \quad (2.43)$$

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.

2.5 Выводы по главе

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. Формализована процедура идентификации возмущающих воздействий 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 параметры процесса управления и показатели качества продукции и методика по ее заполнению.

3. Формализована процедура количественной оценки влияния возмущающих факторов на комплекс показателей качества продукции и параметры управления в технологиях метизного производства.

4. Разработана применительно к управлению качеством продукции в технологиях метизного производства процедура робастного параметрического проектирования, отличающаяся использованием:

- нового критерия оценки робастности процесса, характеризующего чувствительность технологической системы к возмущающим факторам по отдельным показателям качества, определяемого на основе количественной оценки технологической неопределенности метода управления и значения показателя качества;

- нового показателя технологической устойчивости, характеризующего комплексное состояние технологической системы с учетом значимости показателей качества метизных изделий, определяемой с помощью ранжирования по степени воздействия на завод-изготовитель, завод-получатель и конечного пользователя;

- реляционной оценки показателей качества для обоснования выбора технологических режимов по целевым критериям с учетом требований потребителя;

- оценки соответствия показателей качества, полученных при оптимальном режиме, требованиям потребителя, обеспечивающей определение возможных интервалов варьирования показателей качества и принятие решений в случае их несоответствия;

- контрольного эксперимента для проверки улучшений по результатам оптимизации, включающего расчет и опытное определение показателя технологической устойчивости и показателей качества продукции в базовых и оптимальных условиях проектирования.

ГЛАВА 3 РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДОЛОГИИ ПРИ ОСВОЕНИИ НОВОЙ ПРОДУКЦИИ МЕТИЗНОГО ПРОИЗВОДСТВА (НА ПРИМЕРЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КАЛИБРОВАННОЙ СТАЛИ)

Эффективность развития металлообрабатывающих отраслей промышленности во многом зависит от темпов наращивания мощностей по производству качественной калиброванной стали [238]. При условии устойчивого роста экономики России производство калиброванной стали будет ежегодно увеличиться по сравнению с существующими объемами, что связано с развитием автомобилестроения, сельскохозяйственного и транспортного машиностроения – основных потребителей калиброванной стали [239-241].

Наиболее широкое применение калиброванная сталь получила в тех отраслях промышленности, где требуется высокое качество поверхности и точность размеров заготовки. Основное преимущество применения калиброванной стали заключается в отсутствии необходимости дополнительной обработки поверхности профиля. Это позволяет снизить себестоимость изготовления отдельных деталей и, в конечном итоге, себестоимость всего изделия [242-251].

Современный рынок машиностроительных технологий постоянно повышает требования к калиброванной стали по точности размеров профиля и качеству поверхности при гарантированном уровне механических свойств [252-262]. Данная тенденция обусловлена постоянным обновлением основных фондов российских предприятий, проектированием и выпуском все более сложных деталей, машин и агрегатов, успешным развитием производств, совместных с иностранными производителями [263-273].

В настоящей главе приводятся результаты разработки и промышленного освоения нового вида продукции – калиброванной стали, предназначенной для изготовления заготовок корпусов свечей зажигания.

3.1 Требования потребителя к калиброванной стали

Важнейшим элементом системы зажигания двигателей внутреннего сгорания являются свечи. Они предназначены для воспламенения горючей смеси в цилиндрах при помощи искрового разряда. При всем разнообразии конструкций любая свеча зажигания включает в себя металлический корпус, керамический изолятор, электроды и контактную головку для соединения с высоковольтным проводом.

Корпус предназначен для установки свечи в двигатель. Он обеспечивает герметичность соединения с изолятором и играет важную роль при теплоотведении свечи. Корпус свечи изготавливают из калиброванной стали методом холодного выдавливания на пресс-автоматах [274, 275].

Поскольку условия дальнейшего применения свечи зажигания предусматривают работу в агрессивных средах при больших перепадах температур, к калиброванной стали предъявляются повышенные требования по механическим свойствам (см. таблицу 3.1).

Химический состав стали марки С10С приведен в таблице 3.2.

Таблица 3.1 – Требования к калиброванной стали по спецификации N28 XS 0214 S001

Характеристика	Значение
Марка стали	С10С
Диаметр, мм	12,93
Допускаемые отклонения, мм	-0,11
Временное сопротивление, Н/мм ²	330-390
Относительное сужение, %	не менее 60

Таблица 3.2 – Химический состав стали, %

Массовая доля элементов, %											
C	Mn	Al	Ni	Si	Sn	N	Cr	Mo	S	P	Cu
			не более								
0,1-0,13	0,21-0,45	0,02-0,08	0,05	0,13	0,01	0,007	0,07	0,02	0,035	0,030	0,10

Заготовкой для производства калиброванной стали является горячекатаный прокат. Качество горячекатаного проката должно соответствовать требованиям группы 1 по ГОСТ 10702-2016, макроструктура не должна иметь усадочной раковины, рыхлости, пузырей, трещин, расслоений, шлаковых включений и флокенов.

3.2 Формализация описания технологии производства калиброванной стали

Разработанная инженерами-технологами ОАО «Магнитогорский металлургический завод «ММК-МЕТИЗ» (далее – ОАО «ММК-МЕТИЗ») технологическая схема производства калиброванной стали марки С10С по N28 XS 0214 S001 представляет собой многостадийный процесс, включающий следующие операции:

- травление горячекатаного проката в мотках до полного удаления окисной пленки и промывку холодной проточной водой;
- волочение проката;
- обезжиривание передельной заготовки;
- сфероидизирующий отжиг;

- травление передельной заготовки;
- фосфатирование;
- известкование;
- волочение передельной заготовки.

Механические свойства калиброванной стали формируются прежде всего при операциях волочения проката и сфероидизирующего отжига. Волочение передельной заготовки не будет оказывать значительного влияния на механические свойства готовой калиброванной стали, т.к. данная операция предназначена для уплотнения фосфатного покрытия.

Для оценки влияния совокупного вклада операций, формирующих комплекс механических свойств калиброванной стали, построен граф технологического процесса (рисунок 3.1).

Для получения математических моделей, описывающих процесс формирования механических свойств калиброванной стали марки С10С, провели опытно-промышленное исследование, для которого были выбраны параметры управления и установлены уровни варьирования. Значения уровней параметров управления определялся с учетом литературных данных и производственного опыта по изготовлению калиброванной стали в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ» (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Параметры управления и их уровни

Параметры управления	Уровень		
	1	2	3
Величина обжатия при волочении проката ε_B , %	17,8	23,0	27,8
Рабочая температура отжига T , °С	700	725	750
Продолжительность выдержки t , ч	4	6	8

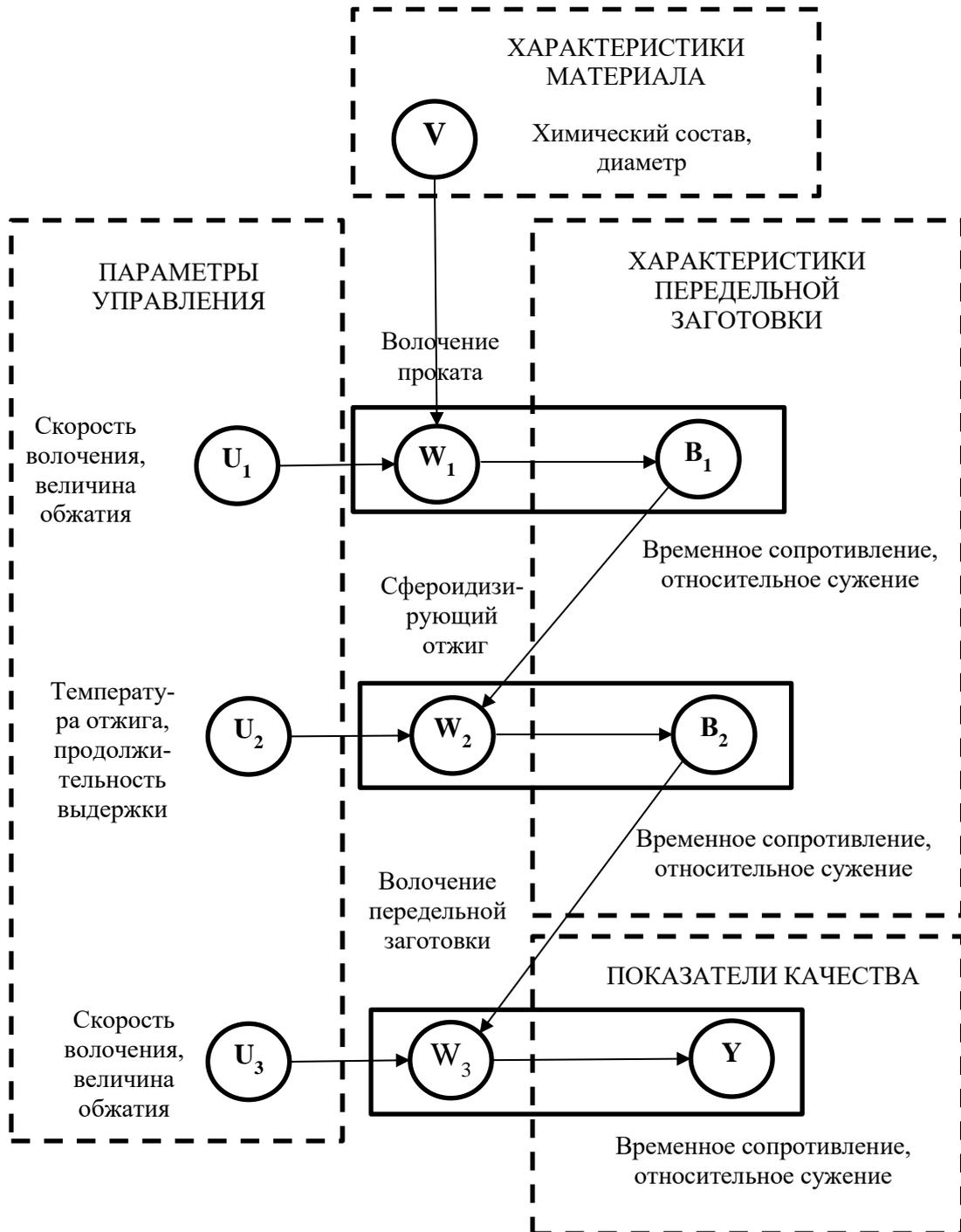


Рисунок 3.1 – Топологическая модель процесса формирования механических свойств калиброванной стали С10С

Условия проведения опытно-промышленных экспериментов и результаты испытаний образцов приведены в таблице 3.4. Механические испытания образцов калиброванной стали проводились на универсальной испытательной машине LFM.

На рисунках 3.2 и 3.3 представлена графическая интерпретация результатов исследования по влиянию параметров управления на механические свойств калиброванной стали марки С10С.

Таблица 3.4 – Результаты механических испытаний калиброванной стали

№ эксперимента	Параметры управления			Механические свойства	
	Величина обжата при волочении проката ε_B , %	Рабочая температура отжига T , °С	Продолжительность выдержки t , ч	Временное сопротивление σ_B , Н/мм ²	Относительное сужение ψ , %
1	17,8	700	4	367,5	67,1
2	17,8	725	6	364,8	69,9
3	17,8	750	8	362,5	73,4
4	23,0	700	6	373,2	66,4
5	23,0	725	8	370,3	72,1
6	23,0	750	4	370,9	70,1
7	27,8	700	8	381,9	66,2
8	27,8	725	4	380,1	68,5
9	27,8	750	6	377,6	72,4

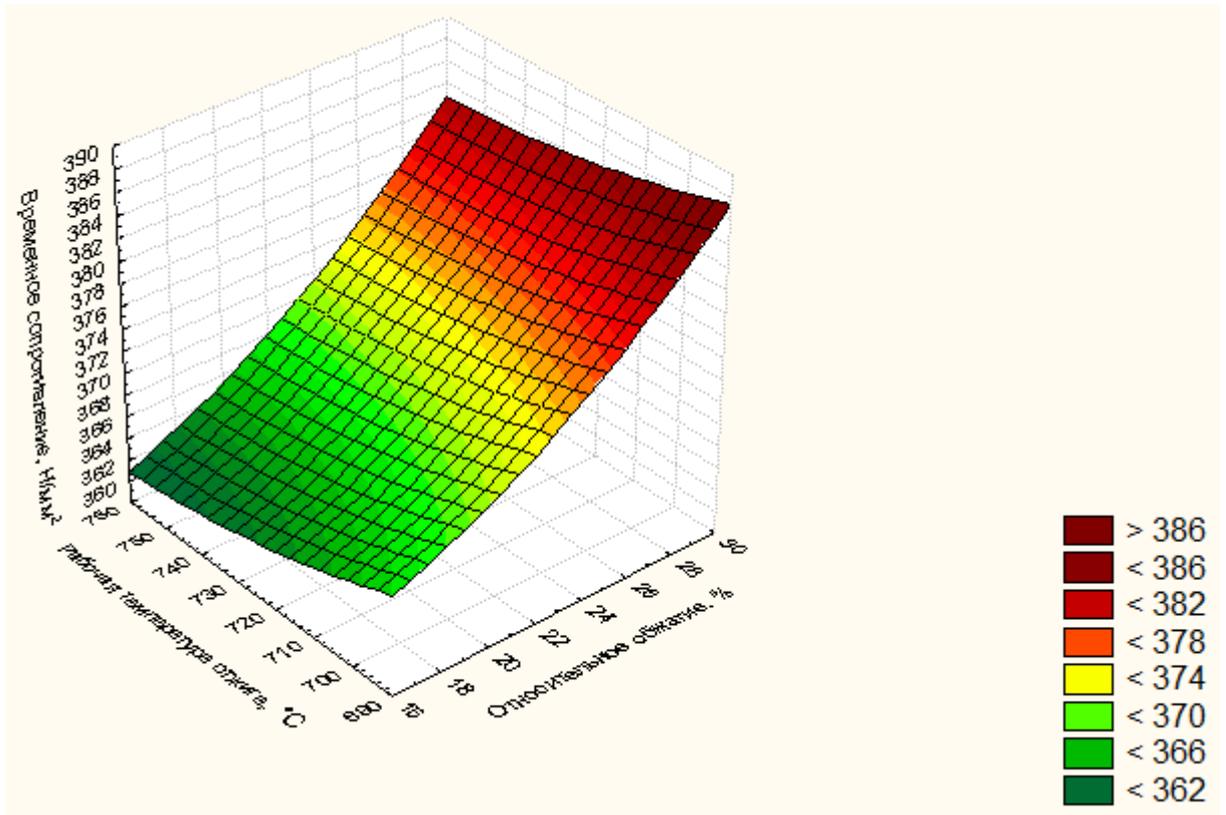


Рисунок 3.2 – Влияние параметров управления на временное сопротивление

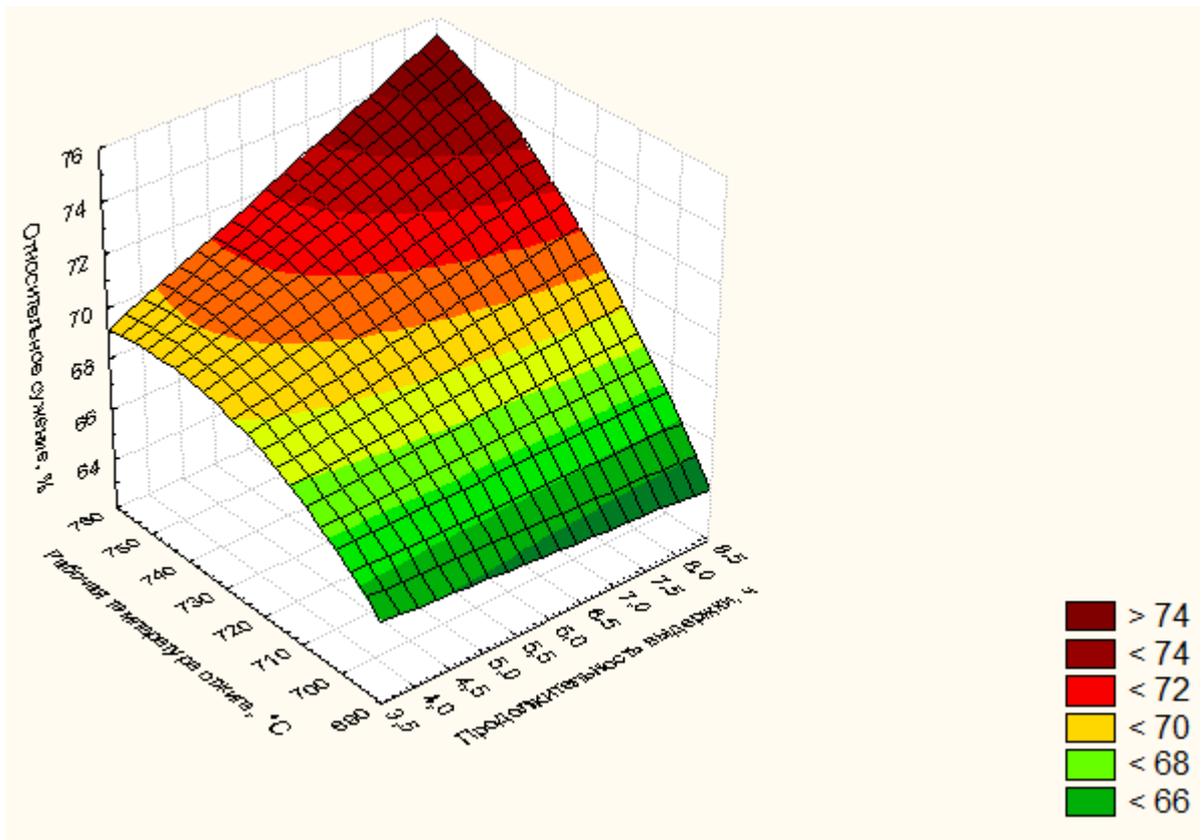


Рисунок 3.3 – Влияние параметров управления на относительное сужение

Анализ результатов экспериментов показывает, что существенное влияние на изменение временного сопротивления калиброванной стали оказывает относительное обжатие при волочении. Повышение относительного обжатия с 17,8 до 27,8 % приводит к повышению значений временного сопротивления на 10-15 Н/мм².

Относительное удлинение ψ имеет тенденцию к росту с повышением рабочей температуры отжига, причем это наиболее заметно в диапазоне 700...725 °С с последующим менее интенсивным изменением в области более высоких температур.

Продолжительность выдержки при рабочей температуре отжига не оказывает существенного влияния на механические свойства калиброванной стали в выбранном диапазоне.

В результате экспериментального исследования получены математические модели, отражающие связь между механическими свойствами калиброванной стали марки С10С и параметрами управления (таблица 3.5). Регрессионные зависимости статистически значимы, т.к. $F_p > F_{\text{табл}}$ ($F_{\text{табл}} = 5,41$). Вероятность нулевой гипотезы (p-level) значительно меньше 0,05, что говорит об общей значимости уравнений регрессии.

Таблица 3.5 – Результаты множественного регрессионного анализа

Уравнение регрессии	F_p	R^2
$\sigma_B = 428,4 - 0,1247T - 1,026\varepsilon_B + 0,00345\varepsilon_B T$	90,54	0,97
$\psi = 79,6 + 0,018T - 14,725t + 0,021Tt$	22,73	0,93

Основным процессом, формирующим точность размеров калиброванной стали, является волочение горячекатаного проката, подвергнутого травлению. При волочении калиброванной стали поперечные сечения и линейные размеры протянутого через волоку профиля в общем случае не равны соответствующим размерам выходного сечения волокна. Они либо больше, либо меньше и только в очень редких случаях равны между собой [276-286].

Точность диаметрального размера при волочении калиброванной стали зависит от следующих основных погрешностей [287-289, 292]:

- погрешности, возникающей из-за размерного износа деформирующего инструмента – волокни;
- погрешности, вызываемой температурными деформациями в системе «горячекатаный прокат-волокна»;
- погрешности, возникающей в результате упругого последствия калиброванной стали при выходе из очага деформации.

Поэтому формирование точности размеров калиброванной стали является сложной комплексной задачей. При ее решении необходимо рассматривать вопросы определения параметров волочильного инструмента (волокни) с учетом деформационной специфики обработки металла, условий эксплуатации и величины предельных отклонений калиброванной стали [287-293].

Для оценки влияния операции волочения на геометрические размеры калиброванной стали построена топологическая модель (рисунок 3.4).

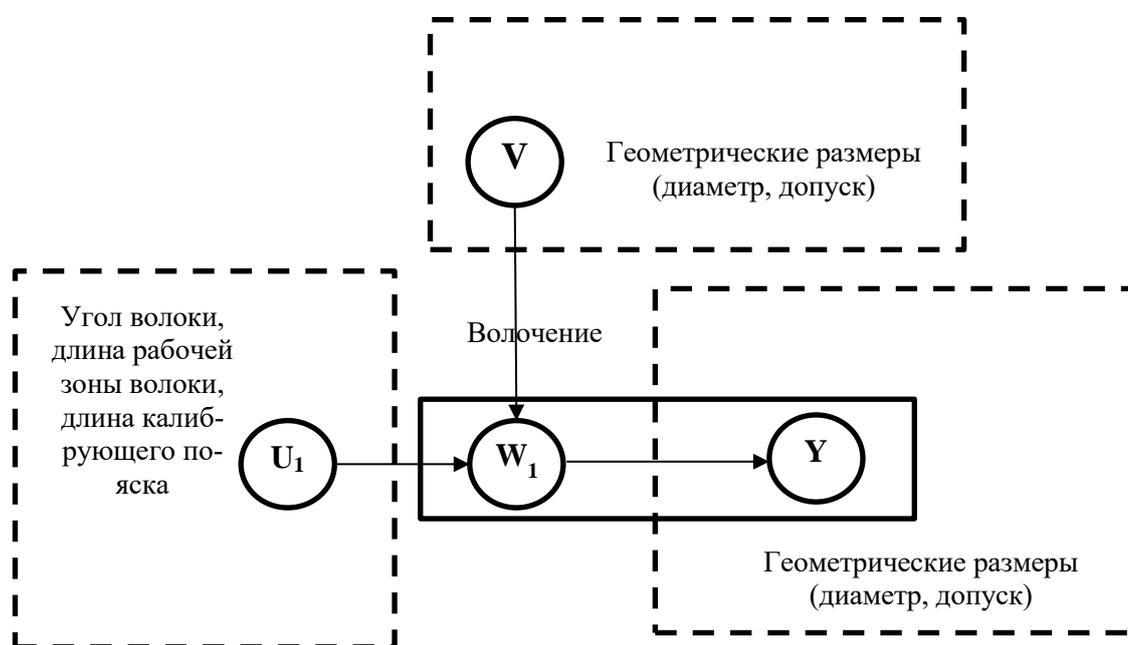


Рисунок 3.4 – Топологическая модель операции калибрования

Управление диаметром калиброванной стали в производственной практике осуществляется путем подбора волочильного инструмента (волоки) и измерения размера готовой продукции при настройке оборудования. В этом случае отсутствует необходимость в проведении дополнительных исследований для нахождения математической модели, отражающей связь между геометрическими размерами калиброванной стали и параметрами управления.

3.3 Разработка стратегии управления возмущающими факторами при производстве калиброванной стали

С целью разработки эффективной стратегии управления воздействиями возмущающих факторов были выявлены (см. рисунок 3.5) и исследованы различные типы возмущающих факторов.

					ПК	σ_B	ψ	d
					ВФ			
Возмущающие факторы, влияющие на показатели качества Возмущающие факторы, влияющие на входные параметры					$\xi_{1M}^{ПК}$	-	-	+
					$\xi_{2M}^{ПК}$	-	-	+
					$\xi_{3M}^{ПК}$	+	+	+
					$\xi_{4M}^{ПК}$	+	+	+
ВФ	$\xi_{1M}^{ВХ}$	$\xi_{2M}^{ВХ}$	$\xi_{3M}^{ВХ}$	$\xi_{4M}^{ВХ}$	ПК	σ_B	ψ	d
ВХ					ВХ			
Параметры управления					Параметры управления			
ε_B	-	-	-	-	ε_B	+	-	-
T	+	+	-	+	T	+	+	-
t	-	-	-	-	t	-	+	-

Рисунок 3.5 – Матрица возмущающих факторов, влияющих на формирование показателей качества калиброванной стали

Проведена количественная оценка технологической неопределенности категорий 1М и 2М: $\delta_{1M}(T)$, $\delta_{2M}(T)$, $\delta_{1M}(d)$, $\delta_{2M}(d)$ по разработанной методике (см. п. 2.3). Анализ результатов оценки представлен на рисунках 3.6 и 3.7.

ОТЧЕТ О ВЛИЯНИИ ОБОРУДОВАНИЯ И ПЕРСОНАЛА НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ПАРАМЕТРА УПРАВЛЕНИЯ														
Нормативный документ N28 XS 0214 S001				Наименование оборудования Колпаковая печь "Эбнер"				Оператор А						
Наименование изделия Калиброванная сталь С10С								Оператор В						
Характеристика		Допуск						Оператор С						
Температура, °С														
Оператор/		Измерения через интервалы 15 мин.												
Измер. №		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
1. А	1	725	724	730	708	715	743	737	724	729	745			
2,	2	729	730	730	709	715	737	741	728	726	741			
3,	3	725	728	724	707	716	741	737	724	731	743			
4,	Xij*	726,3	727,3	728,0	708,0	715,3	740,3	738,3	725,3	728,7	743,0	X*j*	728,1	
5. В	1	748	717	714	726	743	712	715	721	718	740			
6,	2	744	712	720	722	740	716	715	728	713	744			
7,	3	749	715	721	725	740	711	713	723	718	740			
8,	Xij*	747,0	714,7	718,3	724,3	741,0	713,0	714,3	724,0	716,3	741,3	X*j*	725,4	
9. С	1	732	733	700	705	736	721	716	704	712	721			
10,	2	731	732	704	706	734	722	714	703	711	725			
11,	3	730	729	706	703	731	720	713	706	715	728			
12,	Xij*	731,0	731,3	703,3	704,7	733,7	721,0	714,3	704,3	712,7	724,7	X*j*	718,1	
Образцы		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
13,	Xi**	734,8	724,4	716,6	712,3	730,0	724,8	722,3	717,9	719,2	736,3			
14,	Техн. неопр. оборудования						δ_{1M}	12,0						
15,	Техн. неопр. персонала						δ_{2M}	5,0						

Рисунок 3.6 – Результаты количественной оценки технологической неопределенности $\delta_{1M}(T)$, $\delta_{2M}(T)$

ОТЧЕТ О ВЛИЯНИИ ОБОРУДОВАНИЯ И ПЕРСОНАЛА НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ПОКАЗАТЕЛЯ КАЧЕСТВА														
Нормативный документ				Наименование оборудования				Оператор А						
N28 XS 0214 S001				Волоч. линия "Кизерлинг"										
Наименование изделия								Оператор В						
Калиброванная сталь С10С														
Характеристика		Допуск						Оператор С						
Диаметр, мм		12,82 12,93												
Оператор/		Образцы												
Измер. №		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
1. А	1	12,909	12,858	12,864	12,869	12,881	12,870	12,872	12,849	12,895	12,867			
2,	2	12,900	12,862	12,862	12,875	12,883	12,868	12,866	12,844	12,899	12,871			
3,	3	12,906	12,854	12,863	12,871	12,875	12,868	12,863	12,840	12,899	12,876			
4,	X _{ij} *	12,905	12,858	12,863	12,872	12,880	12,869	12,867	12,844	12,898	12,871	X _j *	12,873	
5. В	1	12,862	12,853	12,895	12,843	12,877	12,887	12,872	12,891	12,847	12,837			
6,	2	12,858	12,851	12,890	12,851	12,878	12,885	12,874	12,883	12,845	12,840			
7,	3	12,858	12,860	12,888	12,851	12,878	12,891	12,873	12,894	12,849	12,838			
8,	X _{ij} *	12,859	12,855	12,891	12,848	12,878	12,888	12,873	12,889	12,847	12,838	X _j *	12,867	
9. С	1	12,885	12,881	12,895	12,892	12,896	12,871	12,895	12,892	12,902	12,860			
10,	2	12,889	12,881	12,890	12,887	12,897	12,877	12,895	12,889	12,896	12,864			
11,	3	12,884	12,877	12,899	12,892	12,900	12,869	12,895	12,896	12,903	12,860			
12,	X _{ij} *	12,886	12,880	12,895	12,890	12,898	12,872	12,895	12,892	12,900	12,861	X _j *	12,887	
Образцы		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
13,	X _i **	12,883	12,864	12,883	12,870	12,885	12,876	12,878	12,875	12,882	12,857			
14,	Техн. неопр. оборудования						δ_{1M}	0,014						
15,	Техн. неопр. персонала						δ_{2M}	0,010						

Рисунок 3.7 – Результаты количественной оценки технологической неопределенности $\delta_{1M}(d)$, $\delta_{2M}(d)$

Зависимости для количественной оценки технологической неопределенности категории 3М для механических свойств калиброванной стали марки С10С получены по формуле (2.12) и представлены в таблице 3.6

Таблица 3.6 – Зависимости для количественной оценки технологической неопределенности метода управления

Показатель качества	Технологическая неопределенность метода управления
Временное сопротивление σ_B , Н/мм ²	$\delta_{3M}(\sigma_B) = -1,024\delta(\varepsilon_B) - 0,1247\delta(T) + 0,0034512(\varepsilon_B\delta(T) + t\delta(\varepsilon_B))$
Относительное сужение ψ , %	$\delta_{3M}(\psi) = -14,725\delta(t) - 0,018\delta(T) + 0,021(T\delta(t) + t\delta(T))$
Диаметр d , мм	$\delta_{3M}(d) = 0,055$

Проведен анализ MSA и расчет технологической неопределенности категории 4M для следующих параметров: рабочая температура отжига T ; временное сопротивление σ_B ; относительное сужение ψ ; диаметр d . Результаты анализа представлены на рисунках 3.8-3.11. Это позволило рассчитать технологическую неопределенность рабочей температуры отжига (таблица 3.7).

Таблица 3.7 – Технологическая неопределенность рабочей температуры отжига

Параметр управления	Возмущающий фактор	Технологическая неопределенность
Рабочая температура отжига T , °C	ξ_{1M}^T	12,0
	ξ_{2M}^T	5,0
	ξ_{4M}^T	5,4
	ξ^T	14,1

ОТЧЕТ О СХОДИМОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ												ОТЧЕТ О СХОДИМОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ														
ОТНОСИТЕЛЬНО ПОЛНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА												ОТНОСИТЕЛЬНО ПОЛНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА														
Нормативные документы N28 XS 0214 S001			Наименование средства измер. Контроллер SIMATIC			Контролер А			№ чертежа N28 XS 0214 S001			Наименование средства измер. Контроллер SIMATIC			Контролер А											
Наименование изделия Калиброванная сталь С10С			Характеристика Допуск Температура, °С			Контролер В			Наименование изделия Калиброванная сталь С10С			Контролер В			Контролер С											
Характеристика Допуск Температура, °С						Контролер С			Характеристика Температура, °С			Контролер С			Контролер С											
			Повторений 3			Образцов 10			Контролеров 3			ДАТА			Повторений 3			Образцов 10			Контролеров 3			ДАТА		
Контролер/												АНАЛИЗ ИЗМЕРЕНИЙ						% ОБЩ. ИЗМЕНЧИВОСТИ								
Повтор №												Сходимость-изменчивость оборудования (EV)														
Измерения через интервалы 15 мин.												Средние														
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10												EV = R x K ₁														
1. А 1 716 716 726 712 723 724 713 708 731 712												Повторы K1														
2. 2 720 714 727 713 726 724 716 706 732 711												EV = 2,206														
3. 3 719 710 731 713 721 728 715 712 728 713												2 0,8862														
4. Сред 718,3 713,3 728,0 712,7 723,3 725,3 714,7 708,7 730,3 712,0												3 0,5908														
5. R 4 6 5 1 5 4 3 6 4 2												X _с = 718,7														
6. В 1 723 723 729 719 731 715 726 720 715 730												Воспроизводимость-изменчивость контролера (AV)														
7. 2 724 723 727 719 732 714 724 722 712 732												AV = 5,0756														
8. 3 722 718 732 722 734 719 725 722 711 729												AV = $\{(X_{\text{OFF}} \times K_2)^2 - (EV^2/nr)\}^{1/2}$														
9. Сред 723,0 721,3 729,3 720,0 732,3 716,0 725,0 721,3 712,7 730,3												AV = 100 (AV/TV)														
10. R 2 5 5 3 3 5 2 2 4 3												AV = 75,99														
11. С 1 720 723 733 731 722 719 725 735 735 740												n = количество образцов Контролеры 2 3														
12. 2 724 717 730 732 719 725 725 735 735 739												g = количество повторений K ₂ 0,7071 0,5231														
13. 3 719 720 736 731 723 724 728 736 736 735												Сходимость и воспроизводимость (GRR)														
14. Сред 721,0 720,0 733,0 731,3 721,3 722,7 726,0 735,3 735,3 738,0												GRR = $\{(EV^2 + AV^2)\}^{1/2}$														
15. R 5 6 6 1 4 6 3 1 1 5												GRR = 5,534														
Образцы 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10												δ _{эл} = 5,4														
Сред (Xp) 721 718 730 721 726 721 722 722 726 727												Изменчивость образца (PV)														
17. (Γ _с + Γ _в + Γ _с) / (кол-во контролеров) = R = 3,733												PV = R _p x K ₃														
18. (Max X - Min X) = X _{DIFF} = 9,733												PV = 3,740														
												Общая изменчивость (TV)														
												TV = $\{(GRR^2 + PV^2)\}^{1/2}$														
												TV = 6,679														
												ndc = 1,41 (PV/GRR)														
												ndc = 0,95296														

Рисунок 3.8 – Результаты анализа MSA и количественной оценки технологической неопределенности $\delta_{4M}(T)$

ОТЧЕТ О СХОДИМОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ПОЛНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА												ОТЧЕТ О СХОДИМОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ПОЛНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА																	
Нормативные документы N28 XS 0214 S001			Наименование средства измер. Машина универсальная испытательная LFM			Контролер А			№ чертежа N28 XS 0214 S001			Наименование средства измер. Машина универсальная испытательная LFM			Контролер А														
Наименование изделия Калиброванная сталь С10С			Характеристика Врем. сопр., Н/мм ²			Допуск 330 390			Контролер В			Наименование изделия Калиброванная сталь С10С			Контролер В														
Характеристика Врем. сопр., Н/мм ²			Допуск 330 390			Контролер С			Характеристика Врем. сопр., Н/мм ²			Контролер С																	
Повторений 3			Образцов 10			Контролеров 3			ДАТА			Повторений 3			Образцов 10			Контролеров 3			ДАТА								
Контролер/ Повтор №												АНАЛИЗ ИЗМЕРЕНИЙ												% ОБЩ. ИЗМЕНЧИВОСТИ					
Образцы												Сходимость-изменчивость оборудования (EV)																	
Средние												EV = R x K ₁												Повторы K1					
1. А 1 366 363 360 351 348 360 352 356 363 359 358												EV = 0,985												2 0,8862					
2. 2 364 363 359 352 350 360 350 354 363 360 358																								3 0,5908					
3. 3 365 364 360 350 348 362 352 354 364 358 358												Воспроизводимость-изменчивость контролера (AV)																	
4. Сред 365 363 360 351 349 361 351 355 363 359 X _с = 358												AV = {(X _{DIFF} x K ₂) ² - (EV ² /nr)} ^{1/2}												% AV = 100 (AV/TV)					
5. R 2 1 1 2 2 2 2 2 1 2 Γ _с = 2												AV = 3,0112												% AV = 70,10					
6. В 1 365 361 357 357 370 368 366 368 352 363 363												n = количество образцов												Контролеры 2 3					
7. 2 366 361 354 357 372 366 366 368 353 365 363												г = количество повторений												K ₂ 0,7071 0,5231					
8. 3 367 360 354 359 370 366 364 369 351 362 362												Сходимость и воспроизводимость (GRR)																	
9. Сред 366 361 355 358 371 367 365 368 352 363 X _с = 363												GRR = {(EV ² + AV ²) ^{1/2}												Образцы K ₃					
10. R 2 1 3 2 2 2 2 1 2 3 Γ _с = 2												GRR = 3,168												2 0,7071 % GRR = 73,75					
11. С 1 351 367 367 356 373 362 358 368 363 370 364												δ _{4M} = 3,1																	
12. 2 350 367 368 356 371 364 357 368 363 370 363												Изменчивость образца (PV)																	
13. 3 351 368 366 355 372 362 359 368 364 369 363												PV = R _р x K ₃												4 0,4467					
14. Сред 351 367 367 356 372 363 358 368 363 370 X _с = 363												PV = 2,901												5 0,4030 % PV = 100 (PV/TV)					
15. R 1 1 2 1 2 2 2 0 1 1 Γ _с = 1																								6 0,3742 % PV = 67,54					
Образцы 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 X̄= 361																								7 0,3534					
Сред (Xp) 361 364 361 355 364 363 358 364 360 364 R _с = 9												Общая изменчивость (TV)																	
17. (Γ _с + Γ _в + Γ _с) / (кол-во контролеров) = R= 1,887												TV = {(GRR ² + PV ²) ^{1/2}												8 0,3375					
18. (Max X - Min X) = X _{DIFF} = 5,767												TV = 4,296												9 0,3249 ndc = 1,41 (PV/GRR)					
																								10 0,3146 ndc = 1,29127					

Рисунок 3.9 – Результаты анализа MSA и количественной оценки технологической неопределенности $\delta_{4M}(\sigma_B)$

ОТЧЕТ О СХОДИМОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ПОЛНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА												ОТЧЕТ О СХОДИМОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ПОЛНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА													
Нормативные документы N28 XS 0214 S001			Наименование средства измер. Машина универсальная испытательная LFM			Контролер А						№ чертежа N28 XS 0214 S001			Наименование средства измер. Машина универсальная испытательная LFM			Контролер А							
Наименование изделия Калиброванная сталь С10С						Контролер В						Наименование изделия Калиброванная сталь С10С						Контролер В							
Характеристика Допуск Относ. сужение, % 60						Контролер С						Характеристика Относ. сужение, %						Контролер С							
			Повторений 3		Образцов 10		Контролеров 3		ДАТА						Повторений 3		Образцов 10		Контролеров 3		ДАТА				
Контролер/												АНАЛИЗ ИЗМЕРЕНИЙ								% ОБЩ. ИЗМЕНЧИВОСТИ					
Повтор №												Сходимость-изменчивость оборудования (EV)													
Образцы												EV = R x K₁								Повторы		K1		% EV = 100 (EV/TV)	
1. А 1												72 71 70 72 71 71 71 70 71 71								2		0,8862		27,17	
2. 2												72 71 70 72 71 71 71 70 71 71								3		0,5908			
3. 3												72 71 70 71 71 71 71 70 71 71													
4. Сред												72,0 71,0 70,0 71,7 71,0 71,0 71,0 70,0 71,0 71,3													
5. R												0,0 0,0 0,0 1,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 1,0													
6. В 1												70 71 72 70 71 70 71 70 70 70													
7. 2												70 71 72 70 71 70 70 70 70 70													
8. 3												70 71 72 69 71 69 70 70 70 70													
9. Сред												70,0 71,0 72,0 69,7 71,0 69,7 70,3 70,0 70,0 70,0													
10. R												0,0 0,0 0,0 1,0 0,0 1,0 1,0 0,0 0,0 0,0													
11. С 1												73 72 70 70 71 70 70 73 72 71													
12. 2												74 72 69 70 71 69 70 72 72 72													
13. 3												74 72 70 70 71 70 70 72 72 71													
14. Сред												73,7 72,0 69,7 70,0 71,0 69,7 70,0 72,3 72,0 71,3													
15. R												1,0 0,0 1,0 0,0 0,0 1,0 0,0 1,0 0,0 1,0													
Образцы												1 2 3 4 5 6 7 8 9 10													
Сред (Xp)												71,9 71,3 70,6 70,4 71,0 70,1 70,4 70,8 71,0 70,9													
17.												$(\Gamma_a + \Gamma_b + \Gamma_c) / (\text{кол-во контролеров}) = R = 0,333$													
18.												$(\text{Max X} - \text{Min X}) = X_{\text{DIFF}} = 0,800$													
												Воспроизводимость-изменчивость контролера (AV)													
												$AV = \{(X_{\text{DIFF}} \times K_2)^2 - (EV^2/nr)\}^{1/2}$													
												AV = 0,4169													
												n = количество образцов		Контролеры		2		3							
												g = количество повторений		K ₂		0,7071		0,5231							
												Сходимость и воспроизводимость (GRR)													
												$GRR = \{(EV^2 + AV^2)\}^{1/2}$								Образцы		K₃		% GRR = 100 (GRR/TV)	
												GRR = 0,461								2		0,7071		63,61	
												$\delta_{4M} = 0,5$								3		0,5231			
												Изменчивость образца (PV)								4		0,4467			
												PV = R _p x K ₃								5		0,4030		100 (PV/TV)	
												PV = 0,559								6		0,3742		77,16	
																				7		0,3534			
												Общая изменчивость (TV)								8		0,3375			
												$TV = \{(GRR^2 + PV^2)\}^{1/2}$								9		0,3249		ndc = 1,41 (PV/GRR)	
																				10		0,3146		ndc = 1,71024	

Рисунок 3.10 – Результаты анализа MSA и количественной оценки технологической неопределенности $\delta_{4M}(\psi)$

ОТЧЕТ О СХОДИМОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ПОЛНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА												ОТЧЕТ О СХОДИМОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ПОЛНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА																					
Нормативные документы N28 XS 0214 S001			Наименование средства измер. Микрометр МКЦ			Контролер А			Контролер В			Контролер С			№ чертежа N28 XS 0214 S001		Наименование средства измер. Микрометр МКЦ		Контролер А		Контролер В		Контролер С										
Наименование изделия Калиброванная сталь С10С			Характеристика Диаметр, мм			Допуск 12,82 12,93			Повторений 3			Образцов 10			Контролеров 3			ДАТА			Наименование изделия Калиброванная сталь С10С		Характеристика Диаметр, мм		Повторений 3		Образцов 10		Контролеров 3		ДАТА		
Контролер/ Повтор №												Образцы										Средние		АНАЛИЗ ИЗМЕРЕНИЙ						% ОБЩ. ИЗМЕНЧИВОСТИ			
1. А												1										X _с = 12,889		Сходимость-изменчивость оборудования (EV)						EV = R x K ₁			
2.												2										г _с = 0,005		Повторы						K1			
3.												3										X _с = 12,889		EV = 0,004						2			
4. Сред												Сред										г _с = 0,005		3						0,5908			
5.												R										X _с = 12,889		Воспроизводимость-изменчивость контролера (AV)						AV = 100 (EV/TV)			
6. В												1										г _с = 0,005		AV = 0,0066						AV = 39,07			
7.												2										X _с = 12,889		n = количество образцов						Контролеры			
8.												3										г _с = 0,005		g = количество повторений						K ₂			
9. Сред												Сред										X _с = 12,893		Сходимость и воспроизводимость (GRR)						GRR = 100 (GRR/TV)			
10.												R										г _с = 0,008		GRR = 0,008						Образцы			
11. С												1										X _с = 12,881		GRR = 0,007						K ₃			
12.												2										г _с = 0,005		δ _{4M} = 0,007						2			
13.												3										X _с = 12,888		Изменчивость образца (PV)						4			
14. Сред												Сред										г _с = 0,005		PV = R _p x K ₃						5			
15.												R										г _с = 0,005		PV = 0,015						6			
Образцы												1										X _с = 12,888		7						0,3534			
Сред (Xp)												Сред										R _p = 0,048		Общая изменчивость (TV)						8			
17.												(г _с + г _с + г _с) / (кол-во контролеров) =										R = 0,008		TV = 0,3249						ndc = 1,41 (PV/GRR)			
18.												(Max X - Min X) =										X _{DIFF} = 0,013		TV = 0,017						10			

Рисунок 3.11 – Результаты анализа MSA и количественной оценки технологической неопределенности $\delta_{4M}(d)$

В таблице 3.8 представлены результаты количественной оценки технологической неопределенности показателей качества калиброванной стали.

Таблица 3.8 – Технологическая неопределенность показателей качества калиброванной стали С10С

Показатель качества	Возмущающий фактор	Технологическая неопределенность
Временное сопротивление σ_B , Н/мм ²	$\xi_{3M}^{\sigma_B}$	$\delta_{3M}(\sigma_B) = -1,76 + 0,0487\varepsilon_B$
	$\xi_{4M}^{\sigma_B}$	$\delta_{4M}(\sigma_B) = 3,1$
Относительное сужение ψ , %	ξ_{3M}^{ψ}	$\delta_{3M}(\psi) = -0,25 + 0,296t$
	ξ_{4M}^{ψ}	$\delta_{4M}(\psi) = 0,5$
Диаметр d , мм	ξ_{1M}^d	0,014
	ξ_{2M}^d	0,010
	ξ_{3M}^d	0,055
	ξ_{4M}^d	0,007

Установлено, что на механические свойства калиброванной стали марки С10С, используемой для изготовления корпусов свечей зажигания, оказывают влияние возмущающие факторы категорий 3М и 4М, а на геометрические характеристики – все категории возмущающих факторов 1М-4М.

3.4 Робастное параметрическое проектирование технологии производства калиброванной стали

Процедура количественной оценки робастности по временному сопротивлению проведена в соответствии с разработанной методикой (см. п. 2.4). Результаты представлены в таблицах 3.9 и 3.10.

Таблица 3.9 – Матрица планирования эксперимента (для временного сопротивления)

№ эксперимента	Величина обжатия при волочении проката ε_B , %	Рабочая температура отжига T , °С	Продолжительности выдержки t , ч	Значение отклика, Н/мм ²	Технологическая неопределенность, Н/мм ²	Показатель $\eta_{зм}$, дБ
1	17,8	700	4	365,9	0,89	26,13
2	17,8	700	6	365,9	0,89	26,13
3	17,8	700	8	365,9	0,89	26,13
4	17,8	725	4	364,3	0,89	26,11
5	17,8	725	6	364,3	0,89	26,11
6	17,8	725	8	364,3	0,89	26,11
7	17,8	750	4	362,7	0,89	26,09
8	17,8	750	6	362,7	0,89	26,09
9	17,8	750	8	362,7	0,89	26,09
10	23	700	4	373,1	0,64	27,66
11	23	700	6	373,1	0,64	27,66
12	23	700	8	373,1	0,64	27,66
13	23	725	4	372,0	0,64	27,65
14	23	725	6	372,0	0,64	27,65
15	23	725	8	372,0	0,64	27,65
16	23	750	4	370,9	0,64	27,63
17	23	750	6	370,9	0,64	27,63
18	23	750	8	370,9	0,64	27,63
19	27,8	700	4	379,8	0,41	29,71
20	27,8	700	6	379,8	0,41	29,71
21	27,8	700	8	379,8	0,41	29,71
22	27,8	725	4	379,1	0,41	29,71
23	27,8	725	6	379,1	0,41	29,71
24	27,8	725	8	379,1	0,41	29,71
25	27,8	750	4	378,4	0,41	29,70
26	27,8	750	6	378,4	0,41	29,70
27	27,8	750	8	378,4	0,41	29,70

Таблица 3.10 – Средние значения показателей эксперимента (для временного сопротивления)

Параметр управления	Уровень	$\overline{\eta_{3M}}$, дБ	$\Delta\overline{\eta_{3M}}$, дБ	\bar{y} , Н/мм ²	$\Delta\bar{y}$, Н/мм ²
Величина обжатия при волочении проката ε_B	1	26,11	3,60	364,3	14,8
	2	27,65		372,0	
	3	29,71		379,1	
Рабочая температура отжига T	1	27,84	0,03	372,9	2,3
	2	27,82		371,8	
	3	27,81		370,6	

Графическая интерпретация результатов эксперимента представлена на рисунках 3.12-3.14

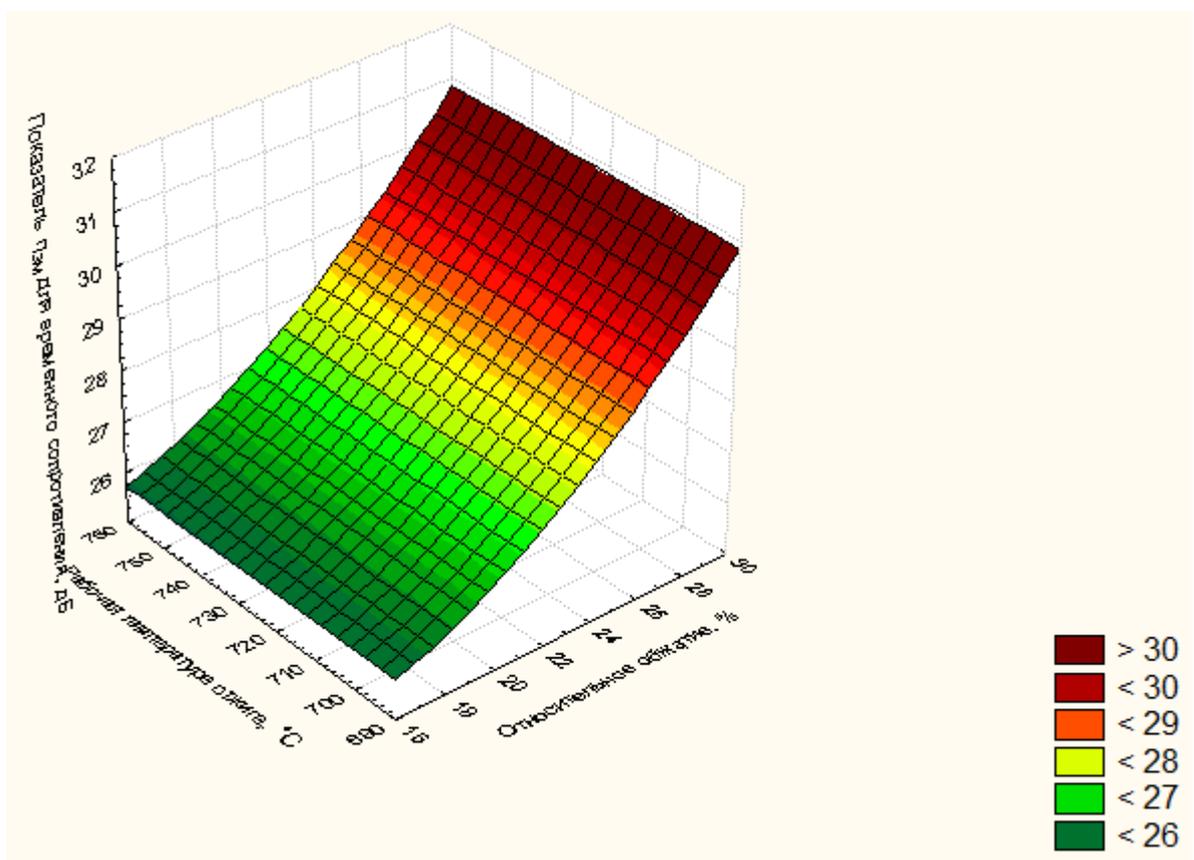


Рисунок 3.12 – Зависимость показателя η_{3M} от параметров управления (для временного сопротивления)

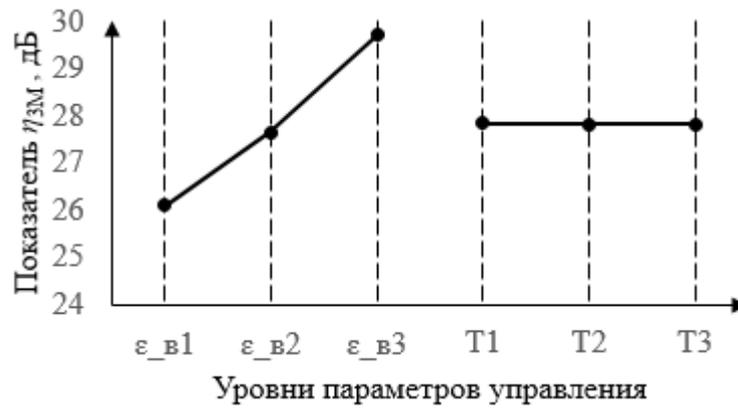


Рисунок 3.13 – Диаграмма эффектов параметров управления по показателю η_{3M} (для временного сопротивления)

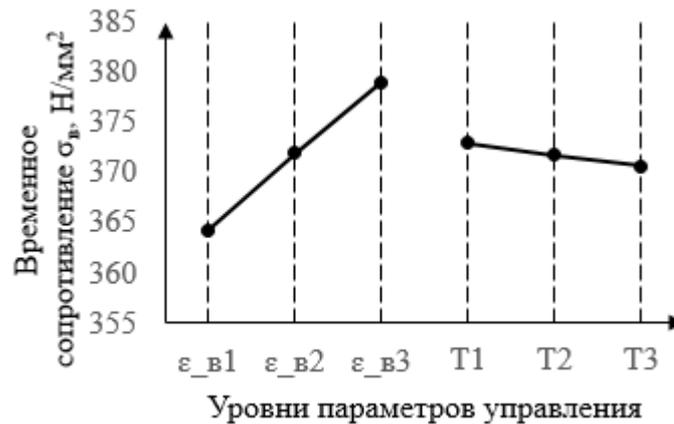


Рисунок 3.14 – Диаграмма эффектов параметров управления по временному сопротивлению σ_v

По результатам проведенного эксперимента для временного сопротивления можно сделать вывод, что наибольшее влияние на показатель η_{3M} оказывает величина обжатия при волочении проката: с увеличением относительного обжатия показатель η_{3M} повышается.

Рабочая температура отжига на показатель η_{3M} влияние не оказывает.

В таблицах 3.11 и 3.12 представлены результаты эксперимента для относительного сужения. Графическая интерпретация результатов представлена на рисунках 3.15-3.17.

Таблица 3.11 – Матрица планирования экспериментов (для относительного сужения)

№ эксперимента	Величина обжатия при волочении проката ε_B , %	Рабочая температуры отжига T , °С	Продолжительности выдержки t , ч	Значение отклика, %	Технологическая неопределенность, %	Показатель $\eta_{зм}$, дБ
1	17,8	700	4	66,9	0,9	18,56
2	17,8	700	6	66,9	1,5	16,42
3	17,8	700	8	66,8	2,1	14,99
4	17,8	725	4	68,6	0,9	18,67
5	17,8	725	6	69,6	1,5	16,59
6	17,8	725	8	70,6	2,1	15,23
7	17,8	750	4	70,2	0,9	18,77
8	17,8	750	6	72,3	1,5	16,76
9	17,8	750	8	74,3	2,1	15,45
10	23	700	4	66,9	0,9	18,56
11	23	700	6	66,9	1,5	16,42
12	23	700	8	66,8	2,1	14,99
13	23	725	4	68,6	0,9	18,67
14	23	725	6	69,6	1,5	16,59
15	23	725	8	70,6	2,1	15,23
16	23	750	4	70,2	0,9	18,77
17	23	750	6	72,3	1,5	16,76
18	23	750	8	74,3	2,1	15,45
19	27,8	700	4	66,9	0,9	18,56
20	27,8	700	6	66,9	1,5	16,42
21	27,8	700	8	66,8	2,1	14,99
22	27,8	725	4	68,6	0,9	18,67
23	27,8	725	6	69,6	1,5	16,59
24	27,8	725	8	70,6	2,1	15,23
25	27,8	750	4	70,2	0,9	18,77
26	27,8	750	6	72,3	1,5	16,76
27	27,8	750	8	74,3	2,1	15,45

Таблица 3.12 – Средние значения показателей эксперимента (для относительного сужения)

Параметр управления	Уровень	$\overline{\eta_{\text{ЗМ}}}$, дБ	$\Delta\overline{\eta_{\text{ЗМ}}}$, дБ	\overline{y} , %	$\Delta\overline{y}$, %
Рабочая температура отжига T	1	16,7	0,3	66,9	5,4
	2	16,8		69,6	
	3	17,0		72,3	
Продолжительность выдержки t	1	18,7	3,5	68,6	2,0
	2	16,6		69,6	
	3	15,2		70,6	

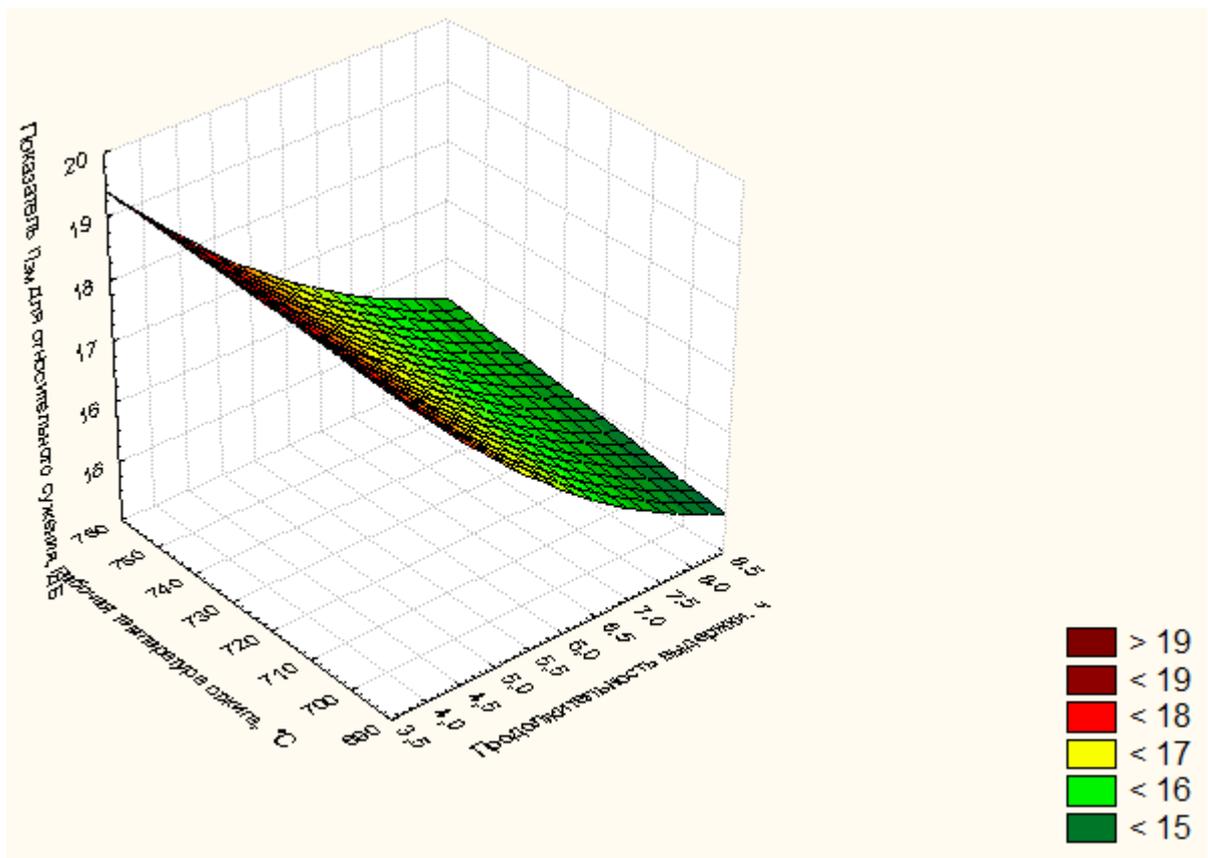


Рисунок 3.15 – Зависимость показателя $\eta_{\text{ЗМ}}$ от параметров управления (для относительного сужения)

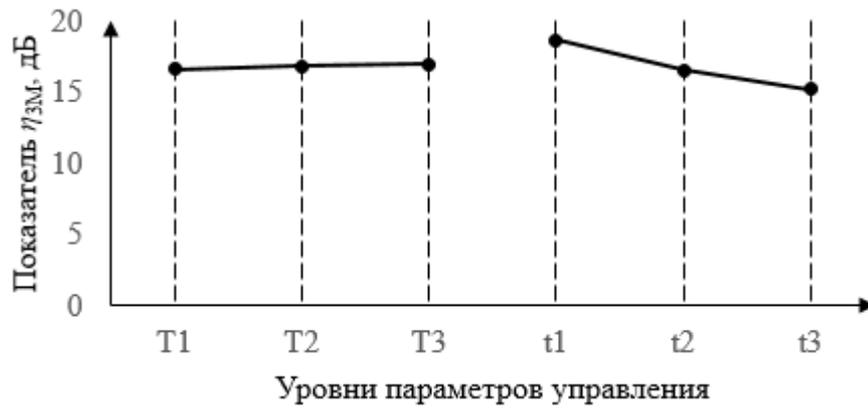


Рисунок 3.16 – Диаграмма эффектов параметров управления по показателю $\eta_{ЗМ}$ (для относительного сужения)

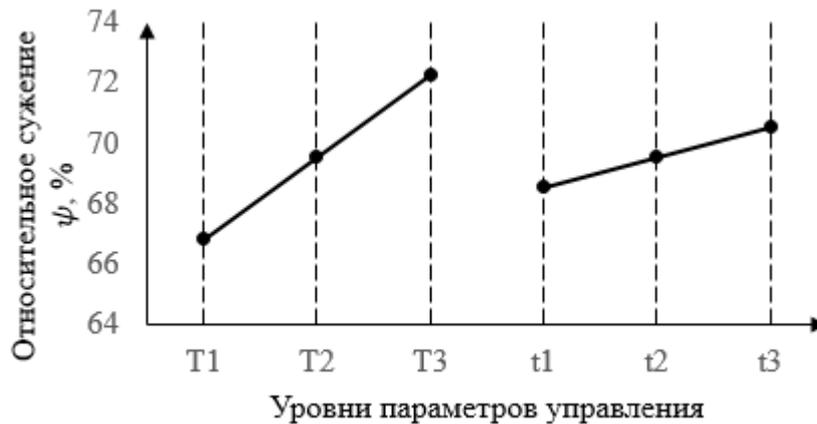


Рисунок 3.17 –Диаграмма эффектов параметров управления по относительному сужению ψ

По результатам проведенного эксперимента для относительного сужения можно сделать вывод, что наибольшее влияние на показатель $\eta_{ЗМ}$ оказывают продолжительность выдержки. Увеличение продолжительности выдержки приводит к снижению показателя $\eta_{ЗМ}$.

Для получения обобщенной оценки робастности (показателя технологической устойчивости θ) необходимо оценить значимость каждого единичного показателя качества продукции. Результаты оценки, выполненные по методике, изложенной в п. 2.4.2, представлены в таблице 3.13.

Таблица 3.13 – Результаты ранжирования показателей механических свойств калиброванной стали марки C10C по N28 XS 0214 S001

Показатель качества	Ранг	Коэффициент значимости
Временное сопротивление σ_B , Н/мм ²	8	0,53
Относительное сужение ψ , %	7	0,47

В таблице 3.14 приведены результаты расчетов показателя технологической устойчивости процесса, полученные при различных комбинациях параметров управления. На рисунке 3.18 приведена графическая интерпретация результатов расчета.

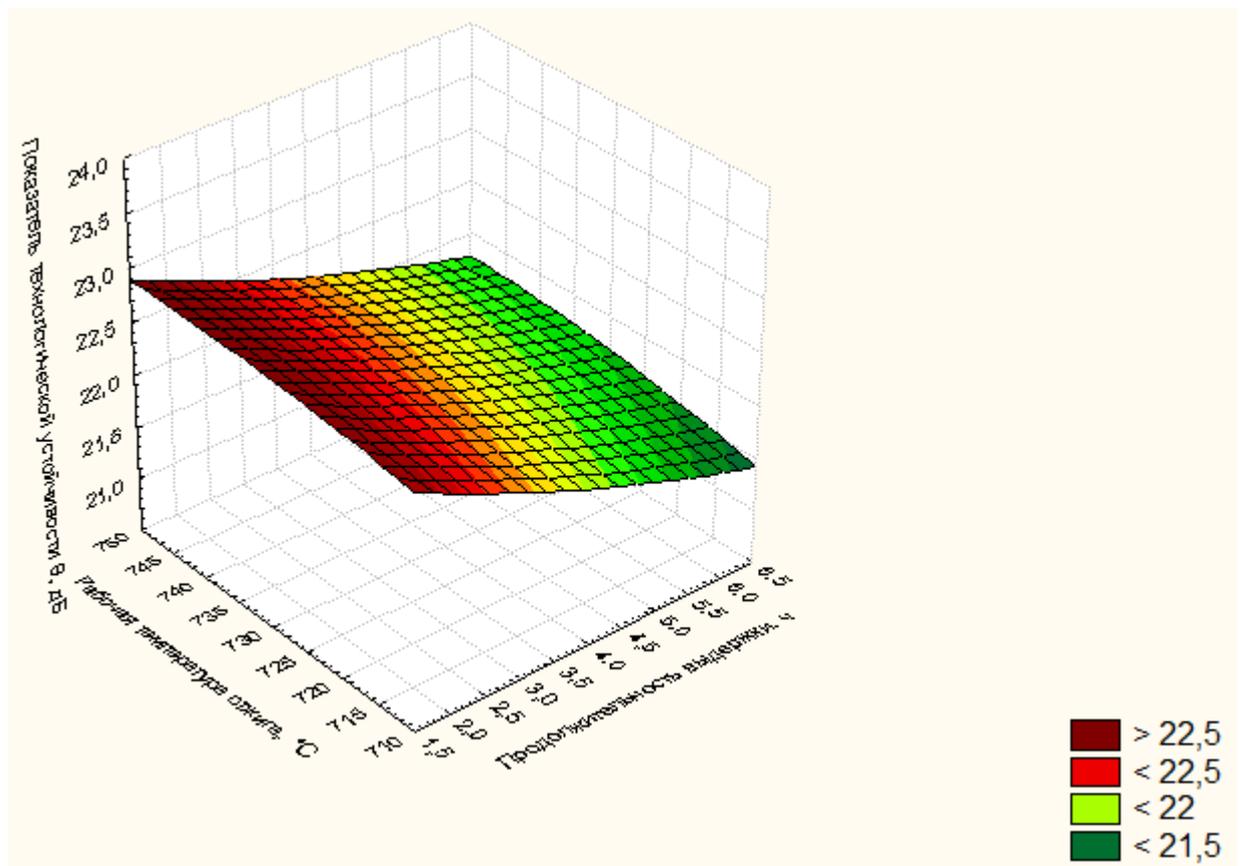


Рисунок 3.18 – Зависимость показателя устойчивости процесса θ

от параметров управления

Таблица 3.14 – Результаты расчета показателя технологической устойчивости для калиброванной стали С10С

№ эксперимента	Уровень			Показатель $\eta_{ЗМ}(\sigma_B)$, дБ	Показатель $\eta_{ЗМ}(\psi)$, дБ	Показатель технологической устойчивости θ , дБ
	для величины обжата при волочении проката ε_B	для рабочей температуры отжига T	для продолжительности выдержки t			
1	1	1	1	26,13	18,56	22,60
2	1	1	2	26,11	16,42	21,60
3	1	1	3	26,09	14,99	20,93
4	1	2	1	26,13	18,67	22,64
5	1	2	2	26,11	16,59	21,67
6	1	2	3	26,09	15,23	21,03
7	1	3	1	26,13	18,77	22,68
8	1	3	2	26,11	16,76	21,74
9	1	3	3	26,09	15,45	21,13
10	2	1	1	27,64	18,56	23,42
11	2	1	2	27,66	16,42	22,42
12	2	1	3	27,65	14,99	21,75
13	2	2	1	27,64	18,67	23,46
14	2	2	2	27,66	16,59	22,49
15	2	2	3	27,65	15,23	21,85
16	2	3	1	27,64	18,77	23,50
17	2	3	2	27,66	16,76	22,56
18	2	3	3	27,65	15,45	21,95
19	3	1	1	29,71	18,56	24,51
20	3	1	2	29,70	16,42	23,51
21	3	1	3	29,72	14,99	22,84
22	3	2	1	29,71	18,67	24,56
23	3	2	2	29,70	16,59	23,59
24	3	2	3	29,72	15,23	22,95
25	3	3	1	29,71	18,77	24,60
26	3	3	2	29,70	16,76	23,66
27	3	3	3	29,72	15,45	23,05

По результатам расчетов (см. таблицу 3.14) выявлено, что максимальное значение показателя технологической устойчивости процесса $\theta = 24,60$ дБ достигается в эксперименте № 25 при комбинации параметров $(\varepsilon_{\text{в}}3T3t1)$.

В таблице 3.15 приведены средние значения показателя технологической устойчивости при различных уровнях параметров управления, на основании которых была построена диаграмма эффектов параметров управления (см. рисунок 3.19). Область технологической устойчивости процесса будет определяться границами [23,37; 24,60]. В данную область попадают эксперименты № 10, 13, 16, 19, 20, 22, 23, 25, 26.

Таблица 3.15 – Средние значения показателя устойчивости процесса

Параметр управления	Уровень	$\bar{\theta}$, дБ	$\Delta\bar{\theta}$, дБ
Величина обжатия при волочении проката $\varepsilon_{\text{в}}$	1	21,78	1,92
	2	22,60	
	3	23,70	
Рабочая температура отжига T	1	22,62	0,14
	2	22,69	
	3	22,76	
Продолжительность выдержки t	1	23,55	1,61
	2	22,58	
	3	21,94	

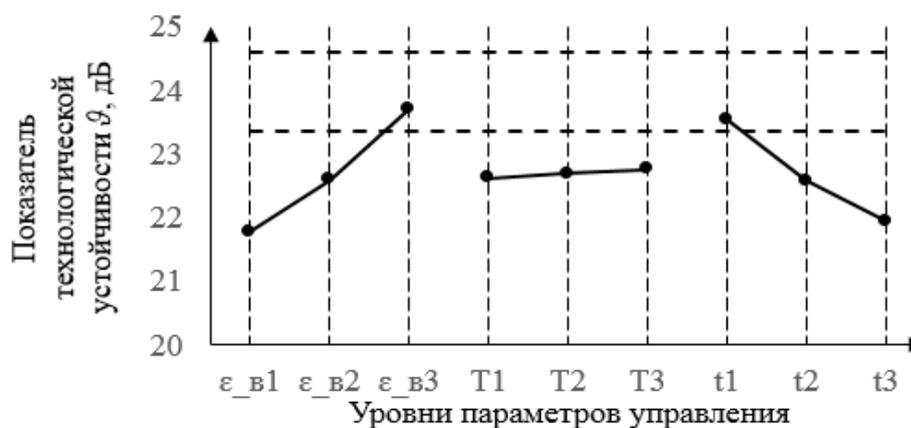


Рисунок 3.19 – Диаграмма эффектов параметров управления по показателю технологической устойчивости

Результаты серого реляционного анализа (см. п. 2.4.3) представлены в таблицах 3.16 и 3.17. На рисунке 3.20 приведена диаграмма эффектов параметров управления по реляционной оценке показателей качества.

Таблица 3.16 – Таблица результатов серого реляционного анализа

№ эксперимента	Временное сопротивление σ_B , Н/мм ²	Относительное сужение ψ , %	z_1	z_2	ε_1	ε_2	$\gamma_{ПК}$	Ранг
1	365,9	66,9	0,70	0,01	0,47	0,34	0,467	7
2	365,9	66,9	0,70	0,01	0,47	0,33	0,467	8
3	365,9	66,8	0,70	0,00	0,47	0,33	0,467	9
4	364,3	68,6	0,78	0,23	0,54	0,39	0,539	6
5	364,3	69,6	0,78	0,37	0,54	0,44	0,541	5
6	364,3	70,6	0,78	0,50	0,54	0,50	0,542	4
7	362,7	70,2	0,86	0,45	0,66	0,48	0,652	3
8	362,7	72,3	0,86	0,73	0,66	0,65	0,657	2
9	362,7	74,3	0,86	1,00	0,66	1,00	0,667	1
10	373,1	66,9	0,34	0,01	0,32	0,34	0,321	16
11	373,1	66,9	0,34	0,01	0,32	0,33	0,321	17
12	373,1	66,8	0,34	0,00	0,32	0,33	0,321	18
13	372,0	68,6	0,39	0,23	0,33	0,39	0,336	15
14	372,0	69,6	0,39	0,37	0,33	0,44	0,337	14
15	372,0	70,6	0,39	0,50	0,33	0,50	0,339	13
16	370,9	70,2	0,45	0,45	0,35	0,48	0,354	12
17	370,9	72,3	0,45	0,73	0,35	0,65	0,359	11
18	370,9	74,3	0,45	1,00	0,35	1,00	0,369	10
19	379,8	66,9	0,00	0,01	0,27	0,34	0,269	25
20	379,8	66,9	0,00	0,01	0,27	0,33	0,269	26
21	379,8	66,8	0,00	0,00	0,27	0,33	0,269	27
22	379,1	68,6	0,04	0,23	0,27	0,39	0,274	24
23	379,1	69,6	0,04	0,37	0,27	0,44	0,276	23
24	379,1	70,6	0,04	0,50	0,27	0,50	0,277	22
25	378,4	70,2	0,07	0,45	0,28	0,48	0,281	21
26	378,4	72,3	0,07	0,73	0,28	0,65	0,286	20
27	378,4	74,3	0,07	1,00	0,28	1,00	0,296	19

Таблица 3.17 – Средние значения реляционной оценки показателей качества

Параметр управления	Уровень	$\bar{\gamma}$	$\Delta\bar{\gamma}$
Величина обжатия при волочении проката ε_B	1	0,56	0,28
	2	0,34	
	3	0,28	
Рабочая температура отжига T	1	0,35	0,09
	2	0,38	
	3	0,44	
Продолжительность выдержки t	1	0,39	0
	2	0,39	
	3	0,39	

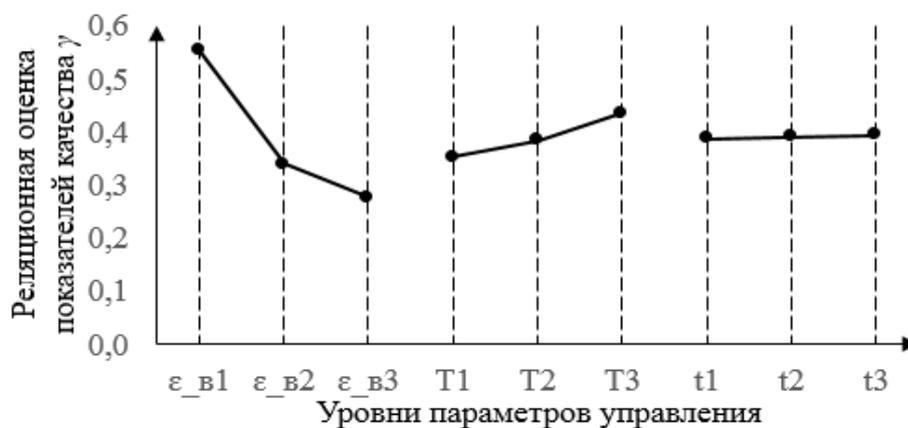


Рисунок 3.20 – Диаграмма эффектов параметров управления по реляционной оценке показателей качества

Режим № 16 выбран в качестве оптимального, поскольку при комбинации параметров ($\varepsilon_B 2 T 3 t 1$) реляционная оценка имеет наибольшее значение $\gamma_{\text{пк}} = 0,354$ и показатель устойчивости процесса $\theta = 23,50$ дБ попадает в область $[23,37; 24,60]$. Таким образом, в результате исследования определен оптимальный режим производства калиброванной стали марки С10С по N28 XS 0214 S001, которому соответствует величина обжатия при волочении проката $\varepsilon_B = 23 \%$, рабочая температура отжига $T = 750$ °С, продолжительность выдержки $t = 4$ ч.

Проведена оценка соответствия показателей качества, получаемых при оптимальном технологическом режиме, требованиям потребителя, результаты которой представлены в таблице 3.18.

Таблица 3.18 – 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 диаметр 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 допусковое отклонение с 0,11 мм до 0,09 мм.

3.5 Промышленная реализация новой технологии производства калиброванной стали

С целью подтверждения результатов проведенных исследований изготовлена опытная партия калиброванной стали по разработанным режимам. Производство опытной партии осуществлялось в условиях сталепрокатного производства ОАО «ММК-МЕТИЗ».

Исходной заготовкой служил горячекатаный прокат диаметром 15,5 мм из стали марки С10С по ТС 00187895-086-2015 производства АО «Оскольский электрометаллургический комбинат им. А.А. Угарова». Результаты испытаний горячекатаного проката при входном контроле представлены в таблицах 3.19 и 3.20.

Подготовка поверхности горячекатаного проката диаметром 15,5 мм к волочению осуществлялась на участке травления в травильном растворе с концентрацией: H_2SO_4 7-16 %, FeSO_4 до 15 %.

Волочение горячекатаного проката диаметром 15,5 мм на передельную заготовку 13,6 мм производили на волочильном стане «Кизерлинг-2» при скорости волочения 30-60 м/мин.

Обезжиривание передельной заготовки диаметром 13,6 мм проводилось по следующему режиму:

- концентрация «Фоскон-203» 20-40 г/дм³;
- температура 60-80 °С;
- время не менее 60 мин.

Таблица 3.19 – Результаты химического анализа

Марка стали	№ плавки	№ партии	Содержание элементов, %											
			C	Mn	Si	Cr	S	P	Ni	Cu	Mo	Sn	N	Al
C10C	41450	11	Требования ТС 00187895-086-2015											
			0,10- 0,13	0,21- 0,45	не более									0,020- 0,080
					0,13	0,07	0,035	0,030	0,05	0,10	0,02	0,01	0,007	
			Данные входного контроля											
			0,13	0,34	0,06	0,03	0,005	0,003	0,05	0,05	0,007	-	-	0,035
			0,13	0,34	0,06	0,03	0,006	0,003	0,05	0,05	0,008	-	-	0,036
			0,13	0,34	0,06	0,03	0,005	0,003	0,05	0,05	0,008	-	-	0,035
			Данные сертификата											
			0,12	0,33	0,06	0,03	0,005	0,002	0,05	0,04	0,007	0,003	0,007	0,033

Таблица 3.20 – Металлографического исследования и результаты испытаний на холодную осадку

Марка стали	№ плавки	№ партии	№ пачки	Группа осадки бб, на образце высотой 1,5d	Макроструктура	Неметаллические включения по DIN 50602	Величина действительного зерна	
С10С	41450	11		Фактические данные входного контроля	Требования ГОСТ 0702: Макроструктура не должна иметь усадочной раковины, рыхлости, пузырей, трещин, расслоений, шлаковых включений и флокенов	Требования потребителя: К3 (оксиды) ≤ 30 ; К6 (сульфиды) = 0.	Дополнительно контролируемый параметр	
				Фактические данные входного контроля				
				64	выдержала	соответствует	К3 (оксиды) $\leq 1,5$; К6 (сульфиды) = 0.	8-7
				155	выдержала			
				156	выдержала			
				157	выдержала			
158	выдержала							

Сфероидизирующий отжиг передельной заготовки осуществлялся в печи «EBNER» по следующему режиму:

- рабочая температура нагрева 750 °С;
- выдержка под нагревательным колпаком при температуре 750 °С 4 ч;
- контролируемое охлаждение до 670 °С 7,5 ч.

После отжига передельной заготовки величина действительного зерна составила 7-8, прироста зерна нет.

Фосфатирование осуществлялось на основе концентрата «Фоскон-33» по режиму, представленному в таблице 3.21.

Таблица 3.21 – Режим фосфатирования

Параметры фосфатирующего раствора				Продолжительность, мин	Температура фосфатирующего раствора, °С
Общая кислотность	Свободная кислотность	Соотношение общей кислотности к свободной	Содержание железа, г/дм ³ не более		
40-90	5-15	5-10	3	1-7	70-90

Волочение (уплотнение фосфатного покрытия) передельной заготовки на диаметр 12,93 мм проводилось на стане «Кизерлинг-2» при скорости волочения 30-40 м/мин.

Результаты испытаний (см. таблицу 3.22) показали, что продукция полностью соответствует требованиям потребителя. Полученные механические свойства находятся в диапазонах, определенных с помощью робастного параметрического проектирования (см. таблицу 3.18). Это подтверждает адекватность разработанной методологии и целесообразность ее применения в промышленных условиях.

Таблица 3.22 – Результаты испытаний калиброванной стали диаметром 12,93 мм марки С10С плавки 41150

№ партии	Механические свойства		Холодная осадка на образце высотой 1,5d	Плотность фосфатного покрытия, г/м ²
	Временное сопротивление, Н/мм ²	Относительное сужение, %		
A87-6173.1.27.8.19	372,6	70,3	соотв.	9,2
A87-6173.2.27.8.19	368,1	70,5	соотв.	15,0
A87-6173.5.28.8.19	371,7	70,5	соотв.	14,7
A87-6173.13.28.8.19	370,8	71,1	соотв.	13,7
A87-6173.11.28.8.19	369,7	70,3	соотв.	15,0
A87-6173.12.28.8.19	371,6	70,4	соотв.	13,9
A87-6173.16.28.8.19	367,9	70,2	соотв.	10,4
A87-6173.15.28.8.19	371,9	70,4	соотв.	12,4
A87-6301.26.30.8.19	371,7	71,1	соотв.	12,5
A87-6301.27.30.8.19	369,2	71,0	соотв.	14,9
A87-6301.28.30.8.19	372,0	70,1	соотв.	7,5
A87-6301.29.30.8.19	369,6	71,1	соотв.	9,4
A87-6301.32.31.8.19	367,7	70,3	соотв.	15,0
A87-6306.38.31.8.19	370,4	70,5	соотв.	11,6
A87-6301.39.31.8.19	370,2	70,9	соотв.	13,1
A87-6306.40.31.8.19	370,7	70,2	соотв.	13,7
A87-6173.7.28.8.19	370,5	70,2	соотв.	7,5
A87-6173.6.28.8.19	369,9	70,7	соотв.	9,4
A87-6173.4.28.8.19	371,1	70,8	соотв.	15,0
A87-6173.3.28.8.19	370,2	70,2	соотв.	11,6

Продолжение таблицы 3.22

A87-6173.8.28.8.19	371,8	71,0	соотв.	13,1
A87-6173.9.28.8.19	371,7	71,0	соотв.	13,7
A87-6173.10.28.8.19	367,9	71,3	соотв.	15,0
A87-6173.14.28.8.19	370,6	71,3	соотв.	13,9
A87-6173.17.28.8.19	372,8	70,3	соотв.	8,2
A87-6301.18.30.8.19	370,9	70,9	соотв.	15,0
A87-6301.19.30.8.19	368,1	71,2	соотв.	12,3
A87-6301.20.30.8.19	373,8	70,3	соотв.	13,9

Опытная партия калиброванной стали по N28 XS 0214 S001, предназначенная для изготовления корпусов свечей зажигания, была отправлена заказчику для переработки в готовые изделия. При переработке калиброванной стали у потребителя дефектов продукции обнаружено не было.

3.6 Выводы по главе

1. Получены математические модели формирования показателей качества калиброванной стали марки C10C с учетом специфики взаимодействия режимов деформационной и термической обработок. Установлено влияние деформационных и температурных режимов обработок на временное сопротивление калиброванной стали. Установлена взаимосвязь уровня относительного сужения калиброванной стали с температурно-временными параметрами управления термической обработки.

2. Проведена процедура идентификации возмущающих факторов, вызывающих вариабельность механических и геометрических свойств калиброванной стали. Проведены экспериментальные исследования и получены за-

висимости технологической неопределенности показателей качества калиброванной стали. Получена количественная оценка технологической неопределенности температуры отжига калиброванной стали.

3. 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.

4. В условиях сталепроволочного производства ОАО «ММК-МЕТИЗ» реализован новый технологический процесс производства, обеспечивающий заданное качество калиброванной стали диаметром 12,93 мм по N28 XS 0214 S001, предназначенной для изготовления заготовок корпусов свечей зажигания.

ГЛАВА 4 РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДОЛОГИИ ПРИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ ДЕЙСТВУЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ (НА ПРИМЕРЕ ПРОИЗВОДСТВА СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ АРМАТУРНЫХ КАНАТОВ)

Высокопрочные стабилизированные арматурные канаты – основа современных эффективных строительных технологий изготовления сборного железобетона с предварительным натяжением арматуры, а также конструкций с последующим натяжением арматуры на бетон. Они хорошо зарекомендовали себя на рынке благодаря своим эксплуатационным характеристикам и эффективному использованию в строительной отрасли в связи со значительной экономией металла в предварительно напряженных железобетонных конструкциях [294, 295].

Арматурные канаты находят свое применение при строительстве объектов ответственного назначения: тоннели, мосты, объекты транспортной инфраструктуры [296]. Использование канатов для армирования железобетонных конструкций в сравнении с другими видами проволоочной арматуры дает определенные преимущества [297]. Укрупнение арматурных элементов обеспечивает снижение трудоемкости изготовления железобетонных конструкций и более широкое применение средств механизации [298-302].

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 [303-309].

В настоящей главе проведена оценка робастности промышленной технологии производства стальных семипроволочных стабилизированных канатов диаметром 12,5 мм и разработаны оптимальные технологические режимы производства продукции.

4.1 Характеристики стабилизированных арматурных канатов и порядок проведения технологического процесса

Самыми распространенными в промышленном потреблении являются семипроволочные канаты класса К7. Одними из них являются спиральные канаты 1х7 (1 + 6) с линейным касанием проволок, изготавливаемые по ГОСТ Р 53772-2010 «Канаты стальные арматурные семипроволочные стабилизированные. Технические условия».

Семипроволочный канат 1х7 (1 + 6) состоит из сердечника и шести наружных проволок, спирально уложенных вокруг сердечника. Данный вид каната прост в изготовлении, надёжен в работе и поэтому получил широкое распространение при изготовлении предварительно напряженных железобетонных конструкций. Требования к свойствам арматурного каната приведены в таблицах 4.1 и 4.2.

Таблица 4.1 – Основные характеристики арматурного каната диаметром 12,5 мм по ГОСТ Р 53772-2010

Характеристика	Значение
Временное сопротивление σ_B , Н/мм ² , не менее	1860
Разрывное усилие P , кН	173,0-204,0
Нагрузка при условном пределе текучести $P_{\sigma_{0,1}}$, кН, не менее	163,7
Условный предел текучести $\sigma_{0,1}$, Н/мм ² , не менее	1760
Полное относительное удлинение при максимальной нагрузке δ_{max} , %, не менее	4,4
Потери напряжения от релаксации в канате при начальной нагрузке 0,7 от фактического разрывного усилия после 1000 часов выдержки под напряжением при температуре (20±1) °С ΔP_r , не более	2,5

Таблица 4.2 – Химический состав стали 80, %

Массовая доля элементов, %							
C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu
не более							
0,77-0,85	0,40-0,70	0,37	0,025	0,025	0,10	0,10	0,10

Технология производства стабилизированных арматурных канатов из стали марки 80 представляет собой совмещенный процесс из следующих операций:

- свивка проволок в канат и рихтовка;
- отпуск под напряжением (стабилизация) арматурного каната;
- охлаждение и сушка арматурного каната;
- нанесение антикоррозионной смазки;
- намотка арматурного каната на катушку.

По действующей технологии арматурный канат производится посредством свивки центральной (диаметром 4,3 мм) и шести наружных проволок (диаметром 4,1 мм), полученных многократной холодной пластической деформацией методом волочения, в крутильной машине. Формирование каната происходит в плашках на выходе из крутильной машины. Для улучшения качества арматурный канат подвергается рихтовке.

Поскольку технология волочения проволок предполагает высокие степени деформации, достигающие 85-90 %, данный процесс неминуемо приводит к формированию остаточных напряжений, неблагоприятно влияющих на механические и эксплуатационные свойства будущего каната. Поэтому проблема снижения или перераспределения в объеме металла остаточных напряжений является актуальной и вынуждает технологов вводить дополнительные операции обработки готовых изделий [310-322].

Наиболее эффективными способами управления перераспределением остаточных напряжений в объеме металла являются технологические методы, сочетающие воздействия различной физической природы [323-327]. В частности, на практике широко апробированы механотермические методы, сочетающие одновременное воздействие термической обработки в диапазоне 360-400 °С и растягивающих напряжений величиной 35-50 % от разрывного усилия. Натяжение в канате обеспечивается за счет рассогласования скоростей вращения двух пар тянущих кабестанов, создающих заданное контролируемое натяжение каната при его прохождении через индукционную печь и устройство водяного охлаждения. Скорость обработки на линии стабилизации арматурных канатов варьируется в пределах 50-70 м/мин. После сушки

каната горячим воздухом на его поверхность наносится антикоррозионная смазка, после чего готовый арматурный канат наматывается на катушку.

Топологическая модель технологического процесса формирования механических свойств стабилизированного арматурного каната представлена на рисунке 4.2.

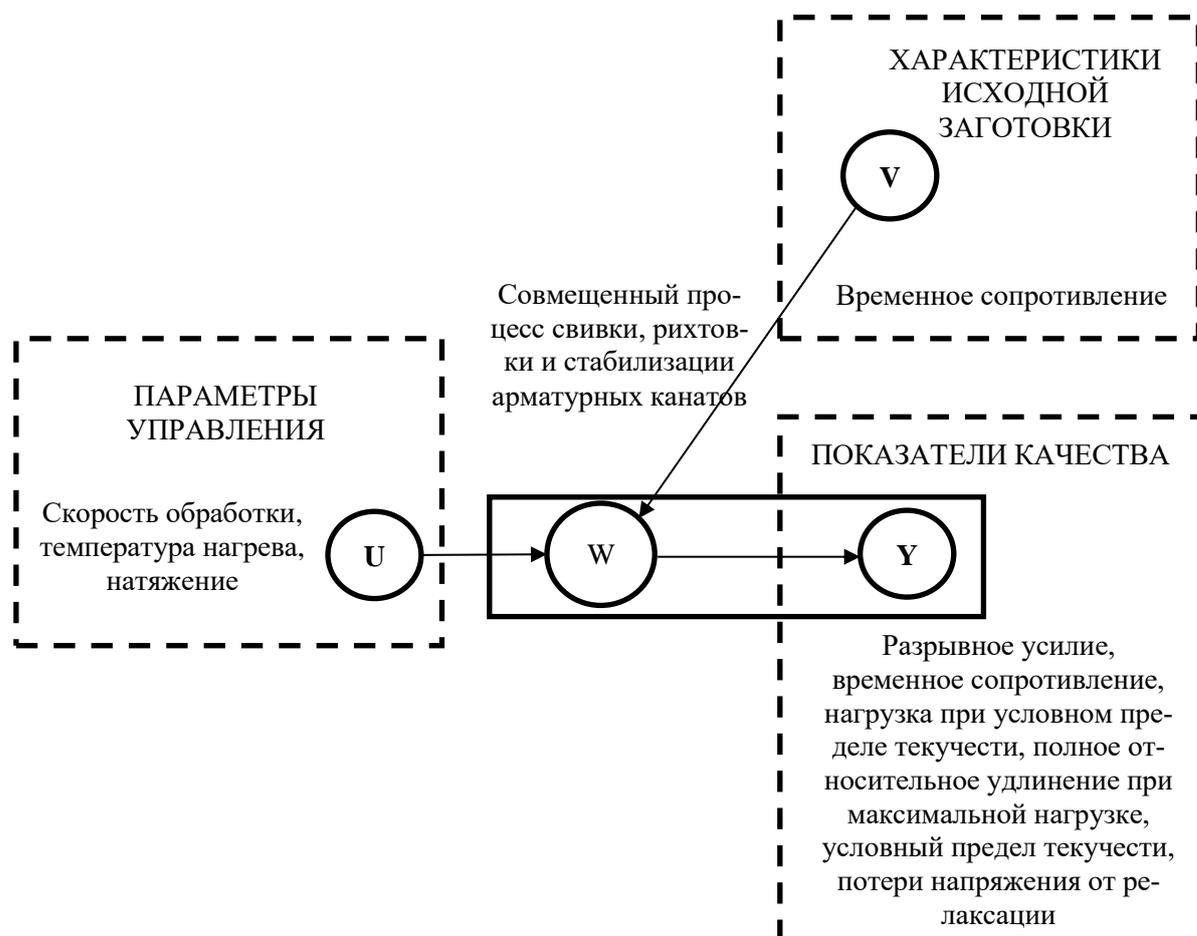


Рисунок 4.1 – Топологическая модель процесса формирования механических свойств стабилизированных арматурных канатов

Таким образом, на комплекс механических свойств стабилизированных арматурных канатов оказывают влияние температура отпуска, величина растягивающих напряжений и скорость обработки на совмещенной линии. Целью исследования было определение оптимального соотношения между температурой нагрева в индукционной печи и скоростью обработки металла на совмещенной линии.

4.2 Разработка математических моделей для управления качеством стабилизированных арматурных канатов

Для получения математических моделей поставлен полный факторный эксперимент, основанный на варьировании скорости обработки и температуры нагрева (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Параметры управления и их уровни, выбранные для совершенствования механических свойств арматурных канатов диаметром 12,5 мм по ГОСТ Р 53772-2010

Параметры управления	Уровни		
	1	2	3
Скорость обработки V , м/мин	50	60	70
Температура нагрева T , °С	360	380	400

Для исследования были выбраны следующие диапазоны параметров управления:

- скорость обработки на линии 50-70 м/мин;
- температура нагрева в индукторе 360-400°С.

Удлинение при настройке натяжения каната между кабестанами составляло 1%.

После проведения серии промышленных экспериментов образцы стабилизированных арматурных канатов были подвергнуты испытаниям на растяжение по ГОСТ 12004-81 на разрывной машине LFM 250. Для каждого из исследуемых режимов испытание проводилось на трех образцах каната. Результаты испытаний представлены в таблице 4.4.

Графическая интерпретация результатов исследования представлена на рисунках 4.2-4.6. Наибольшее влияние на изменение прочностных свойств арматурных канатов (временного сопротивления σ_b , разрывного усилия P , нагрузки при условном пределе текучести $P_{\sigma_{0,1}}$, условного предела текучести $\sigma_{0,1}$) оказывает температура нагрева в индукторе.

Таблица 4.4 – Результаты механических испытаний стабилизированных арматурных канатов

№ эксперимента	Параметры управления		Механические свойства					
	Скорость обработки, м/мин	Температура нагрева, °С	Временное сопротивление, σ_B , Н/мм ²	Разрывное усилие P , кН	Нагрузка при условном пределе текучести $P_{\sigma_{0,1}}$, кН	Условный предел текучести $\sigma_{0,1}$, Н/мм ²	Полное относительное удлинение δ_{max} , %	Потери напряжения от релаксации ΔP_r , %
1	50	360	1883	175,2	165,7	1781	4,90	2,40
2	50	380	1902	176,9	167,4	1799	4,65	2,00
3	50	400	1867	173,7	164,3	1766	4,74	2,40
4	60	360	1888	175,6	166,2	1786	4,71	2,55
5	60	380	1892	176,0	166,5	1789	4,54	2,25
6	60	400	1870	174,0	164,6	1769	4,62	2,55
7	70	360	1898	176,6	167,0	1796	4,32	2,85
8	70	380	1901	177,8	168,7	1808	4,32	2,75
9	70	400	1876	174,5	165,1	1775	4,38	2,85

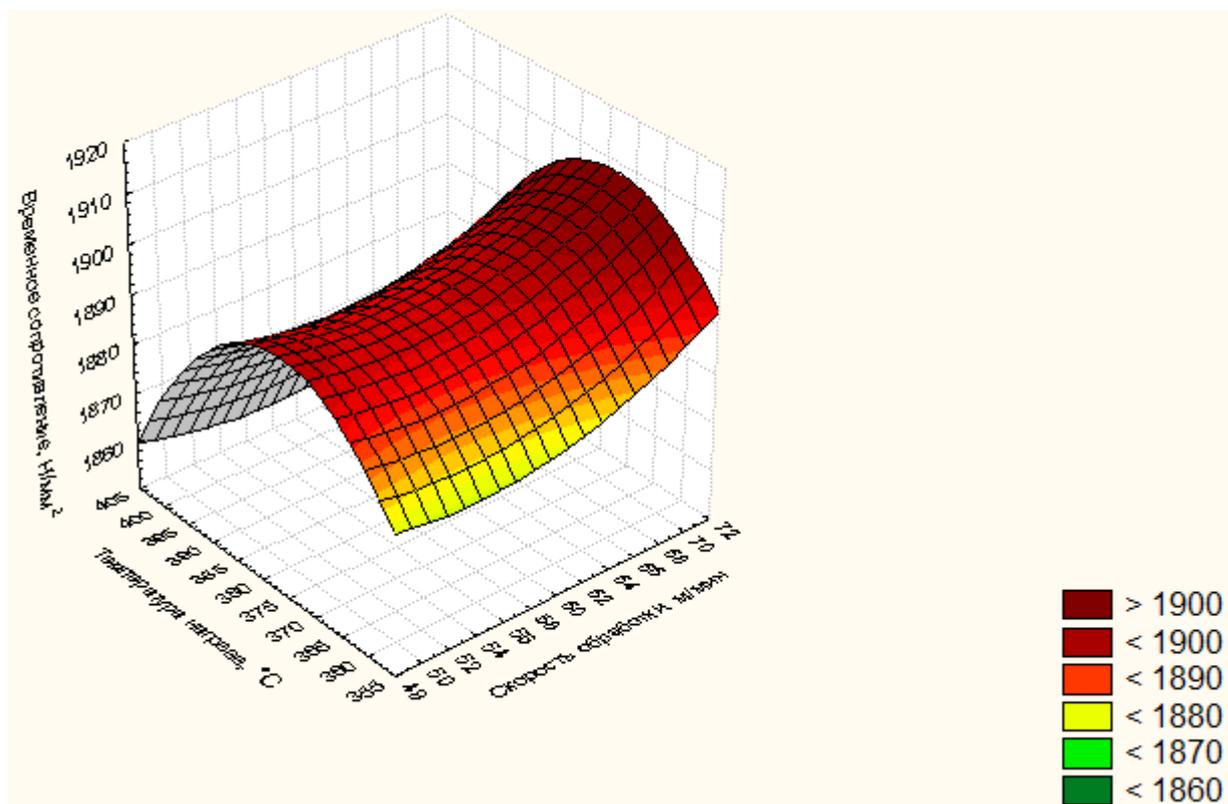


Рисунок 4.2 – Влияние параметров управления на временное сопротивление

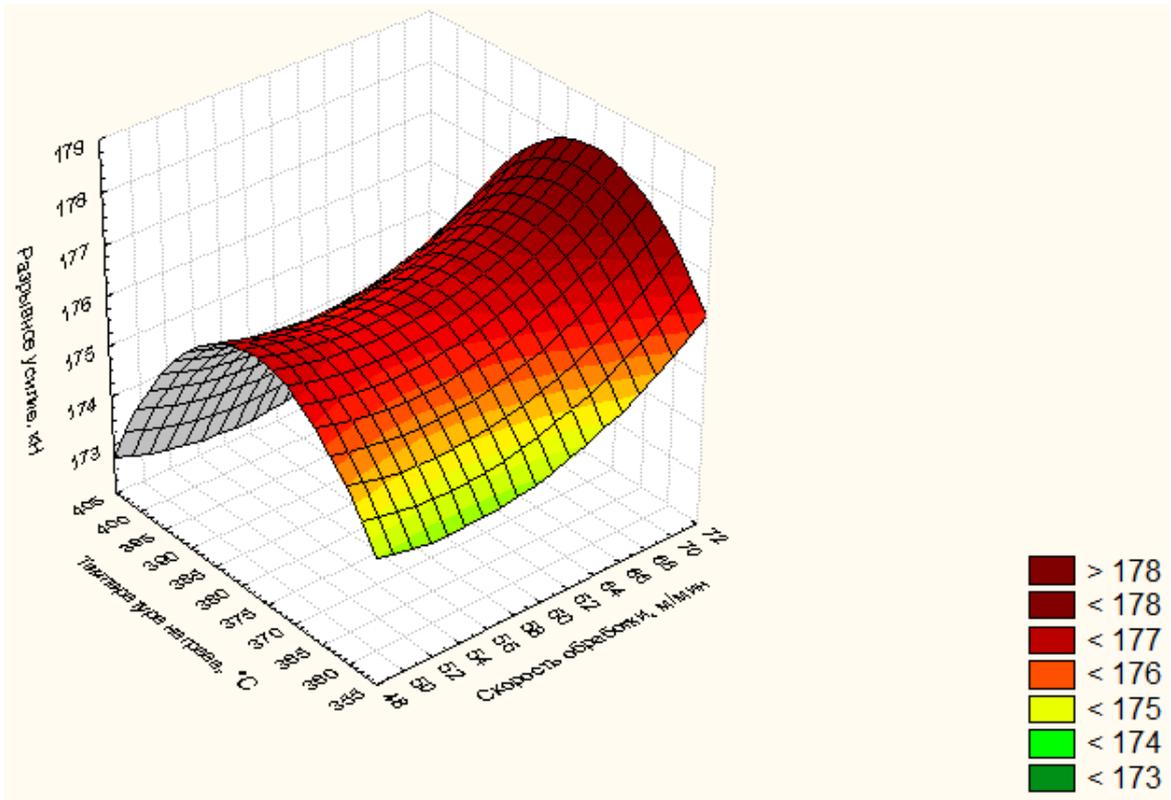


Рисунок 4.3 – Влияние параметров управления на разрывное усилие

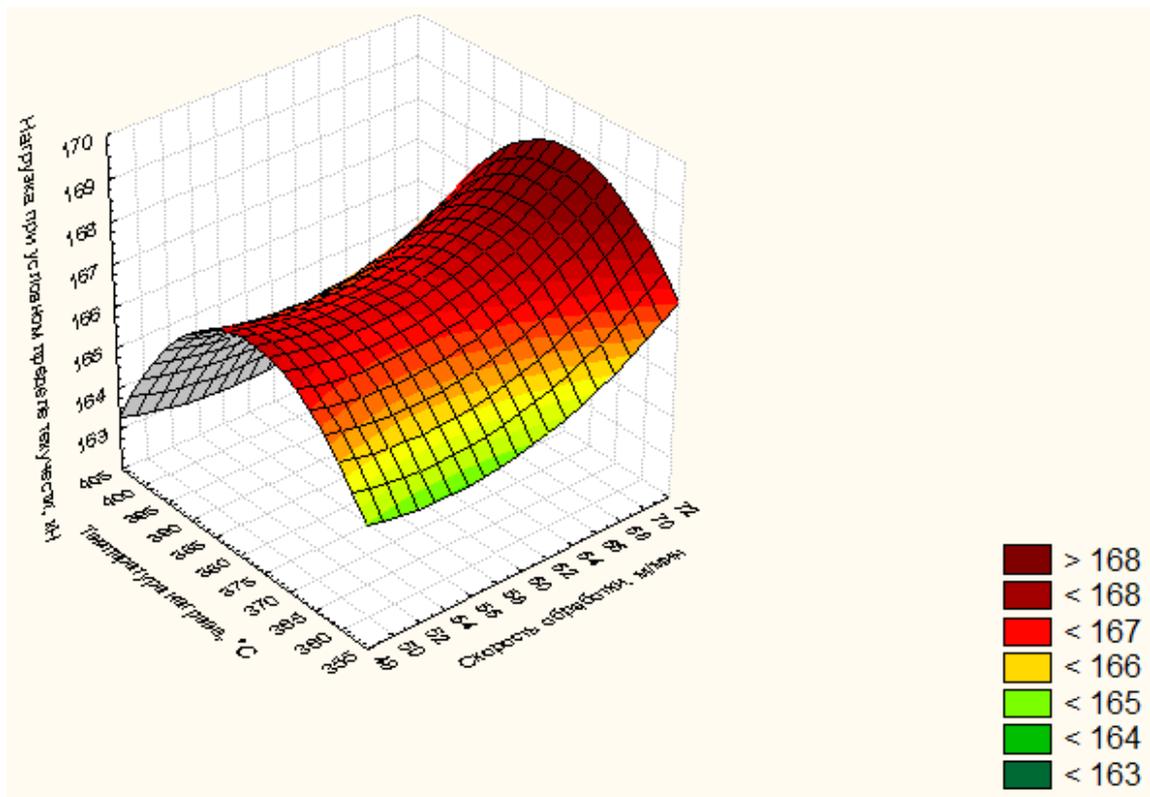


Рисунок 4.4 – Влияние параметров управления на нагрузку при условном пределе текучести

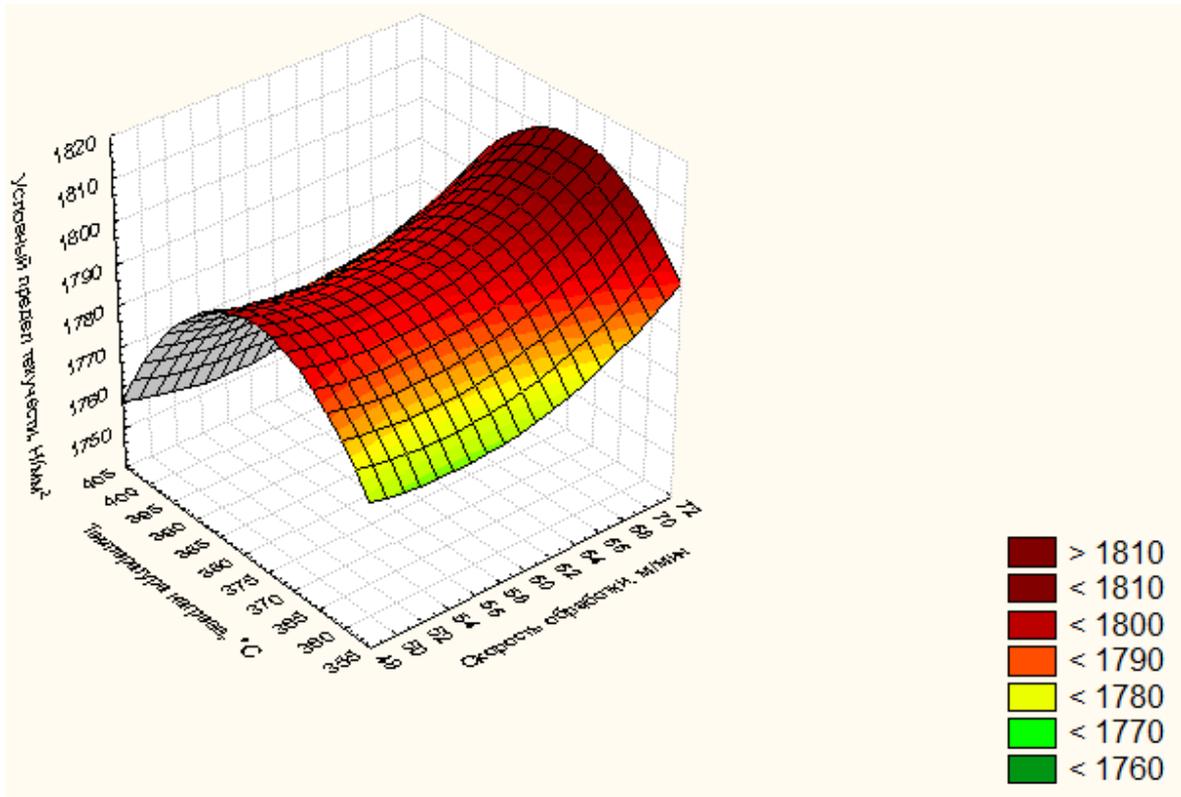


Рисунок 4.5 – Влияние параметров управления на условный предел текучести

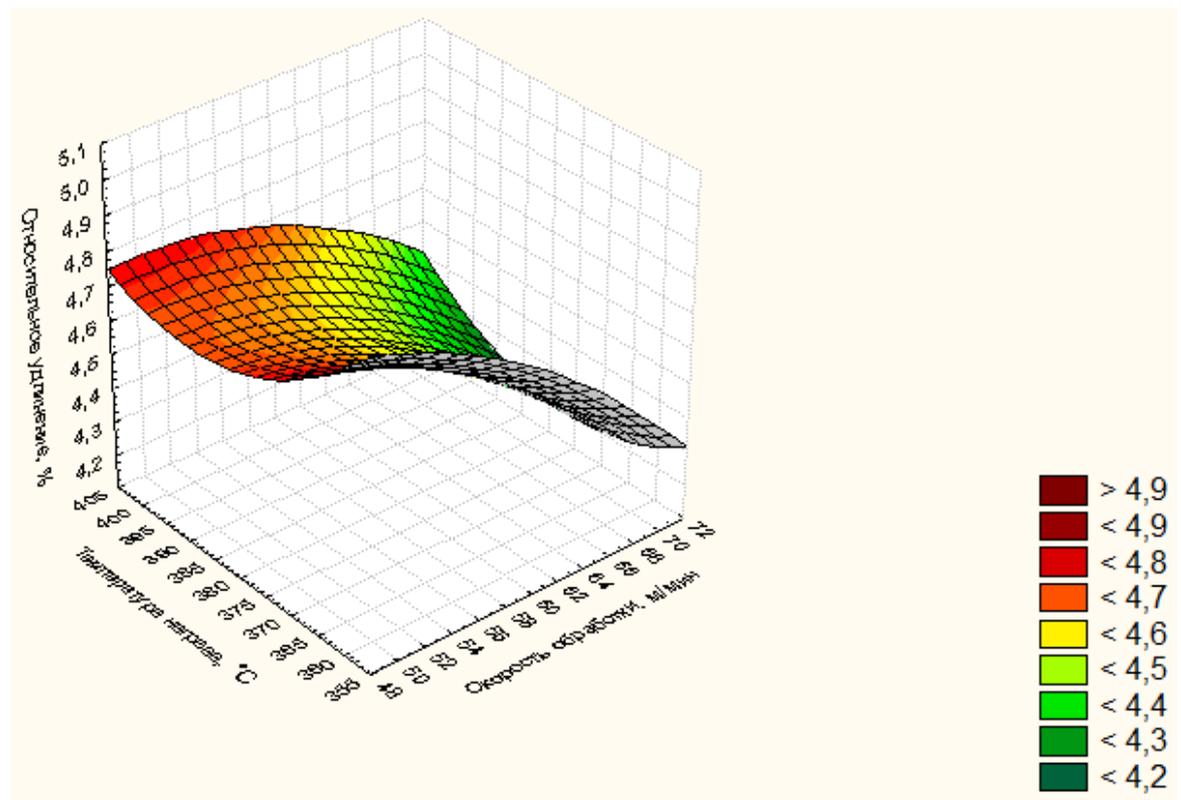


Рисунок 4.6 – Влияние параметров управления
на полное относительное удлинение

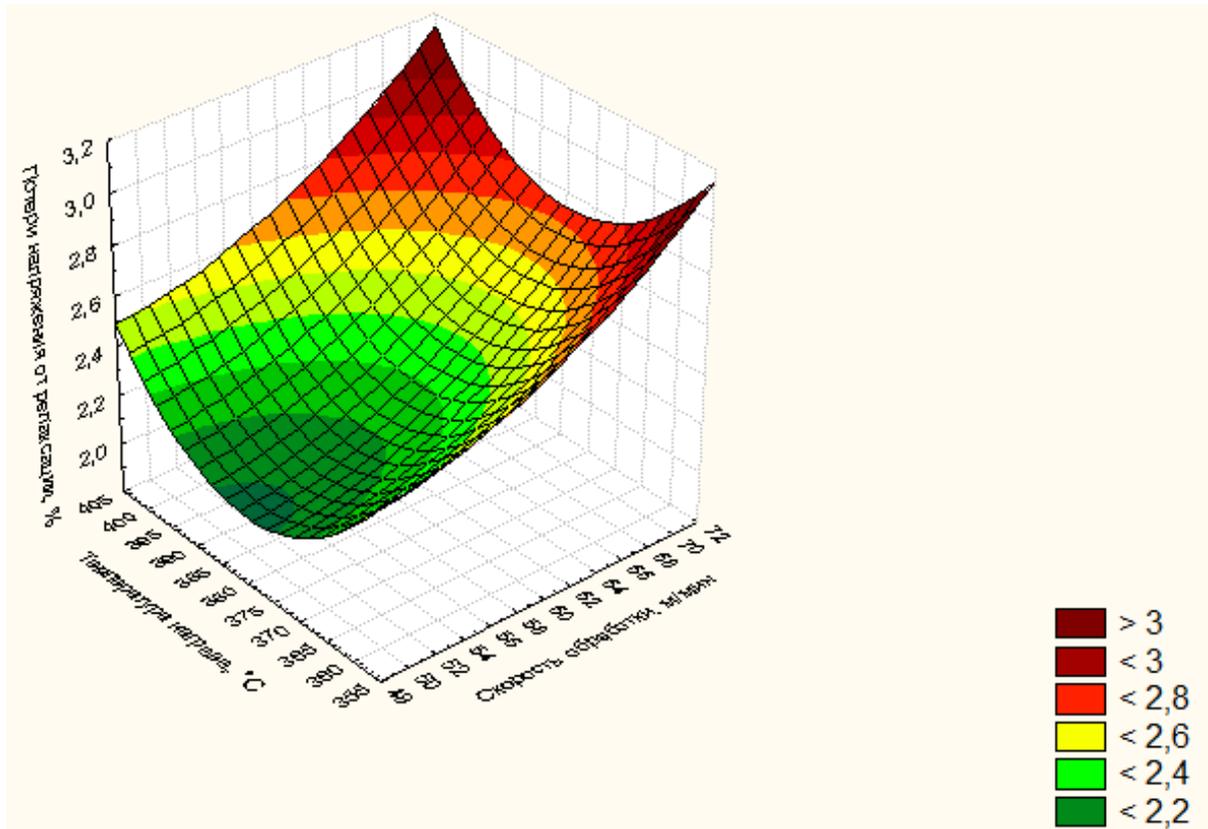


Рисунок 4.7 – Влияние параметров управления
на потери напряжения от релаксации

Максимальные значения показателей σ_B , P , $P_{\sigma_{0,1}}$, $\sigma_{0,1}$ фиксируются при температуре нагрева 380 °C. Полное относительное удлинение δ_{\max} достигает максимального значения при температуре нагрева 360 °C.

Увеличение скорости обработки на линии стабилизации приводит к снижению показателя δ_{\max} . Потери напряжения от релаксации ΔP_r равномерно увеличиваются при повышении скорости обработки на линии стабилизации.

В результате математического моделирования получены уравнения регрессии для механических свойств стабилизированных арматурных канатов диаметром 12,5 мм (таблица 4.5).

Таблица 4.5 – Результаты множественного регрессионного анализа

Уравнение регрессии	F_p	R^2
$\sigma_B = -4391 - 2,3667V + 33,8667T + 0,0467V^2 - 0,0075VT - 0,0446T^2$	9,16	0,94
$P = -523,6 - 0,4035V + 3,7837T + 0,006V^2 - 0,0007VT - 0,005T^2$	12,67	0,96
$P_{\sigma_{0,1}} = -551 - 0,4705V + 3,8863T + 0,0065V^2 - 0,0007VT - 0,0051T^2$	9,94	0,94
$\sigma_{0,1} = -5305,7 - 4,0724V + 38,3737T + 0,0608V^2 - 0,0071VT - 0,0505T^2$	12,74	0,96
$\delta_{\max} = 48,8 - 0,0431V - 0,221T - 0,000708V^2 + 0,00028VT + 0,00027T^2$	25,78	0,98
$\Delta P_r = 100,19 - 0,0825V - 0,5067T + 0,000917V^2 + 0,00067T^2$	11,82	0,95

Полученные математические модели статистически значимы, т.к. $F_p > F_{\text{табл}}$ ($F_{\text{табл}} = 9,01$). Вероятность нулевой гипотезы (p-level) меньше 0,05, что говорит об общей значимости уравнений регрессии.

4.3 Оценка технологической неопределенности, возникающей при производстве стабилизированных арматурных канатов

С использованием разработанной методики (см. п. 2.2) проведена идентификация возмущающих факторов, влияющих на формирование механических свойств стабилизированных арматурных канатов. Результаты экспертной оценки представлены на рисунке 4.8.

					ПК	σ_B	P	$P_{\sigma 0,1}$	$\sigma_{0,1}$	δ_{max}	ΔP_r
					ВФ						
Возмущающие факторы, влияющие на показатели качества					$\xi_{ПК}^{1M}$	-	-	-	-	-	-
					$\xi_{ПК}^{2M}$	-	-	-	-	-	-
					$\xi_{ПК}^{3M}$	+	+	+	+	+	+
					$\xi_{ПК}^{4M}$	+	+	+	+	+	+
Возмущающие факторы, влияющие на входные параметры					ПК	σ_B	P	$P_{\sigma 0,1}$	$\sigma_{0,1}$	δ_{max}	ΔP_r
ВФ	$\xi_{ВХ}^{1M}$	$\xi_{ВХ}^{2M}$	$\xi_{ВХ}^{3M}$	$\xi_{ВХ}^{4M}$	ВХ						
ВХ					ВХ						
Параметры управления					Параметры управления						
V	+	+	-	+	V	+	+	+	+	+	+
T	+	+	-	+	T	+	+	+	+	+	+

Рисунок 4.8 – Матрица возмущающих факторов, влияющих на формирование показателей качества стабилизированных арматурных канатов

Согласно матрице возмущающих факторов (см. рисунок 4.8) необходимо провести анализ следующих видов технологической неопределенности 1М и 2М: $\delta_{1M}(v)$, $\delta_{2M}(v)$, $\delta_{1M}(T)$, $\delta_{2M}(T)$.

В соответствии с разработанной методикой (см. п. 2.3) проведена количественная оценка технологической неопределенности категорий 1М и 2М, результаты которой представлены на рисунках 4.9 и 4.10.

ОТЧЕТ О ВЛИЯНИИ ОБОРУДОВАНИЯ И ПЕРСОНАЛА НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ПАРАМЕТРА УПРАВЛЕНИЯ														
Нормативный документ ГОСТ Р 53772-2010				Наименование оборудования Линия стабилизации MFL				Оператор А						
Наименование изделия Арматурный канат диам. 12,5 мм								Оператор В						
Характеристика		Допуск						Оператор С						
Скорость обработки, м/мин														
Оператор/ Измер. №		Измерения через интервалы 15 мин.												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
1. А	1	59,3	60,5	59,5	59,6	59,9	60	60	59,3	59,3	60,4			
2.	2	59,9	60,3	59,6	59,6	59,6	60,0	60,1	59,4	59,7	60,0			
3.	3	59,6	60,4	59,3	59,5	59,9	59,8	60,0	59,2	59,8	60,1			
4.	Xij*	59,6	60,4	59,5	59,6	59,8	59,9	60,0	59,3	59,6	60,2	X*j*	59,8	
5. В	1	59,9	60,4	59,3	59,2	59,9	59,8	60,6	59,8	60	60,2			
6.	2	60,0	60,6	59,5	59,7	60,0	59,7	60,4	59,8	60,2	60,3			
7.	3	59,7	60,3	59,7	59,7	59,8	59,9	60,6	59,7	60,0	59,8			
8.	Xij*	59,9	60,4	59,5	59,5	59,9	59,8	60,5	59,8	60,1	60,1	X*j*	60,0	
9. С	1	59,8	60,4	59,5	60,4	59,6	60,9	59,9	60,0	59,3	60,9			
10.	2	59,4	59,9	59,6	59,6	59,7	60,6	59,6	60,7	60,1	60,2			
11.	3	59,3	60,3	59,4	59,9	60,4	60,6	59,7	60,2	59,5	60,9			
12.	Xij*	59,5	60,2	59,5	60,0	59,9	60,7	59,7	60,3	59,6	60,7	X*j*	60,0	
Образцы		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
13.	Xi**	59,7	60,3	59,5	59,7	59,9	60,1	60,1	59,8	59,8	60,3			
14.	Техн. неопр. оборудования						δ_{1M}	0,4						
15.	Техн. неопр. персонала						δ_{2M}	0,1						

Рисунок 4.9 – Результаты количественной оценки технологической неопределенности $\delta_{1M}(V)$, $\delta_{2M}(V)$

ОТЧЕТ О ВЛИЯНИИ ОБОРУДОВАНИЯ И ПЕРСОНАЛА НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ПАРАМЕТРА УПРАВЛЕНИЯ													
Нормативный документ				Наименование оборудования				Оператор А					
ГОСТ Р 53772-2010				Линия стабилизации MFL									
Наименование изделия								Оператор В					
Арматурный канат диам. 12,5 мм													
Характеристика		Допуск						Оператор С					
Температура, °С													
Оператор/	Измерения через интервалы 15 мин.												
Измер. №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
1. А	1	375	382	378	377	376	375	384	383	383	384		
2,	2	376	379	379	378	378	374	382	381	387	380		
3,	3	375	382	378	374	379	373	385	387	381	382		
4,	X _{ij} *	375,3	381,0	378,3	376,3	377,7	374,0	383,7	383,7	383,7	382,0	X [*] _j *	379,6
5. В	1	376	377	375	375	378	380	380	378	381	378		
6,	2	379	382	376	375	378	382	378	379	377	383		
7,	3	380	380	377	374	380	380	380	377	378	379		
8,	X _{ij} *	378,3	379,7	376,0	374,7	378,7	380,7	379,3	378,0	378,7	380,0	X [*] _j *	378,4
9. С	1	381	384	381	378	385	387	383	377	380	380		
10,	2	378	383	379	383	385	385	383	376	382	383		
11,	3	379	385	381	379	378	383	378	379	382	379		
12,	X _{ij} *	379,3	384,0	380,3	380,0	382,7	385,0	381,3	377,3	381,3	380,7	X [*] _j *	381,2
Образцы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
13,	X _i **	377,7	381,6	378,2	377,0	379,7	379,9	381,4	379,7	381,2	380,9		
14,	Техн. неопр. оборудования					δ _{1М}	2,3						
15,	Техн. неопр. персонала					δ _{2М}	1,4						

Рисунок 4.10 – Результаты количественной оценки технологической неопределенности $\delta_{1M}(T)$, $\delta_{2M}(T)$

Зависимости для количественной оценки технологической неопределенности категории 3М для показателей качества стабилизированных арматурных канатов приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Технологическая неопределенность метода управления для механических свойств арматурных канатов диаметром 12,5 мм

Показатель качества	Технологическая неопределенность метода управления
Временное сопротивление σ_B , Н/мм ²	$\delta_{3M}(\sigma_B) = -2,3667\delta(V) + 33,8667\delta(T) + 0,0934V\delta(V) - 0,0075(V\delta(T) + T\delta(V)) - 0,0892T\delta(T)$
Разрывное усилие P , Н	$\delta_{3M}(P) = -0,4035\delta(V) + 3,7837\delta(T) + 0,012V\delta(V) - 0,0007(V\delta(T) + T\delta(V)) - 0,01T\delta(T)$
Нагрузка при условном пределе текучести $P_{\sigma_{0,1}}$, Н	$\delta_{3M}(P_{\sigma_{0,1}}) = -0,4705\delta(V) + 3,8863\delta(T) + 0,013V\delta(V) - 0,0007(V\delta(T) + T\delta(V)) - 0,0102T\delta(T)$
Условный предел текучести $\sigma_{0,1}$, Н/мм ²	$\delta_{3M}(\sigma_{0,1}) = -4,0724\delta(V) + 38,3737\delta(T) + 0,01216V\delta(V) - 0,00071(V\delta(T) + T\delta(V)) - 0,0101T\delta(T)$
Полное относительное удлинение δ_{max} , %	$\delta_{3M}(\delta_{max}) = -0,0431\delta(V) - 0,221\delta(T) + 0,0014V\delta(V) + 0,003(V\delta(T) + T\delta(V)) + 0,0006T\delta(T)$
Потери напряжения от релаксации ΔP_r , %	$\delta_{3M}(\Delta P_r) = -0,0825\delta(V) - 0,5067\delta(T) + 0,0018V\delta(V) + 0,0014T\delta(T)$

В соответствии с матрицей возмущающих факторов (см. рисунок 4.8) необходимо оценить технологическую неопределенность категории 4М для следующих параметров:

- скорость обработки V ;
- температура нагрева T ;
- временное сопротивление σ_B ;
- разрывное усилие P ;
- нагрузка при условном пределе текучести $P_{\sigma_{0,1}}$;
- условный предел текучести $\sigma_{0,1}$;
- относительное удлинение δ_{max} ;
- потери напряжения от релаксации ΔP_r .

Результаты оценки представлены на рисунках 4.11-4.18.

ОТЧЕТ О СХОДИМОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ПОЛНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА												ОТЧЕТ О СХОДИМОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ПОЛНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА																	
Нормативные документы ГОСТ Р 53772-2010			Наименование средства измер. Программируемый контроллер S7-300			Контролер А			Контролер В			Контролер С			№ чертежа ГОСТ Р 53772-2010		Наименование средства измер. Программируемый контроллер S7-300		Контролер А		Контролер В		Контролер С						
Наименование изделия Арматурный канат диам. 12,5 мм			Характеристика Скорость обработки, м/мин			Повторений 3			Образцов 10			Контролеров 3			ДАТА			Наименование изделия Арматурный канат диам. 12,5 мм		Характеристика Скорость обработки, м/мин		Повторений 3		Образцов 10		Контролеров 3		ДАТА	
Контролер/Повтор №		Образцы										Средние		АНАЛИЗ ИЗМЕРЕНИЙ						% ОБЩ. ИЗМЕНЧИВОСТИ									
1. А		1	61,4	61,6	58,1	58,9	60,9	58,7	56,6	61,1	58,3	62,1	59,8		Сходимость-изменчивость обрудования (EV)														
2.		2	60,7	62,0	58,0	59,0	62,2	57,4	57,9	60,4	58,6	61,8	59,8		EV = R x K ₁		Повторы		K ₁		% EV = 100 (EV/TV)								
3.		3	61,8	62,9	57,9	58,9	61,4	58,0	57,7	61,2	59,1	61,5	60,0		EV = 0,471		2		0,8862		% EV = 29,87								
4.		Сред	61,3	62,2	58,0	58,9	61,5	58,0	57,4	60,9	58,7	61,8	X _с = 59,9		Воспроизводимость-изменчивость контролера (AV)														
5.		R	1,1	1,3	0,2	0,1	1,3	1,3	1,3	0,8	0,8	0,6	Г _с = 0,9		AV = $\{(X_{\text{OFF}} \times K_2)^2 - (EV^2/nr)\}^{1/2}$						% AV = 100 (AV/TV)								
6. В		1	62,0	59,6	57,5	62,0	57,8	57,7	57,1	57,1	62,2	57,7	59,1		AV = 0,4096						% AV = 25,99								
7.		2	62,3	58,8	57,6	62,7	58,5	57,8	58,1	57,8	61,7	56,7	59,2		p = количество образцов		Контролеры		2 3										
8.		3	61,7	58,9	57,3	62,0	58,4	57,2	57,7	58,3	61,0	56,9	58,9		g = количество повторений		K ₂		0,7071 0,5231										
9.		Сред	62,0	59,1	57,5	62,2	58,2	57,6	57,6	57,7	61,6	57,1	X _с = 59,1		Сходимость и воспроизводимость (GRR)														
10.		R	0,6	0,8	0,3	0,7	0,7	0,6	1,0	1,2	1,2	1,0	Г _с = 0,8		GRR = $\{(EV^2 + AV^2)\}^{1/2}$		Образцы		K ₃		% GRR = 100 (GRR/TV)								
11. С		1	63,3	57,4	56,5	59,3	61,6	57,3	58,2	57,6	63,0	56,8	59,1		GRR = 0,624		2		0,7071		% GRR = 39,59								
12.		2	62,0	57,9	57,2	60,4	61,5	57,7	58,2	58,1	63,2	56,6	59,3		δ _{4M} = 0,6		3		0,5231										
13.		3	63,2	57,3	56,9	60,3	61,3	56,6	58,2	57,3	62,9	57,4	59,1		Изменчивость образца (PV)														
14.		Сред	62,8	57,5	56,9	60,0	61,5	57,2	58,2	57,7	63,0	56,9	X _с = 59,2		PV = R _p x K ₃		4		0,4467		% PV = 100 (PV/TV)								
15.		R	1,3	0,6	0,7	1,1	0,3	1,1	0,0	0,8	0,3	0,8	Г _с = 0,7		PV = 1,447		5		0,4030		% PV = 91,83								
Образцы		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	X̄ = 59,4																	
Сред (Xp)		62,0	59,6	57,4	60,4	60,4	57,6	57,7	58,8	61,1	58,6	R _p = 4,6		Общая изменчивость (TV)															
17.		(Г _с + Г _с + Г _с) / (кол-во контролеров) =										R = 0,797		TV = $\{(GRR^2 + PV^2)\}^{1/2}$						9 0,3249 ndc = 1,41 (PV/GRR)									
18.		(Max X - Min X) =										X _{OFF} = 0,800		TV = 1,576						10 0,3146 ndc = 3,27046									

Рисунок 4.11 – Результаты анализа MSA и количественной оценки технологической неопределенности $\delta_{4M}(V)$

ОТЧЕТ О СХОДИМОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ													ОТЧЕТ О СХОДИМОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ																												
ОТНОСИТЕЛЬНО ПОЛНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА													ОТНОСИТЕЛЬНО ПОЛНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА																												
Нормативные документы ГОСТ Р 53772-2010			Наименование средства измер. Пирометр Modline 5G-1007			Контролер А			Контролер В			Контролер С			№ чертежа ГОСТ Р 53772-2010			Наименование средства измер. Пирометр Modline 5G-1007			Контролер А			Контролер В			Контролер С														
Наименование изделия Арматурный канат диам. 12,5 мм			Характеристика Допуск			Температура нагрева, °С			Повторений 3			Образцов 10			Контролеров 3			ДАТА			Наименование изделия Арматурный канат диам. 12,5 мм			Характеристика			Температура нагрева, °С			Повторений 3			Образцов 10			Контролеров 3			ДАТА		
Контролер/													АНАЛИЗ ИЗМЕРЕНИЙ																												
Повтор №													% ОБЩ. ИЗМЕНЧИВОСТИ																												
Образцы													Сходимость-изменчивость оборудования (EV)																												
Средние													Сходимость-изменчивость контролера (AV)																												
1. А 1 363 387 380 372 384 395 364 375 364 382 377													EV = R x K ₁ Повторы K1 % EV = 100 (EV/TV)																												
2. 2 363 384 378 375 386 398 363 375 362 379 376													EV = 2,068 2 0,8862 % EV = 33,48																												
3. 3 363 388 376 377 382 399 363 377 363 381 377													3 0,5908																												
4. Сред 363 386 378 375 384 397 363 376 363 381 X _с = 377													Воспроизводимость-изменчивость контролера (AV)																												
5. R 0 4 4 5 4 4 1 2 2 3 3 Г _с = 3													AV = $\{(X_{DIFF} \times K_2)^2 - (EV^2/nr)\}^{1/2}$ % AV = 100 (AV/TV)																												
6. В 1 368 375 372 375 390 366 379 386 400 376 379													AV = 1,3429 % AV = 21,74																												
7. 2 371 378 366 369 388 367 378 386 400 373 378													n = количество образцов Контролеры 2 3																												
8. 3 371 381 371 372 391 362 382 392 397 377 380													r = количество повторений K ₂ 0,7071 0,5231																												
9. Сред 370 378 370 372 390 365 380 388 399 375 X _с = 379													Сходимость и воспроизводимость (GRR)																												
10. R 3 6 6 6 3 5 4 6 3 4 4 Г _с = 5													GRR = $\{(EV^2 + AV^2)\}^{1/2}$ Образцы K ₃ % GRR = 100 (GRR/TV)																												
11. С 1 359 371 398 393 373 364 388 368 363 380 376													GRR = 2,466 2 0,7071 % GRR = 39,92																												
12. 2 359 374 395 394 374 365 392 367 361 380 376													δ _{AM} = 2,4 3 0,5231																												
13. 3 362 375 396 392 373 368 387 364 362 382 376													Изменчивость образца (PV)																												
14. Сред 360 373 396 393 373 366 389 366 362 381 X _с = 376													PV = R _p x K ₃ 5 0,4030 % PV = 100 (PV/TV)																												
15. R 3 4 3 2 1 4 5 4 2 2 2 Г _с = 3													PV = 5,663 6 0,3742 % PV = 91,69																												
Образцы 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 X = 377													7 0,3534																												
Сред (X _p) 364 379 381 380 382 376 377 377 375 379 R _p = 18													Общая изменчивость (TV)																												
17. (Г _с + Г _о + Г _с) / (кол-во контролеров) = R = 3,500													TV = $\{(GRR^2 + PV^2)\}^{1/2}$ 9 0,3249 ndc = 1,41 (PV/GRR)																												
18. (Max X - Min X) = X _{DIFF} = 2,667													TV = 6,176 10 0,3146 ndc = 3,2384																												

Рисунок 4.12 – Результаты анализа MSA и количественной оценки технологической неопределенности $\delta_{4M}(T)$

ОТЧЕТ О СХОДИМОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ													ОТЧЕТ О СХОДИМОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ												
ОТНОСИТЕЛЬНО ПОЛНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА													ОТНОСИТЕЛЬНО ПОЛНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА												
Нормативные документы ГОСТ Р 53772-2010			Наименование средства измер. Разрывная машина LFM 250			Контролер А			№ чертежа ГОСТ Р 53772-2010			Наименование средства измер. Разрывная машина LFM 250			Контролер А										
Наименование изделия Арматурный канат diam. 12,5 мм			Характеристика Врем. сопр., Н/мм ² 1860			Контролер В			Наименование изделия Арматурный канат diam. 12,5 мм			Характеристика Врем. сопр., Н/мм ²			Контролер В										
Допуск			Повторений 3			Образцов 10			Контролеров 3			ДАТА			Контролер С										
Контролер/ Повтор №													АНАЛИЗ ИЗМЕРЕНИЙ												
Образцы													% ОБЩ. ИЗМЕНЧИВОСТИ												
Средние													Сходимость-изменчивость оборудования (EV)												
1. А 1 1924 1892 1878 1908 1852 1933 1849 1873 1911 1899 1892													EV = R x K ₁ Повторы K ₁ % EV = 100 (EV/TV)												
2, 2 1928 1902 1895 1916 1845 1929 1848 1890 1925 1899 1898													EV = 6,105 2 0,8862 % EV = 25,86												
3, 3 1927 1893 1896 1911 1853 1925 1845 1880 1913 1911 1895													3 0,5908												
4, Сред 1926 1896 1890 1912 1850 1929 1847 1881 1916 1903 X _в = 1895													Воспроизводимость-изменчивость контролера (AV)												
5, R 4 10 18 8 8 8 4 17 14 12 Γ _в = 10													AV = {(X _{DIFF} x K ₂) ² - (EV ² /nr)} ^{1/2} % AV = 100 (AV/TV)												
6. В 1 1913 1882 1907 1872 1842 1924 1897 1911 1900 1906 1895													AV = 9,6481 % AV = 40,88												
7, 2 1906 1897 1925 1868 1841 1931 1895 1924 1911 1895 1899													n = количество образцов Контролеры 2 3												
8, 3 1911 1886 1922 1876 1849 1922 1899 1925 1901 1903 1899													r = количество повторений K ₂ 0,7071 0,5231												
9, Сред 1910 1888 1918 1872 1844 1926 1897 1920 1904 1901 X _р = 1898													Сходимость и воспроизводимость (GRR)												
10, R 7 15 18 8 8 9 4 14 11 11 Γ _р = 11													GRR = {(EV ² + AV ²)} ^{1/2} Образцы K ₃ % GRR = 100 (GRR/TV)												
11. С 1 1908 1861 1874 1916 1861 1886 1868 1914 1866 1843 1880													GRR = 11,417 2 0,7071 % GRR = 48,37												
12, 2 1901 1864 1883 1921 1848 1896 1859 1918 1872 1837 1880													δ _{4M} = 11,2 3 0,5231												
13, 3 1894 1865 1868 1916 1850 1886 1873 1919 1881 1836 1879													Изменчивость образца (PV)												
14, Сред 1901 1863 1875 1918 1853 1889 1867 1917 1873 1839 X _с = 1879													PV = R _р x K ₃ 4 0,4467												
15, R 14 4 15 5 13 10 14 5 15 7 Γ _с = 10													PV = 20,659 5 0,4030 % PV = 100 (PV/TV)												
Образцы 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 X= 1891													PV = 0,3742 6 0,3742 % PV = 87,52												
Сред (Xр) 1912 1882 1894 1900 1849 1915 1870 1906 1898 1881 R _р = 66													7 0,3534												
17, (Γ _а + Γ _б + Γ _с) / (кол-во контролеров) = R= 10,333													Общая изменчивость (TV)												
18, (Max X - Min X) = X _{DIFF} = 18,567													TV = {(GRR ² + PV ²)} ^{1/2} 8 0,3375												
													TV = 23,604 9 0,3249 ndc = 1,41 (PV/GRR)												
													10 0,3146 ndc = 2,55128												

Рисунок 4.13 – Результаты анализа MSA и количественной оценки технологической неопределенности $\delta_{4M}(\sigma_B)$

ОТЧЕТ О СХОДИМОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ													ОТЧЕТ О СХОДИМОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ																																																																
ОТНОСИТЕЛЬНО ПОЛНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА													ОТНОСИТЕЛЬНО ПОЛНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА																																																																
Нормативные документы ГОСТ Р 53772-2010			Наименование средства измер. Разрывная машина LFM 250			Контролер А			№ чертежа ГОСТ Р 53772-2010			Наименование средства измер. Разрывная машина LFM 250			Контролер А																																																														
Наименование изделия Арматурный канат диам. 12,5 мм			Характеристика Разр. усилие, кН			Допуск 173 204			Контролер В			Наименование изделия Арматурный канат диам. 12,5 мм			Контролер В																																																														
						Контролер С			Характеристика Разр. усилие, кН			Контролер С																																																																	
			Повторений 3			Образцов 10			Контролеров 3			ДАТА			Повторений 3			Образцов 10			Контролеров 3			ДАТА																																																					
Контролер/ Повтор №													АНАЛИЗ ИЗМЕРЕНИЙ													% ОБЩ. ИЗМЕНЧИВОСТИ																																																			
Образцы													Средние													Сходимость-изменчивость оборудования (EV)																																																			
1													2													EV = R x K ₁													Повторы													K ₁													% EV = 100 (EV/TV)												
2													3													EV = 1,607													2													0,8862													% EV = 35,49												
3													4													EV = 1,607													3													0,5908																									
Сред													X _с = 173,0													Воспроизводимость-изменчивость контролера (AV)																																																			
R													Г _с = 2,1													AV = {(X _{DIFF} x K ₂) ² - (EV ² /nr)} ^{1/2}													% AV = 100 (AV/TV)																																						
1													174,5													AV = 0,8910													% AV = 19,68																																						
2													175,5													n = количество образцов													Контролеры													2													3												
3													173,8													r = количество повторений													K ₂													0,7071													0,5231												
Сред													X _с = 174,6													Сходимость и воспроизводимость (GRR)																																																			
R													Г _с = 3,0													GRR = {(EV ² + AV ²) ^{1/2}													Образцы													K ₃													% GRR = 100 (GRR/TV)												
1													175,8													GRR = 1,837													2													0,7071													% GRR = 40,58												
2													173,8													δ _{4M} = 1,8													3													0,5231																									
3													174,7													Изменчивость образца (PV)													4													0,4467																									
Сред													X _с = 174,7													PV = R _p x K ₃													5													0,4030													% PV = 100 (PV/TV)												
R													Г _с = 3,1													PV = 4,139													6													0,3742													% PV = 91,40												
Образцы													X = 174,1																										7													0,3534																									
Сред (Xp)													R _p = 13,2													Общая изменчивость (TV)													8													0,3375																									
17,													R = 2,720													TV = {(GRR ² + PV ²) ^{1/2}													9													0,3249													ndc = 1,41 (PV/GRR)												
18,													X _{DIFF} = 1,793													TV = 4,528													10													0,3146													ndc = 3,17589												

Рисунок 4.14 – Результаты анализа MSA и количественной оценки технологической неопределенности $\delta_{4M}(P)$

ОТЧЕТ О СХОДИМОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ПОЛНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА												ОТЧЕТ О СХОДИМОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ПОЛНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА											
Нормативные документы ГОСТ Р 53772-2010			Наименование средства измер. Разрывная машина LFM 250			Контролер А			№ чертежа ГОСТ Р 53772-2010			Наименование средства измер. Разрывная машина LFM 250			Контролер А								
Наименование изделия Арматурный канат диам. 12,5 мм			Характеристика Допуск Нагр. при усл.пр., кН 163,7			Контролер В			Наименование изделия Арматурный канат диам. 12,5 мм			Контролер В											
Характеристика Допуск Нагр. при усл.пр., кН 163,7						Контролер С			Характеристика Нагр. при усл.пр., кН			Контролер С											
			Повторений 3		Образцов 10		Контролеров 3		ДАТА			Повторений 3		Образцов 10		Контролеров 3		ДАТА					
Контролер/												АНАЛИЗ ИЗМЕРЕНИЙ								% ОБЩ. ИЗМЕНЧИВОСТИ			
Образцы												Сходимость-изменчивость оборудования (EV)											
Средние																							
Повтор №																							
1. А												EV = R x K ₁								Повторы K1 % EV = 100 (EV/TV)			
2.												EV = 1,317								2 0,8862 % EV = 29,29			
3.																				3 0,5908			
4. Сред												Воспроизводимость-изменчивость контролера (AV)											
5. R												AV = $\{(X_{DIFF} \times K_2)^2 - (EV^2/nr)\}^{1/2}$								% AV = 100 (AV/TV)			
6. В												AV = 1,4907								% AV = 33,14			
7.												n = количество образцов				Контролеры		2 3					
8.												r = количество повторений				K ₂		0,7071 0,5231					
9. Сред												Сходимость и воспроизводимость (GRR)											
10. R												GRR = $\{(EV^2 + AV^2)\}^{1/2}$								Образцы K ₃ % GRR = 100 (GRR/TV)			
11. С												GRR = 1,989								2 0,7071 % GRR = 44,23			
12.												δ _{4M} = 1,9								3 0,5231			
13.												Изменчивость образца (PV)								4 0,4467			
14. Сред												PV = R _p x K ₃								5 0,4030 % PV = 100 (PV/TV)			
15. R												PV = 4,034								6 0,3742 % PV = 89,69			
Образцы												X = 171,0								7 0,3534			
Сред (Xp)												R _p = 12,8								8 0,3375			
17.												(R _a + R _b + R _c) / (кол-во контролеров) = R = 2,230								9 0,3249 ndc = 1,41 (PV/GRR)			
18.												(Max X - Min X) = X _{DIFF} = 2,887								10 0,3146 ndc = 2,85891			

Рисунок 4.15 – Результаты анализа MSA и количественной оценки технологической неопределенности $\delta_{4M}(P_{\sigma 0,1})$

ОТЧЕТ О СХОДИМОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ПОЛНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА												ОТЧЕТ О СХОДИМОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ПОЛНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА												
Нормативные документы ГОСТ Р 53772-2010			Наименование средства измер. Разрывная машина LFM 250			Контролер А			№ чертёжа ГОСТ Р 53772-2010			Наименование средства измер. Разрывная машина LFM 250			Контролер А									
Наименование изделия Арматурный канат диам. 12,5 мм						Контролер В			Наименование изделия Арматурный канат диам. 12,5 мм						Контролер В									
Характеристика Усл. пр. тек., Н/мм ² 1760			Допуск			Контролер С			Характеристика Усл. пр. тек., Н/мм ²						Контролер С									
			Повторений 3			Образцов 10			Контролеров 3			ДАТА												
												Повторений 3			Образцов 10			Контролеров 3			ДАТА			
Контролер/		Образцы										Средние		АНАЛИЗ ИЗМЕРЕНИЙ						% ОБЩ. ИЗМЕНЧИВОСТИ				
Повтор №		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			Сходимость-изменчивость оборудования (EV)										
1. А		1	1897	1899	1896	1900	1916	1850	1937	1915	1859	1878	1895		EV = R x K ₁		Повторы		K ₁		% EV = 100 (EV/TV)			
2,		2	1898	1888	1907	1893	1926	1841	1929	1925	1857	1880	1894		EV = 5,298		2		0,8862		% EV = 23,47			
3,		3	1899	1886	1903	1900	1919	1844	1940	1924	1861	1873	1895				3		0,5908					
4,		Сред	1898	1891	1902	1898	1920	1845	1935	1921	1859	1877	x _в = 1895		Воспроизводимость-изменчивость контролера (AV)									
5,		R	2	13	11	7	10	9	11	10	4	7	Г _в = 8		AV = $\{(X_{DIFF} \times K_2)^2 - (EV^2/nr)\}^{1/2}$						% AV = 100 (AV/TV)			
6. В		1	1911	1889	1917	1867	1909	1831	1857	1921	1873	1897	1887		AV = 7,5933						% AV = 33,64			
7,		2	1907	1897	1906	1850	1907	1838	1870	1914	1879	1905	1887		n = количество образцов		Контролеры		2 3					
8,		3	1917	1887	1910	1857	1899	1832	1860	1907	1875	1903	1885		g = количество повторений		K ₂		0,7071 0,5231					
9,		Сред	1912	1891	1911	1858	1905	1834	1862	1914	1876	1902	x _в = 1886		Сходимость и воспроизводимость (GRR)									
10,		R	10	10	11	17	10	7	13	14	6	8	Г _в = 11		GRR = $\{(EV^2 + AV^2)\}^{1/2}$		Образцы		K ₃		% GRR = 100 (GRR/TV)			
11. С		1	1944	1885	1944	1868	1836	1897	1904	1928	1876	1927	1901		GRR = 9,259		2		0,7071		% GRR = 41,01			
12,		2	1951	1891	1952	1851	1844	1893	1896	1932	1872	1927	1901		δ _{4M} = 9,1		3		0,5231					
13,		3	1945	1889	1952	1866	1835	1890	1900	1939	1870	1927	1901		Изменчивость образца (PV)									
14,		Сред	1947	1888	1949	1862	1838	1893	1900	1933	1873	1927	x _в = 1901		PV = R _p x K ₃		4		0,4467		% PV = 100 (PV/TV)			
15,		R	7	6	8	17	9	7	8	11	6	0	Г _с = 8		PV = 20,589		5		0,4030		% PV = 91,20			
Образцы		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	X= 1894				7		0,3534						
Сред (Xp)		1919	1890	1921	1872	1888	1857	1899	1923	1869	1902	R _p = 65		Общая изменчивость (TV)										
17,		(Г _а + Г _в + Г _с) / (кол-во контролеров) =						R= 8,987						TV = $\{(GRR^2 + PV^2)\}^{1/2}$		9		0,3249		ndc = 1,41 (PV/GRR)				
18,		(Max X - Min X) = X _{DIFF} =						14,633						TV = 22,575		10		0,3146		ndc = 3,13547				

Рисунок 4.16 – Результаты анализа MSA и количественной оценки технологической неопределенности $\delta_{4M}(\sigma_{0,1})$

ОТЧЕТ О СХОДИМОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ПОЛНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА													ОТЧЕТ О СХОДИМОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ПОЛНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА																							
Нормативные документы ГОСТ Р 53772-2010			Наименование средства измер. Разрывная машина LFM 250			Контролер А			Контролер В			Контролер С			№ чертежа ГОСТ Р 53772-2010		Наименование средства измер. Разрывная машина LFM 250		Контролер А		Контролер В		Контролер С													
Наименование изделия Арматурный канат диам. 12,5 мм			Характеристика Отн. удл., %			Допуск 4,4			Повторений 3			Образцов 10			Контролеров 3			ДАТА			Наименование изделия Арматурный канат диам. 12,5 мм		Характеристика Отн. удл., %		Повторений 3			Образцов 10			Контролеров 3			ДАТА		
Контролер/													АНАЛИЗ ИЗМЕРЕНИЙ													% ОБЩ. ИЗМЕНЧИВОСТИ										
Повтор №													Сходимость-изменчивость оборудования (EV)																							
Образцы													Средние																							
1													2													Повторы				K1						
2													3													2				0,8862						
3													4													3				0,5908						
4, Сред													5													Воспроизводимость-изменчивость контролера (AV)										
5, R													6													AV = $\{(X_{DIFF} \times K_2)^2 - (EV^2/nr)\}^{1/2}$				% AV = 100 (AV/TV)						
6, B 1													7													AV = 0,0177				% AV = 13,32						
7, 2													8													n = количество образцов				Контролеры 2 3						
8, 3													9													g = количество повторений				K2 0,7071 0,5231						
9, Сред													10													Сходимость и воспроизводимость (GRR)										
10, R													11													GRR = $\{(EV^2 + AV^2)\}^{1/2}$				Образцы K3						
11, C 1													12													GRR = 0,064				2 0,7071						
12, 2													13													$\delta_{4M} = 0,06$				3 0,5231						
13, 3													14													Изменчивость образца (PV)										
14, Сред													15													PV = $R_p \times K_3$				5 0,4030						
15, R													16													PV = 0,117				6 0,3742						
Образцы 1													17																	7 0,3534						
Сред (Xp)													18													Общая изменчивость (TV)										
17, $(\Gamma_a + \Gamma_b + \Gamma_c) / (\text{кол-во контролеров}) = R = 0,103$													18, $(\text{Max X} - \text{Min X}) = X_{DIFF} = 0,040$													TV = $\{(GRR^2 + PV^2)\}^{1/2}$				9 0,3249						
																										TV = 0,133				10 0,3146						
																										ndc = 1,41 (PV/GRR)										
																										ndc = 2,58976										

Рисунок 4.17 – Результаты анализа MSA и количественной оценки технологической неопределенности $\delta_{4M} (\delta_{max})$

ОТЧЕТ О СХОДИМОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ												ОТЧЕТ О СХОДИМОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ											
ОТНОСИТЕЛЬНО ПОЛНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА												ОТНОСИТЕЛЬНО ПОЛНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА											
Нормативные документы ГОСТ Р 53772-2010			Наименование средства измер. Разрывная машина LFZ-400			Контролер А			№ чертежа ГОСТ Р 53772-2010			Наименование средства измер. Разрывная машина LFZ-400			Контролер А								
Наименование изделия Арматурный канат диам. 12,5 мм						Контролер В			Наименование изделия Арматурный канат диам. 12,5 мм						Контролер В								
Характеристика Потери от релакс., %			Допуск 2,5			Контролер С			Характеристика Потери от релакс., %						Контролер С								
			Повторений 3			Образцов 10			Контролеров 3			ДАТА											
												Повторений 3			Образцов 10			Контролеров 3			ДАТА		
Контролер/												АНАЛИЗ ИЗМЕРЕНИЙ											
Повтор №												% ОБЩ. ИЗМЕНЧИВОСТИ											
Образцы												Сходимость-изменчивость оборудования (EV)											
Средние												Сходимость-изменчивость контролера (AV)											
1. А 1 2,33 2,24 2,35 2,48 2,45 2,47 2,27 2,32 2,63 2,52 2,41												EV = R x K ₁ Повторы K1 % EV = 100 (EV/TV)											
2, 2 2,34 2,25 2,38 2,48 2,42 2,43 2,19 2,41 2,56 2,57 2,40												EV = 0,026 2 0,8862 % EV = 42,37											
3, 3 2,28 2,22 2,39 2,42 2,44 2,44 2,24 2,38 2,56 2,55 2,39												3 0,5908											
4, Сред 2,32 2,24 2,37 2,46 2,44 2,45 2,23 2,37 2,58 2,55 X ₀ = 2,40												Воспроизводимость-изменчивость контролера (AV)											
5, R 0,06 0,03 0,04 0,06 0,03 0,04 0,08 0,09 0,07 0,05 Γ ₃ = 0,06												AV = {(X _{DIFF} x K ₂) ² - (EV ² /nr)} ^{1/2} % AV = 100 (AV/TV)											
6. В 1 2,25 2,33 2,45 2,23 2,48 2,25 2,51 2,59 2,45 2,52 2,41												AV = 0,0097 % AV = 15,54											
7, 2 2,31 2,35 2,40 2,24 2,52 2,25 2,54 2,60 2,44 2,55 2,42												n = количество образцов Контролеры 2 3											
8, 3 2,26 2,35 2,45 2,25 2,47 2,26 2,50 2,61 2,46 2,60 2,42												г = количество повторений K ₂ 0,7071 0,5231											
9, Сред 2,27 2,34 2,43 2,24 2,49 2,25 2,52 2,60 2,45 2,56 X ₀ = 2,42												Сходимость и воспроизводимость (GRR)											
10, R 0,06 0,02 0,05 0,02 0,05 0,01 0,04 0,02 0,02 0,08 Γ ₃ = 0,04												GRR = {(EV ² + AV ²)} ^{1/2} Образцы K ₃ % GRR = 100 (GRR/TV)											
11. С 1 2,55 2,36 2,37 2,41 2,45 2,31 2,42 2,40 2,38 2,30 2,40												GRR = 0,028 2 0,7071 % GRR = 45,13											
12, 2 2,58 2,31 2,38 2,39 2,44 2,28 2,46 2,45 2,40 2,27 2,40												δ _{4M} = 0,03 3 0,5231											
13, 3 2,56 2,30 2,42 2,40 2,46 2,24 2,43 2,40 2,42 2,31 2,39												Изменчивость образца (PV) 4 0,4467											
14, Сред 2,56 2,32 2,39 2,40 2,45 2,28 2,44 2,42 2,40 2,29 X ₀ = 2,40												PV = R _p x K ₃ 5 0,4030 % PV = 100 (PV/TV)											
15, R 0,03 0,06 0,05 0,02 0,02 0,07 0,04 0,05 0,04 0,04 Γ ₃ = 0,04												PV = 0,056 6 0,3742 % PV = 89,24											
Образцы 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 X= 2,40												7 0,3534											
Сред (X _p) 2,38 2,30 2,40 2,37 2,46 2,33 2,40 2,46 2,48 2,47 R _p = 0,18												Общая изменчивость (TV) 8 0,3375											
17, (Γ ₃ + Γ ₀ + Γ _c) / (кол-во контролеров) = R= 0,045												TV = {(GRR ² + PV ²)} ^{1/2} 9 0,3249 ndc = 1,41 (PV/GRR)											
18, (Max x - Min x) = X _{DIFF} = 0,021												TV = 0,062 10 0,3146 ndc = 2,78809											

Рисунок 4.18 – Результаты анализа MSA и количественной оценки технологической неопределенности $\delta_{4M}(\Delta P_r)$

В таблице 4.7 приведены значения технологической неопределенности для параметров управления процессом. В таблице 4.8 представлены зависимости для расчета технологической неопределенности механических свойств стабилизированных арматурных канатов.

Таблица 4.7 – Технологическая неопределенность параметров управления

Параметр управления	Возмущающий фактор	Технологическая неопределенность
Скорость обработки V , м/мин	ξ_{1M}^v	0,4
	ξ_{2M}^v	0,1
	ξ_{3M}^v	0
	ξ_{4M}^v	0,6
	ξ^v	0,7
Температура нагрева T , °C	ξ_{1M}^T	2,3
	ξ_{2M}^T	1,4
	ξ_{3M}^T	0
	ξ_{4M}^T	2,4
	ξ^T	3,6

Таблица 4.8 – Технологическая неопределенность механических свойств стабилизированных арматурных канатов

Показатель качества	Возмущающий фактор	Технологическая неопределенность
Временное сопротивление σ_B , Н/мм ²	$\xi_{3M}^{\sigma_B}$	$\delta_{3M}(\sigma_B) = 120,4 + 0,0040944V - 0,3272T$
	$\xi_{4M}^{\sigma_B}$	$\delta_{4M}(\sigma_B) = 11,2$
Разрывное усилие P , Н	ξ_{3M}^P	$\delta_{3M}(P) = 13,4 + 0,006211V - 0,0366T$
	ξ_{4M}^P	$\delta_{4M}(P) = 1,8$

Продолжение таблицы 4.8

Нагрузка при условном пределе текучести $P_{\sigma 0,1}$, Н	$\xi_{3M}^{P_{\sigma}}$	$\delta_{3M}(P_{\sigma}) = 13,7 + 0,006939V - 0,0373T$
	$\xi_{4M}^{P_{\sigma}}$	$\delta_{4M}(P_{\sigma}) = 1,9$
Условный предел текучести $\sigma_{0,1}$, Н/мм ²	$\xi_{3M}^{\sigma_{0,1}}$	$\delta_{3M}(\sigma_{0,1}) = 135,5 + 0,0062917V - 0,3695T$
	$\xi_{4M}^{\sigma_{0,1}}$	$\delta_{4M}(\sigma_{0,1}) = 9,1$
Полное относительное удлинение δ_{\max} , %	$\xi_{3M}^{\delta_{\max}}$	$\delta_{3M}(\delta_{\max}) = -0,83 + 0,009802V + 0,00435T$
	$\xi_{4M}^{\delta_{\max}}$	$\delta_{4M}(\delta_{\max}) = 0,06$
Потери напряжения от релаксации ΔP_r , %	$\xi_{3M}^{\Delta P_r}$	$\delta_{3M}(\Delta P_r) = -1,89 + 0,00131V + 0,00505T$
	$\xi_{4M}^{\Delta P_r}$	$\delta_{4M}(\Delta P_r) = 0,03$

Таким образом, установлено, что на механические показатели качества стабилизированных арматурных канатов оказывают влияние возмущающие факторы категорий 3М и 4М.

4.4 Оценивание робастности технологии производства стабилизированных арматурных канатов

Процедура количественной оценки робастности по временному сопротивлению проведена в соответствии с разработанной методикой (см. п. 2.4). Результаты оценки представлены в таблицах 4.9 и 4.10. Графическая интерпретация результатов эксперимента представлена на рисунках 4.19-4.20.

Таблица 4.9 – Матрица планирования эксперимента (для временного сопротивления)

№ эксперимента	Уровень		Значение отклика, Н/мм ²	Технологическая неопределенность, Н/мм ²	Показатель η_{3M} , дБ
	для скорости обработки V	для температуры нагрева T			
1	1	1	1884	4,7	26,04
2	1	2	1894	1,9	30,09
3	1	3	1868	8,4	23,47
4	2	1	1885	5,1	25,68
5	2	2	1893	1,4	31,17
6	2	3	1866	8,0	23,68
7	3	1	1895	5,5	25,37
8	3	2	1902	1,0	32,63
9	3	3	1873	7,6	23,93

Таблица 4.10 – Средние значения показателей эксперимента (для временного сопротивления)

Параметр управления	Уровень	$\overline{\eta_{3M}}$, дБ	$\Delta\overline{\eta_{3M}}$, дБ	\bar{y} , Н/мм ²	$\Delta\bar{y}$, Н/мм ²
Скорость обработки V	1	26,53	0,78	1882	9
	2	26,84		1881	
	3	27,31		1890	
Температура нагрева T	1	25,70	7,61	1888	27
	2	31,30		1896	
	3	23,69		1869	

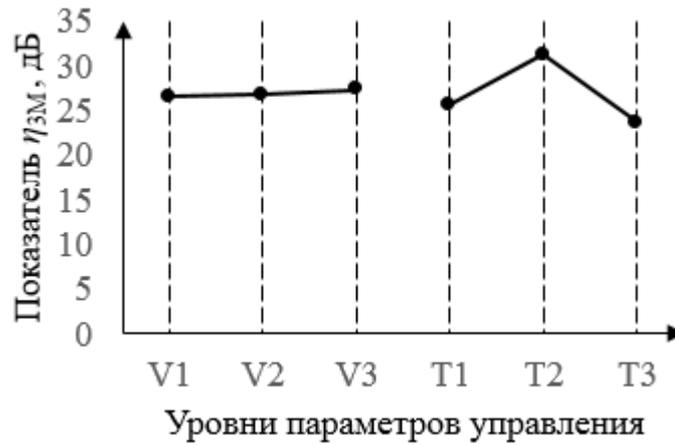


Рисунок 4.19 – Диаграмма эффектов параметров управления по показателю $\eta_{ЗМ}$ (для временного сопротивления)



Рисунок 4.20 – Диаграмма эффектов параметров управления по временному сопротивлению $\sigma_{в}$

Результаты оценки робастности по разрывному усилию представлены в таблицах 4.11 и 4.12. Графическая интерпретация результатов эксперимента представлена на рисунках 4.21-4.22.

Таблица 4.11 – Матрица планирования эксперимента (для разрывного усилия)

№ эксперимента	Уровень		Значение отклика, кН	Технологическая неопределенность, кН	Показатель $\eta_{зм}$, дБ
	для скорости обработки V	для температуры нагрева T			
1	1	1	175,3	0,5	25,06
2	1	2	176,6	0,2	29,88
3	1	3	173,9	0,9	22,81
4	2	1	175,4	0,6	24,59
5	2	2	176,5	0,1	31,70
6	2	3	173,6	0,8	23,11
7	3	1	176,6	0,7	24,20
8	3	2	177,6	0,1	34,94
9	3	3	174,6	0,8	23,47

Таблица 4.12 – Средние значения показателей эксперимента (для разрывного усилия)

Параметр управления	Уровень	$\bar{\eta}_{зм}$, дБ	$\Delta\bar{\eta}_{зм}$, дБ	\bar{y} , Н	$\Delta\bar{y}$, Н
Скорость обработки V	1	25,92	1,61	175,2	1,1
	2	26,47		175,2	
	3	27,53		176,3	
Температура нагрева T	1	24,61	9,04	175,8	2,9
	2	32,17		176,9	
	3	23,13		174,0	

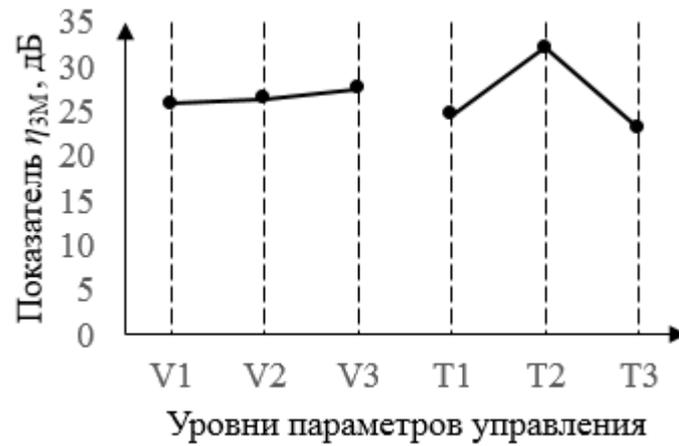


Рисунок 4.21 – Диаграмма эффектов параметров управления по показателю $\eta_{ЗМ}$ (для разрывного усилия)



Рисунок 4.22 – Диаграмма эффектов параметров управления по разрывному усилию P

Результаты оценки робастности для нагрузки при условном пределе текучести представлены в таблицах 4.13 и 4.14. Графическая интерпретация результатов эксперимента представлена на рисунках 4.23-4.24.

Таблица 4.13 – Матрица планирования эксперимента (для нагрузки при условном пределе текучести)

№ эксперимента	Уровень		Значение отклика, кН	Технологическая неопределенность, кН	Показатель η_{3M} , дБ
	для скорости обработки V	для температуры нагрева T			
1	1	1	167,2	0,60	24,50
2	1	2	168,8	0,20	30,45
3	1	3	166,2	0,90	22,67
4	2	1	167,2	0,70	24,01
5	2	2	168,6	0,10	33,09
6	2	3	165,9	0,80	23,01
7	3	1	168,4	0,70	23,61
8	3	2	169,6	0,01	41,06
9	3	3	166,8	0,80	23,42

Таблица 4.14 – Средние значения показателей эксперимента (для нагрузки при условном пределе текучести)

Параметр управления	Уровень	$\overline{\eta_{3M}}$, дБ	$\Delta\overline{\eta_{3M}}$, дБ	\bar{y} , кН	$\Delta\bar{y}$, кН
Скорость обработки V	1	25,87	3,50	167,4	1,1
	2	26,71		167,2	
	3	29,37		168,3	
Температура нагрева T	1	24,04	11,83	167,6	2,7
	2	34,87		169,0	
	3	23,04		166,3	



Рисунок 4.23 – Диаграмма эффектов параметров управления по показателю η_{3M} для нагрузки при условном пределе текучести

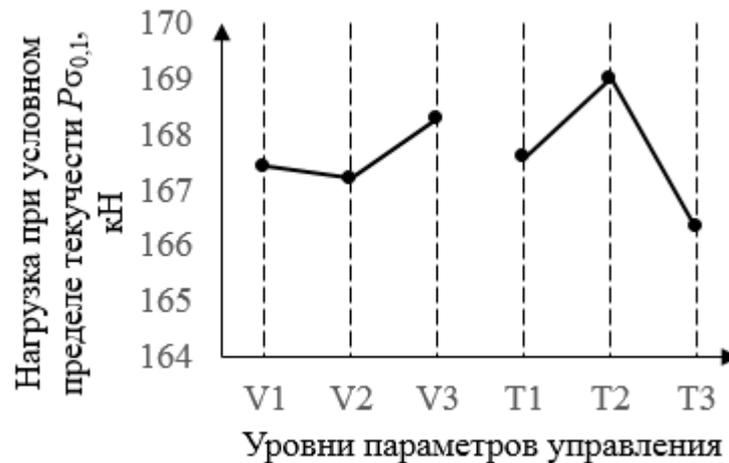


Рисунок 4.24 – Диаграмма эффектов параметров управления по нагрузке при условном пределе текучести $P_{\sigma_{0,1}}$

Результаты оценки робастности для условного предела текучести представлены в таблицах 4.15 и 4.16. Графическая интерпретация результатов эксперимента представлена на рисунках 4.25-4.26.

Таблица 4.15 – Матрица планирования эксперимента (для условного предела текучести)

№ эксперимента	Уровень		Значение отклика, Н/мм ²	Технологическая неопределенность, Н/мм ²	Показатель η_{3M} , дБ
	для скорости обработки V	для температуры нагрева T			
1	1	1	1785	5,6	25,05
2	1	2	1798	1,8	29,98
3	1	3	1770	9,2	22,84
4	2	1	1785	6,2	24,58
5	2	2	1797	1,2	31,84
6	2	3	1768	8,6	23,15
7	3	1	1798	6,8	24,20
8	3	2	1808	0,5	35,19
9	3	3	1778	7,9	23,50

Таблица 4.16 – Средние значения показателей эксперимента (для условного предела текучести)

Параметр управления	Уровень	$\bar{\eta}_{3M}$, дБ	$\Delta\bar{\eta}_{3M}$, дБ	\bar{y} , Н/мм ²	$\Delta\bar{y}$, Н/мм ²
Скорость обработки V	1	25,96	1,67	1784	11
	2	26,52		1783	
	3	27,63		1795	
Температура нагрева T	1	24,61	9,18	1789	29
	2	32,34		1801	
	3	23,16		1772	



Рисунок 4.25 – Диаграмма эффектов параметров управления по показателю $\eta_{ЗМ}$ (для условного предела текучести)

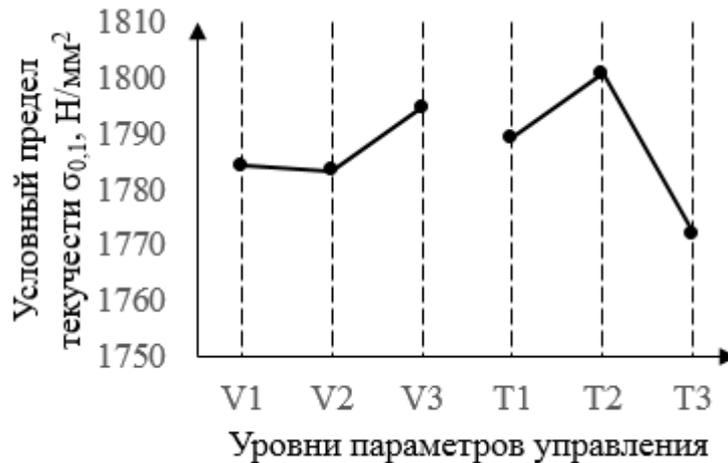


Рисунок 4.26 – Диаграмма эффектов параметров управления по условному пределу текучести $\sigma_{0,1}$

Результаты оценки робастности для относительного удлинения представлены в таблицах 4.17 и 4.18. Графическая интерпретация результатов эксперимента представлена на рисунках 4.27-4.28.

Таблица 4.17 – Матрица планирования эксперимента (для относительного удлинения)

№ эксперимента	Уровень		Значение отклика, %	Технологическая неопределенность, %	Показатель η_{3M} , дБ
	для скорости обработки V	для температуры нагрева T			
1	1	1	4,94	0,063	18,94
2	1	2	4,75	0,020	23,65
3	1	3	4,77	0,022	23,34
4	2	1	4,74	0,063	18,75
5	2	2	4,61	0,021	23,49
6	2	3	4,68	0,022	23,30
7	3	1	4,40	0,063	18,42
8	3	2	4,32	0,021	23,18
9	3	3	4,46	0,022	23,11

Таблица 4.18 – Средние значения показателей эксперимента (для относительного удлинения)

Параметр управления	Уровень	$\overline{\eta_{3M}}$, дБ	$\Delta\overline{\eta_{3M}}$, дБ	\bar{y} , %	$\Delta\bar{y}$, %
Скорость обработки V	1	21,98	0,41	4,82	0,42
	2	21,84		4,68	
	3	21,57		4,39	
Температура нагрева T	1	18,70	4,74	4,70	0,14
	2	23,44		4,56	
	3	23,25		4,64	

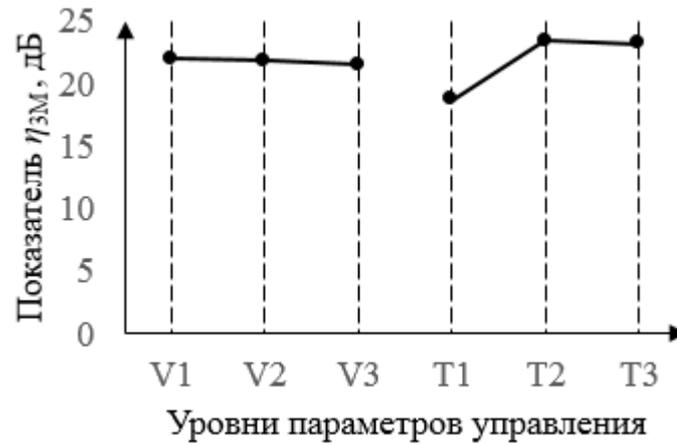


Рисунок 4.27 – Диаграмма эффектов параметров управления по показателю $\eta_{ЗМ}$ (для относительного удлинения)

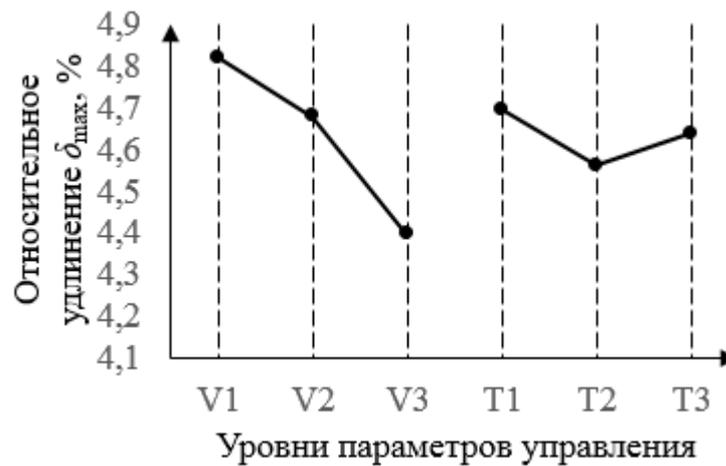


Рисунок 4.28 – Диаграмма эффектов параметров управления по относительному удлинению δ_{\max} ,

Результаты оценки робастности для потерь напряжения от релаксации представлены в таблицах 4.19 и 4.20. Графическая интерпретация результатов эксперимента представлена на рисунках 4.29-4.30.

Таблица 4.19 – Матрица планирования эксперимента (для потерь напряжения от релаксации)

№ эксперимента	Уровень		Значение отклика, %	Технологическая неопределенность, %	Показатель $\eta_{зм}$, дБ
	для скорости обработки V	для температуры нагрева T			
1	1	1	2,35	0,09	14,19
2	1	2	2,08	0,01	24,96
3	1	3	2,35	0,10	13,59
4	2	1	2,53	0,08	15,22
5	2	2	2,27	0,02	20,54
6	2	3	2,53	0,12	13,38
7	3	1	2,90	0,06	16,64
8	3	2	2,63	0,03	18,97
9	3	3	2,90	0,13	13,50

Таблица 4.20 – Средние значения показателей эксперимента (для потерь напряжения от релаксации)

Параметр управления	Уровень	$\bar{\eta}_{зм}$, дБ	$\Delta\bar{\eta}_{зм}$, дБ	\bar{y} , %	$\Delta\bar{y}$, %
Скорость обработки V	1	17,58	1,21	2,26	0,55
	2	16,38		2,44	
	3	16,37		2,81	
Температура нагрева T	1	15,35	8,00	2,59	0,26
	2	21,49		2,33	
	3	13,49		2,59	



Рисунок 4.29 – Диаграмма эффектов параметров управления по показателю $\eta_{ЗМ}$ (для потерь напряжения от релаксации)

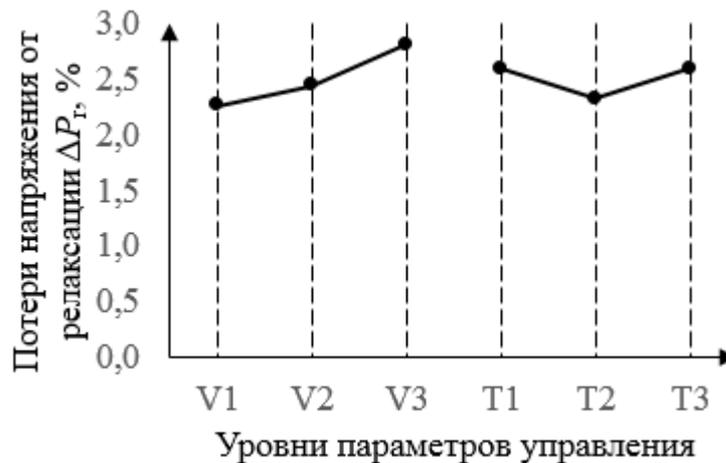


Рисунок 4.30 – Диаграмма эффектов параметров управления по потерям напряжения от релаксации ΔP_r

По результатам проведенных экспериментов можно сделать вывод, что на механические свойства стабилизированных арматурных канатов значительное влияние оказывает температура нагрева в индукционной печи.

Для получения обобщенной оценки робастности (показателя технологической устойчивости θ) необходимо оценить значимость каждого единич-

ного показателя качества продукции. Результаты оценки, выполненные по методике, изложенной в п. 2.4.2, представлены в таблице 4.21.

Таблица 4.21 – Результаты ранжирования показателей механических свойств стабилизированного арматурного каната

Показатель качества	Ранг	Коэффициент значимости
Временное сопротивление σ_B , Н/мм ²	7	0,17
Разрывное усилие P , Н	7	0,17
Нагрузка при условном пределе текучести $P_{\sigma_{0,1}}$, Н	6	0,14
Условный предел текучести $\sigma_{0,1}$, Н/мм ²	6	0,14
Полное относительное удлинение δ_{max} , %	8	0,19
Потери напряжения от релаксации ΔP_r , %	8	0,19

В таблице 4.22 приведены результаты расчета показателя технологической устойчивости, полученные при различных комбинациях параметров управления. На рисунке 4.31 представлена зависимость показателя технологической устойчивости процесса θ от параметров управления процессом.

На первом этапе оптимизации необходимо выбрать оптимальный режим, обеспечивающий наибольшее значение показателя технологической устойчивости процесса θ для стабилизированных арматурных канатов.

Таблица 4.22 – Результаты расчета показателя технологической устойчивости процесса

№ эксперимента	$\eta_{3M}(\sigma_B)$, дБ	$\eta_{3M}(P)$, дБ	$\eta_{3M}(P_{\sigma_{0,1}})$, дБ	$\eta_{3M}(\sigma_{0,1})$, дБ	$\eta_{3M}(\delta_{max})$, дБ	$\eta_{3M}(\Delta P_r)$, дБ	Показатель θ , дБ
1	26,04	25,06	24,50	25,05	18,94	14,19	21,96
2	30,09	29,88	30,45	29,98	23,65	24,96	27,69
3	23,47	22,81	22,67	22,84	23,34	13,59	21,19
4	25,68	24,59	24,01	24,58	18,75	15,22	21,84
5	31,17	31,70	33,09	31,84	23,49	20,54	27,86
6	23,68	23,11	23,01	23,15	23,30	13,38	21,32
7	25,37	24,20	23,61	24,20	18,42	16,64	21,82
8	32,63	34,94	41,06	35,19	23,18	18,97	29,69
9	23,93	23,47	23,42	23,50	23,11	13,50	21,51

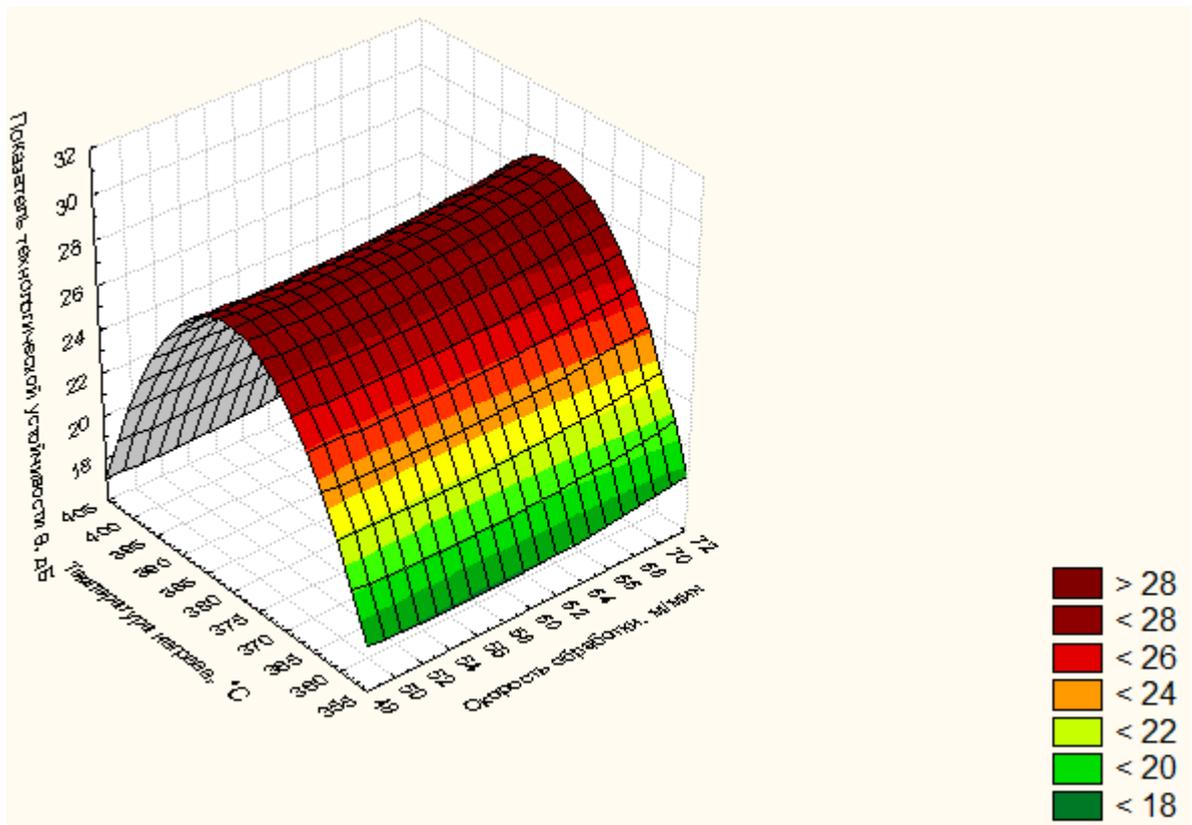


Рисунок 4.31 – Зависимость показателя технологической устойчивости процесса θ от параметров управления

В таблице 4.23 приведены средние значения показателя технологической устойчивости процесса при различных уровнях параметров управления. На рисунке 4.32 приведена диаграмма эффектов параметров управления по показателю технологической устойчивости процесса.

Таблица 4.23 – Средние значения показателя технологической устойчивости процесса

Параметр управления	Уровень	$\bar{\theta}$, дБ	$\Delta\bar{\theta}$, дБ
Скорость обработки V	1	23,6	0,7
	2	23,7	
	3	24,3	
Температура нагрева T	1	21,9	7,1
	2	28,4	
	3	21,3	

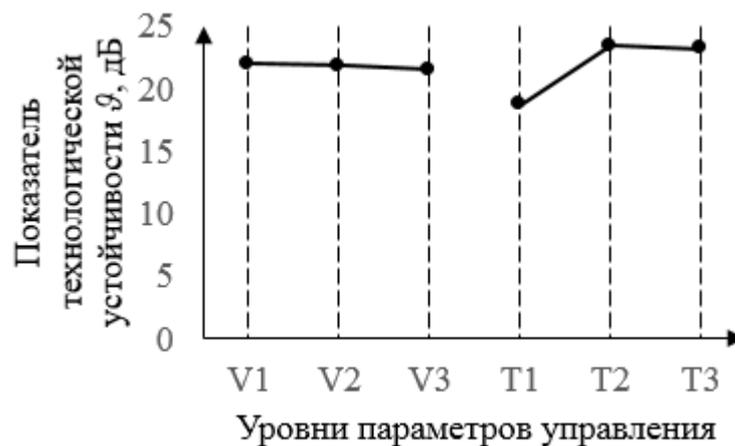


Рисунок 4.32 – Диаграмма эффектов параметров управления по показателю технологической устойчивости

Результаты расчетов (см. таблицу 4.22) показали, что максимальное значение показателя технологической устойчивости процесса $\theta = 30,18$ дБ достигается в эксперименте № 8 при комбинации параметров управления (V3T2). Область устойчивости процесса определяется границами [28,67; 30,18]. В данную область попадает только эксперимент № 8 с комбинацией параметров управления (V3T2). Однако, его нельзя признать оптимальным, т.к. при данной комбинации параметров значение потерь напряжения от релаксации, равное 2,63 % (см. таблицу 4.19), превышает требования, установленные ГОСТ Р 53772-2010 (см. таблицу 4.1).

Выбираем следующий эксперимент по величине показателя технологической устойчивости процесса – это эксперимент № 2 с комбинацией параметров управления (V1T2), при котором $\theta = 27,89$.

Таким образом, установлен оптимальный технологический режим для стальных семипроволочных стабилизированных канатов диаметром 12,5 мм, применяемых в качестве напрягаемой арматуры предварительно напряженных железобетонных конструкций (таблица 4.24).

Таблица 4.24 – Оптимальный технологический режим для производства стабилизированных арматурных канатов диаметром 12,5 мм по ГОСТ Р 53772-2010

Параметр управления	Значение
Скорость обработки V , м/мин	50
Температура нагрева T , °С	380

В соответствии с разработанной методикой (см. п. 2.4.4) проведена оценка соответствия показателей качества, получаемых при оптимальном технологическом режиме, требованиям потребителя (таблица 4.25).

Таблица 4.25 – Оценка соответствия показателей качества требованиям потребителя

Показатель качества	Возмущающий фактор	Технологическая неопределенность	Вклад, %	Фактический допуск	Требуемый допуск	Оценка соответствия требованиям	Мероприятие по снижению технологической неопределенности
Временное сопротивление разрыву σ_B , Н/мм ²	$\xi_{3M}^{\sigma_B}$	1,9	2,8	[1882,7; 1905,4]	Не менее 1860	Соответствует	Не требуется
	$\xi_{4M}^{\sigma_B}$	11,2	97,2				
	$\xi_{\Sigma}^{\sigma_B}$	11,4	-				
Разрывное усилие P , кН	ξ_{3M}^P	0,2	1,2	[174,8; 178,4]	173-204	Соответствует	Не требуется
	ξ_{4M}^P	1,8	98,8				
	ξ_{Σ}^P	1,8	-				
Нагрузка при условном пределе текучести $P_{\sigma 0,1}$, кН	$\xi_{3M}^{P_{\sigma 0,1}}$	0,2	1,1	[166,9; 170,7]	Не менее 163,7	Соответствует	Не требуется
	$\xi_{4M}^{P_{\sigma}}$	1,9	98,9				
	$\xi_{\Sigma}^{P_{\sigma}}$	1,9	-				
Условный предел текучести, $\sigma_{0,1}$, Н/мм ²	$\xi_{3M}^{\sigma_{0,1}}$	1,8	3,8	[1788,3; 1806,9]	Не менее 1760	Соответствует	Не требуется
	$\xi_{4M}^{\sigma_{0,1}}$	9,1	96,2				
	$\xi_{\Sigma}^{\sigma_{0,1}}$	9,3	-				
Относительное удлинение при разрыве δ_{max} , %	$\xi_{3M}^{\delta_{max}}$	0,02	10,0	[4,69; 4,81]	Не менее 4,4	Соответствует	Не требуется
	$\xi_{4M}^{\delta_{max}}$	0,06	90,0				
	$\xi_{\Sigma}^{\delta_{max}}$	0,06	-				
Потери напряжения от релаксации ΔP_r , %	$\xi_{3M}^{\Delta P_r}$	0,09	90,0	[2,05; 2,11]	Не более 2,5	Соответствует	Не требуется
	$\xi_{4M}^{\Delta P_r}$	0,03	10,0				
	$\xi_{\Sigma}^{\Delta P_r}$	0,09	-				

С целью подтверждения результатов оптимизации проведен контрольный эксперимент (см. п. 2.4.5), результаты которого представлены в таблице 4.26.

Таблица 4.26 – 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
Показатели качества	Временное сопротивление разрыву 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
	Относительное удлинение при разрыве 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

Результаты контрольного эксперимента подтверждают повышение показателя технологической устойчивости процесса и улучшение показателей качества стабилизированного арматурного каната.

4.5 Реализация усовершенствованной технологии производства стабилизированных арматурных канатов

Разработанные технологические режимы производства стабилизированных арматурных канатов диаметром 12,5 мм были опробованы в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ».

Для изготовления стабилизированных арматурных канатов в качестве исходного материала использовали проволоку-заготовку диаметром 4,1 и 4,3 мм с временным сопротивлением не менее $\sigma_b=1915 \text{ Н/мм}^2$.

Свивка арматурного каната конструкции 1x7 (1 + 6) осуществлялась на канатовьющих машинах фирмы SKET 6x400, 6x600 и шагом свивки 175-200 мм, с преформированием проволоки и глубокой рихтовкой в двух взаимоперпендикулярных плоскостях трехроликовым рихтующим устройством.

С целью снятия внутренних напряжений, возникающих в канате в результате волочения и последующей свивки проволоки, проводился отпуск каната. Отпуск осуществлялся в индукторе (индукционной печи) при температуре нагрева 380 °С со скоростью обработки 50 м/мин с одновременным воздействием растягивающих напряжений величиной 40-50 % от разрывного усилия.

Натяжение в канате обеспечивалось за счёт рассогласования скоростей вращения двух пар тянущих кабестанов, создающих заданное контролируемое натяжение каната при его прохождении через индукционную печь и устройство водяного охлаждения.

После нагрева в индукционной печи канат поступал в бак охлаждения, состоящий из отдельных секций. В первых секциях канат охлаждался водой, в последней секции производилась сушка сжатым воздухом.

Опытно-промышленная проверка показала, что разработанный комплекс управляющих воздействий обеспечивает полное соответствие показателей качества стабилизированных арматурных канатов требованиям стандарта ГОСТ Р 53772-2010 (см. таблицу 4.27).

Таблица 4.27 –Механические свойства арматурного каната диаметром 12,5 мм по ГОСТ Р 53772-2010, произведенного по усовершенствованной промышленной технологии

Характеристика	Значение
Временное сопротивление, Н/мм ²	1896
Разрывное усилие, кН	177
Нагрузка при условном пределе текучести $\sigma_{0,1}$, кН	167
Условный предел текучести $\sigma_{0,1}$, Н/мм ²	1803
Полное относительное удлинение при максимальной нагрузке δ_{max} , %	4,8
Потери напряжения от релаксации в канате при начальной нагрузке 0,7 от фактического разрывного усилия после 1000 часов выдержки под напряжением при температуре (20±1)°С ΔP_r	2,1

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» (Приложение А).

4.6 Выводы по главе

1. Получены математические модели, описывающие взаимосвязь параметров управления механотермической обработкой с механическими свойствами стабилизированных арматурных канатов диаметром 12,5 мм, позволяющие определять температурно-скоростные режимы обработки, обеспечивающие формирование заданного комплекса потребительских свойств готовой продукции.

2. Проведена процедура идентификации возмущающих факторов, вызывающих вариабельность механических свойств стабилизированных арматурных канатов. Проведены экспериментальные исследования и получены зависимости технологической неопределенности показателей качества арматурных канатов. Получена количественная оценка технологической неопределенности температуры нагрева и скорости обработки стабилизированных арматурных канатов.

3. 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.

4. Разработана и внедрена в ОАО «ММК-МЕТИЗ» усовершенствованная технология производства стабилизированных арматурных канатов, обеспечивающая повышение эффективности процесса по показателю технологической устойчивости и уровню показателей качества готовой продукции. Разработана и внедрена в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ» технологическая карта КП.00187240.05-КТП «Изготовление наноструктурированных арматурных канатов диаметром 12,5 мм».

ГЛАВА 5 РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДОЛОГИИ ПРИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ ОТДЕЛЬНО ВЗЯТОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОПЕРАЦИИ (НА ПРИМЕРЕ ОПЕРАЦИИ СТАБИЛИЗАЦИИ ВЫСОКОПРОЧНОЙ АРМАТУРЫ)

5.1 Современные требования к высокопрочной арматуре и анализ технологии производства

В настоящее время в Российской Федерации большая часть ежегодного прироста грузооборота на железнодорожном транспорте обеспечивается за счет увеличения производительности действующих магистралей. Основным способом интенсификации перевозок является повышение веса поездов и скоростей их движения. Это приводит к росту силового воздействия на железнодорожные пути и, в частности, железобетонные шпалы, состояние которых сегодня не вполне отвечает таким условиям эксплуатации [328].

В конструкции железобетонной шпалы (ЖБШ) основным несущим элементом является высокопрочная арматура диаметром до 10 мм [329]. Высокопрочная арматура для ЖБШ по комплексу показателей качества существенно отличается от своих аналогов, применяемых для армирования напряженных железобетонных изделий (пролетные строения, перекрытия зданий, железобетонные сваи, опоры мостов, мачты освещения, опоры ЛЭП, телебашни) [330, 331]. Отличительной особенностью этой арматуры является высокий уровень пластических и прочностных свойств. Конкретные показатели качества арматуры регламентируются соответствующей нормативно-технической документацией.

Высокопрочная арматура для армирования ЖБШ должна отвечать следующим требованиям [332]:

1. Иметь все необходимые технологические и эксплуатационные свойства, позволяющие обеспечивать механизацию и автоматизацию арматурных работ при изготовлении шпалы;

2. Обеспечивать совместно с бетоном надежность шпалы на период ее эксплуатации;

3. Обеспечивать надежность шпалы при воздействии переменных температур и агрессивных сред, длительных и кратковременных нагрузок;

4. Обладать необходимыми механическими свойствами, наиболее полно используемыми при работе шпалы:

- высокие упругие свойства для уменьшения потерь предварительного напряжения от релаксации напряжений и ползучести;

- высокое значение временного сопротивления;

- высокий предел выносливости, который определяет работоспособность арматуры при циклических нагрузках;

- достаточная вязкость, характеризуемая числом перегибов и скручиваний, которая позволяет осуществлять технологическую обработку арматуры без опасения снижения ее прочности или разрыва при изготовлении шпалы и последующей ее эксплуатации;

- достаточная пластичность, характеризуемая величиной относительного удлинения, которая предохраняет шпалу от хрупкого разрушения путем перераспределения усилий;

- выполнение требований сцепления с бетоном.

Обобщая опыт зарубежных и отечественных производителей можно выделить два направления в процессах формирования качества высокопрочной арматуры крупных размеров: термическое упрочнение в потоке прокатного стана и деформирование патентованной заготовки с последующей стабилизацией [333-337].

Освоение высокопрочной арматуры для ЖБШ на металлургических заводах сопряжено с проблемами достижения требуемых характеристик арматуры при термическом упрочнении в потоке прокатного стана, низкой рентабельностью производства при выпуске малотоннажных партий, отклонением по мерности прутков, большим разбросом механических свойств готовой продукции [338-342].

Производство высокопрочной арматуры деформационным упрочнением на метизных предприятиях сдерживается отсутствием горячекатаного подката с требуемыми механическими свойствами и способностью к холодному пластическому деформированию [343-345]. Таким образом, для обеспечения заданного уровня потребительских свойств арматуры для ЖБШ необходимо провести исследование действующих технологических режимов производства.

Требования к механическим свойствам арматурных прутков диаметром 9,6 мм и химическому составу стали марки 80P приведены в таблицах 5.1 и 5.2.

Таблица 5.1 – Механические свойства высокопрочной арматуры диаметром 9,6 мм по ТУ 0930-011-01115863-2008

Характеристика	Значение
Марка стали	80P
Разрывное усилие резьбового конца стержня при длине свинчивания ≥ 25 мм P , Н, не менее	90000
Временное сопротивление σ_B , Н/мм ² , не менее	1570
Условный предел текучести, $\sigma_{0,2}$, Н/мм ² , не менее	1400
Относительное удлинение при разрыве δ_{10} , %, не менее	6
Твердость, HRC, не более	44

Таблица 5.2 – Химический состав стали 80P, %

Массовая доля элементов, %											
C	Si	Mn	B	Al	Ti	N	S	P	Cr	Ni	Cu
				не более							
0,77-0,82	0,20-0,37	0,40-0,70	0,001-0,003	0,005	0,005	0,008	0,020	0,025	0,10	0,10	0,10

Технологический процесс изготовления арматурных прутков диаметром 9,6 мм по ТУ 0930-011-01115863-2008 включает следующие операции:

- патентирование горячекатаного проката и подготовку поверхности патентированного проката к волочению;
- волочение на проволоку-заготовку;
- нанесение трёхстороннего периодического профиля;
- стабилизацию;
- охлаждение;
- резку на прутки.

Для изготовления высокопрочной арматуры в качестве исходного материала используется горячекатаный прокат диаметром 16 мм.

Патентирование заготовки осуществляется по следующим режимам:

- температура печи по зонам: I – 1020±10 °С, II – 1010±10 °С, III – 1000±10 °С, IV – 970±10 °С;
- температура ванны расплава свинца 550...560 °С;
- скорость движения катанки через агрегат патентирования 4,6...4,8 м/мин.

После патентирования заготовку подвергают волочению на диаметр 9,98 мм. Нанесение трехстороннего периодического профиля осуществляется в роликовой клети. В таком устройстве исходная круглая холоднотянутая проволока деформируется в системе калибров «круг-стрельчатый треугольник-круг» поочередно сначала в трехвалковом калибре, образованном гладкими валками, а затем в трехвалковом профилирующем калибре. Особен-

ность профилирования арматуры заключается в том, что при протягивании проволока деформируется с трех сторон по схеме «круг-невыполненный стрелчатый треугольник», далее при прохождении второй пары валков деформации подвергаются необжимаемые в первом проходе участки арматуры по схеме «невыполненный стрелчатый треугольник-круг». Таким образом, при профилировании арматуры деформируется вся поверхность арматуры за исключением участков, не контактирующих с выступами профилирующих валков, которые находятся между впадинами на поверхности арматуры [332].

Окончательный комплекс свойств высокопрочной арматуры для ЖБШ формируется при операции стабилизации. Стабилизация сводится к одновременному воздействию температур в интервале 250-400 °С и растягивающих напряжений величиной 3500-6000 кгс. Это обеспечивает получение высоких прочностных и реологических свойств в сочетании с высокими пластическими характеристиками. Релаксационная стойкость арматуры повышается при этом в три – четыре раза и очень мало изменяется с течением времени. Такую арматуру в зарубежной практике называют релаксационно-стойкой или с низкими потерями от релаксации, в отечественной – стабилизированной [331, 343].

После нагрева в индукционной печи арматура предварительно охлаждается на воздухе и затем поступает в охлаждающее устройство. Охлаждение осуществляется в специальной ванне, состоящей из четырех секций. В первой, второй и третьей секциях арматура охлаждается водой, в четвертой секции производится удаление влаги с поверхности сжатым воздухом. Резка на прутки осуществляется с помощью гидравлических импульсных ножниц.

Топологическая модель технологического процесса формирования механических свойств высокопрочной арматуры представлена на рисунке 5.1.

С использованием декомпозиционного подхода построена топологическая модель отдельно взятой операции стабилизации (рисунок 5.2).

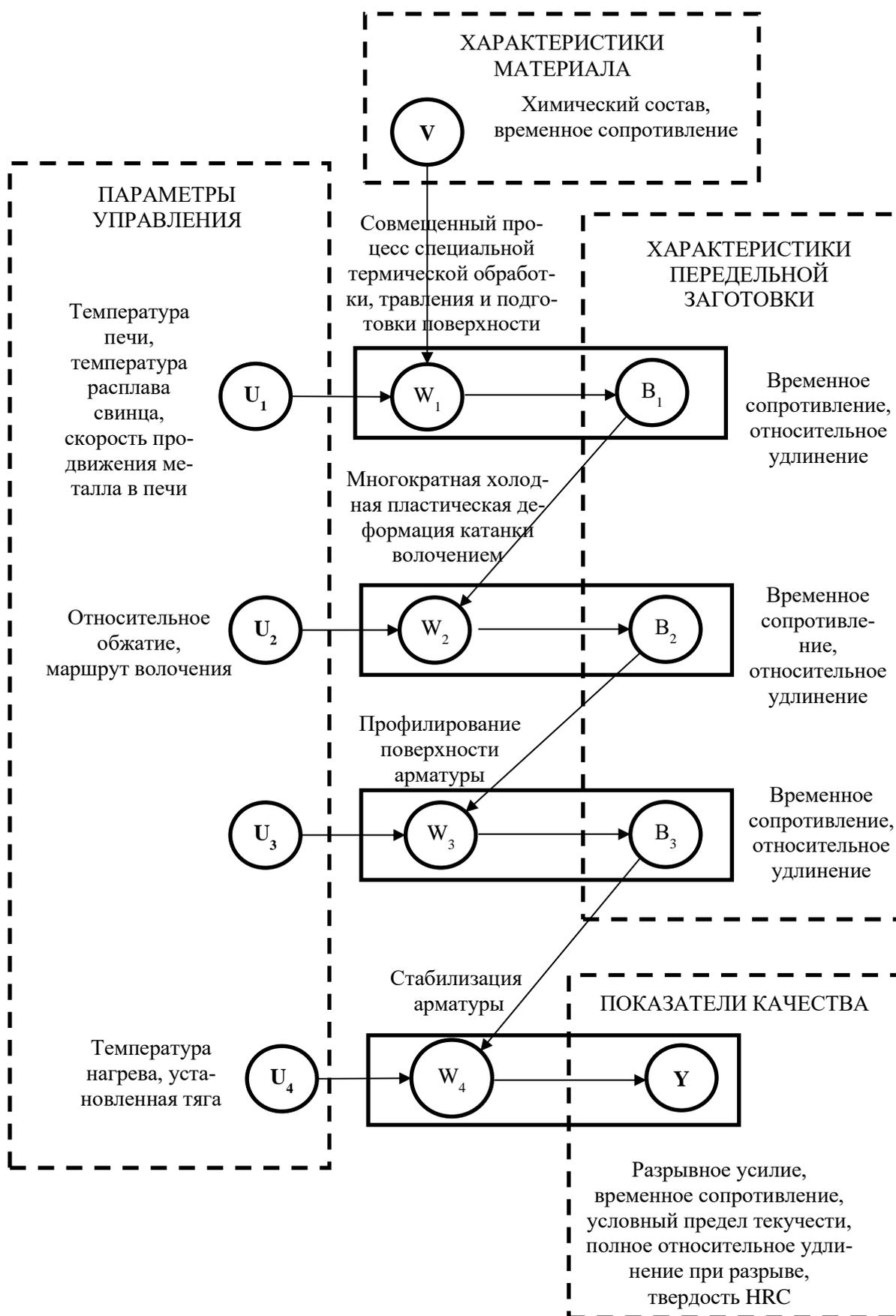


Рисунок 5.1 – Топологическая модель формирования механических свойств высокопрочной арматуры

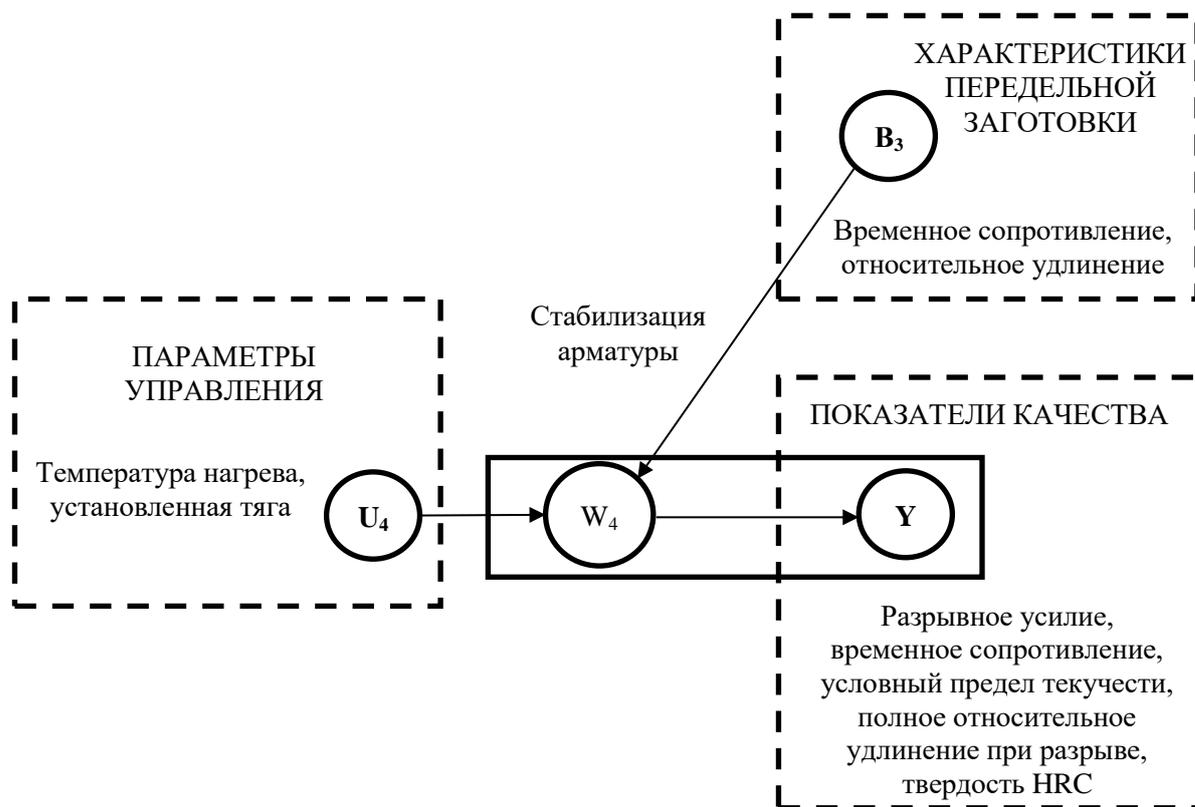


Рисунок 5.2 – Декомпозиция модели многостадийного технологического процесса: выделение операции стабилизации

Таким образом, основными параметрами управления на операции стабилизации, влияющими на формирование механических свойств высокопрочной арматуры, являются величина приложенных напряжений и температура нагрева [332, 333].

5.2 Разработка математических моделей для управления качеством высокопрочной арматуры на операции стабилизации

Для установления влияния параметров управления операции стабилизации на динамику изменения механических свойств арматуры в промышленных условиях были опробованы различные технологические режимы. Уровни варьирования параметров управления представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Параметры управления и их уровни, выбранные для исследования операции стабилизации высокопрочной арматуры

Параметр управления	Уровень			
	1	2	3	4
Установленная тяга N , кгс	3500	4750	6000	-
Температура нагрева T , °С	250	320	360	400

Условия проведения эксперимента и результаты испытаний образцов высокопрочной арматуры на растяжение на испытательной машине LFM 250 приведены в таблице 5.4. На рисунках 5.3-5.7 представлена графическая интерпретация влияния параметров управления на изменения механических свойств арматуры.

Таблица 5.4 – Результаты механических испытаний высокопрочной арматуры

№ эксперимента	Параметры управления		Механические свойства				
	Установленная тяга N , кгс	Температура нагрева T , °С	Разрывное усилие P , Н	Временное сопротивление, σ_B , Н/мм ²	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	Относительное удлинение δ_{10} , %	Твердость, HRC
1	3500	250	129434	1731,6	1631,8	5,70	43
2	3500	320	126878	1703,8	1541,6	7,38	42
3	3500	360	125844	1689,6	1493,8	7,06	42
4	3500	400	124606	1676,0	1456,0	7,20	42
5	4750	250	129072	1729,2	1627,2	6,52	42
6	4750	320	128192	1722,8	1557,0	7,14	42
7	4750	360	127302	1717,2	1532,4	7,30	43
8	4750	400	124262	1668,8	1462,2	7,08	42
9	6000	250	128710	1730,8	1628,0	5,40	42
10	6000	320	128436	1728,6	1584,0	6,94	43
11	6000	360	126960	1707,2	1545,0	6,88	42
12	6000	400	123112	1664,4	1505,6	7,32	42

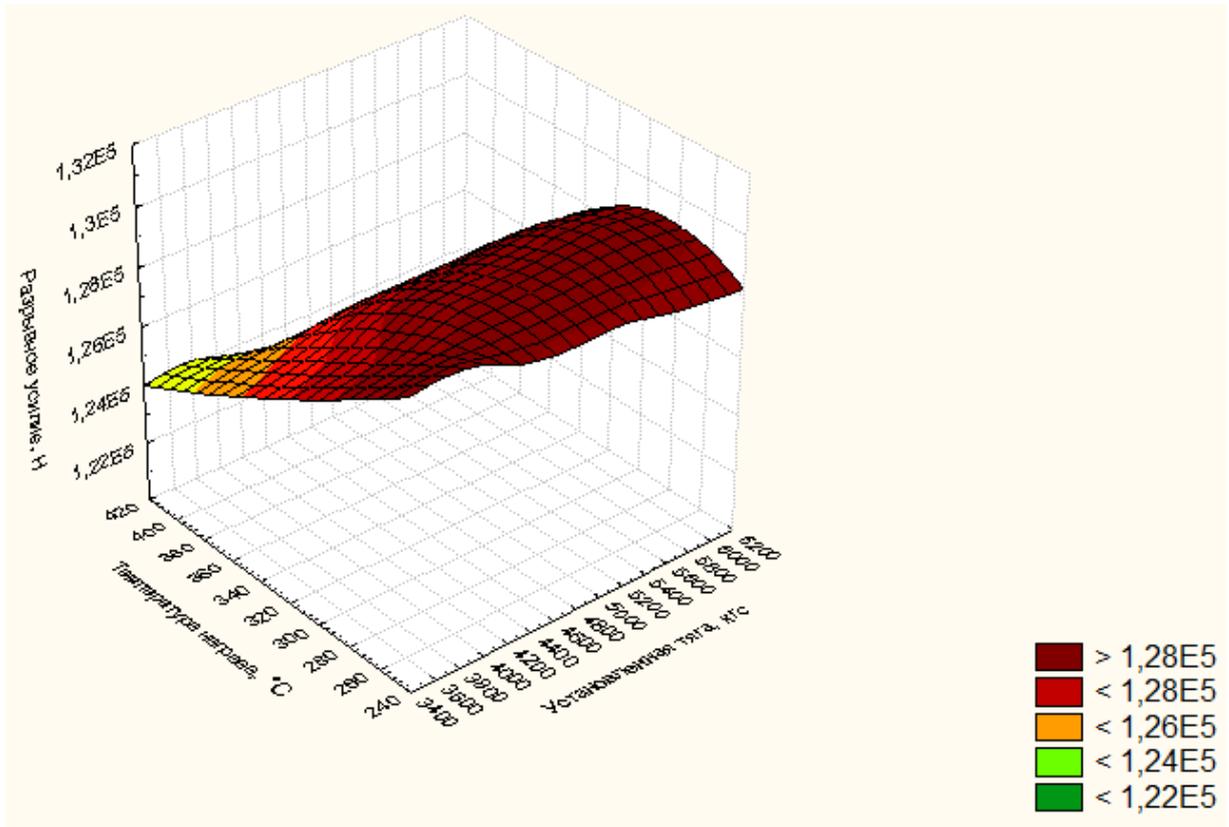


Рисунок 5.3 – Влияние параметров управления на разрывное усилие

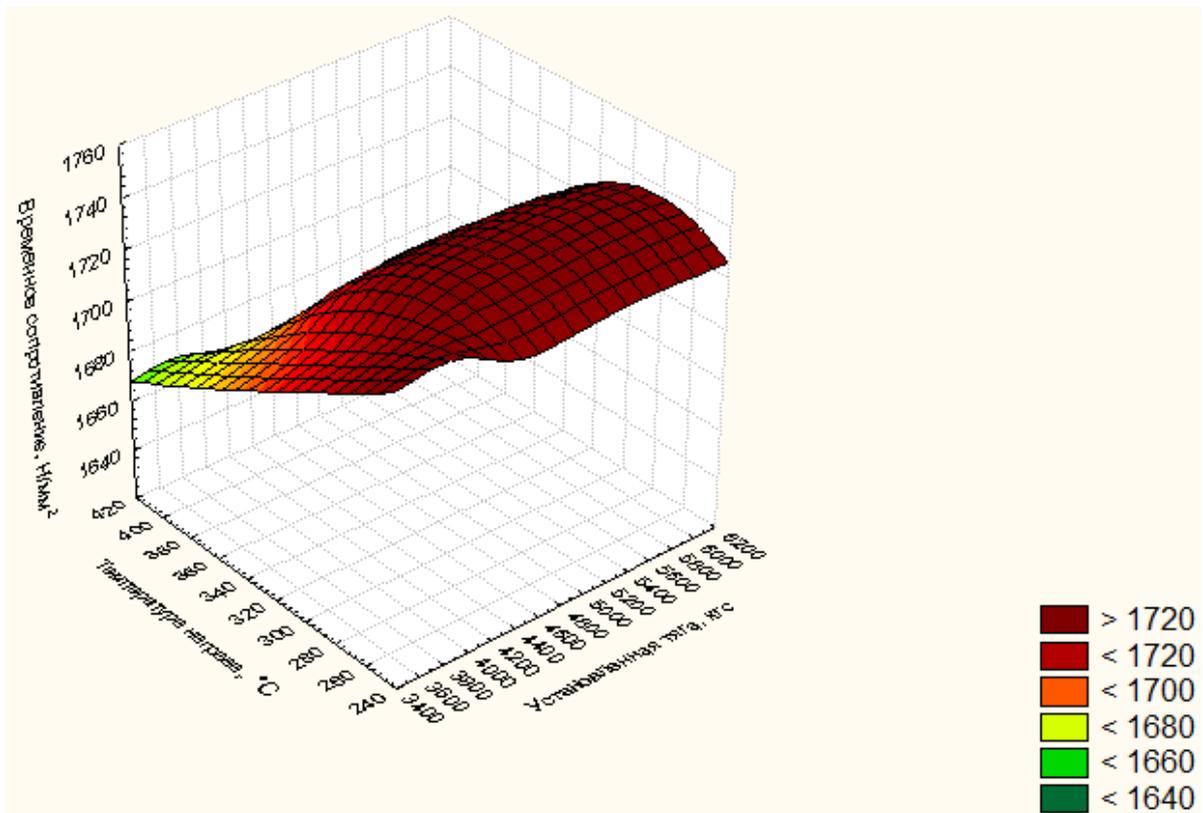


Рисунок 5.4 – Влияние параметров управления на временное сопротивление

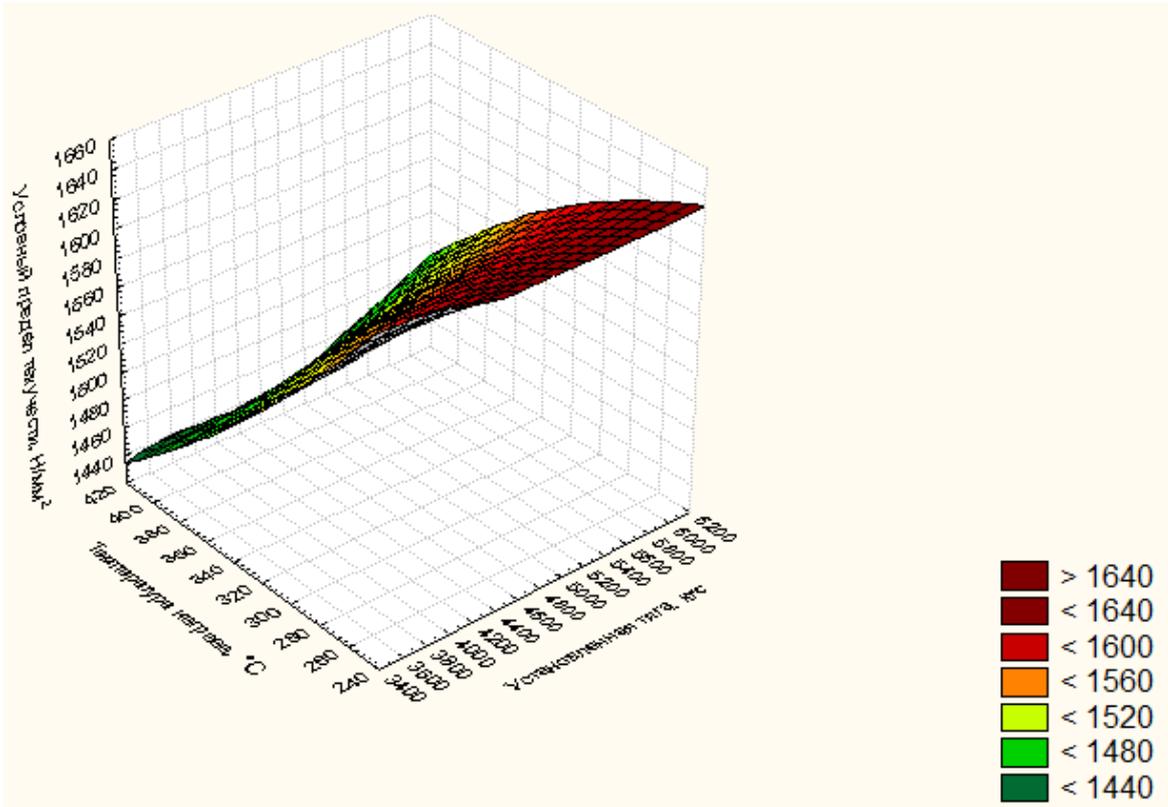


Рисунок 5.5 – Влияние параметров управления на условный предел текучести

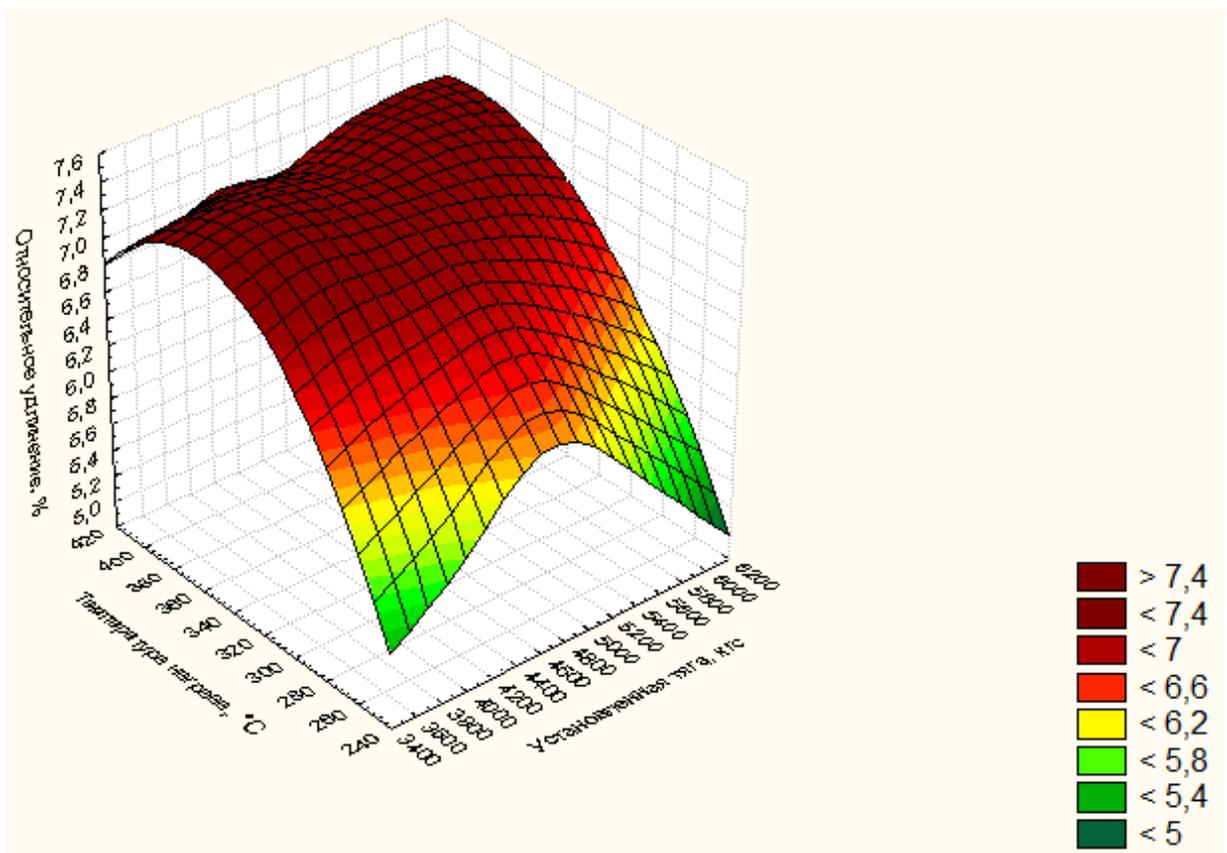


Рисунок 5.6 – Влияние параметров управления на относительное удлинение

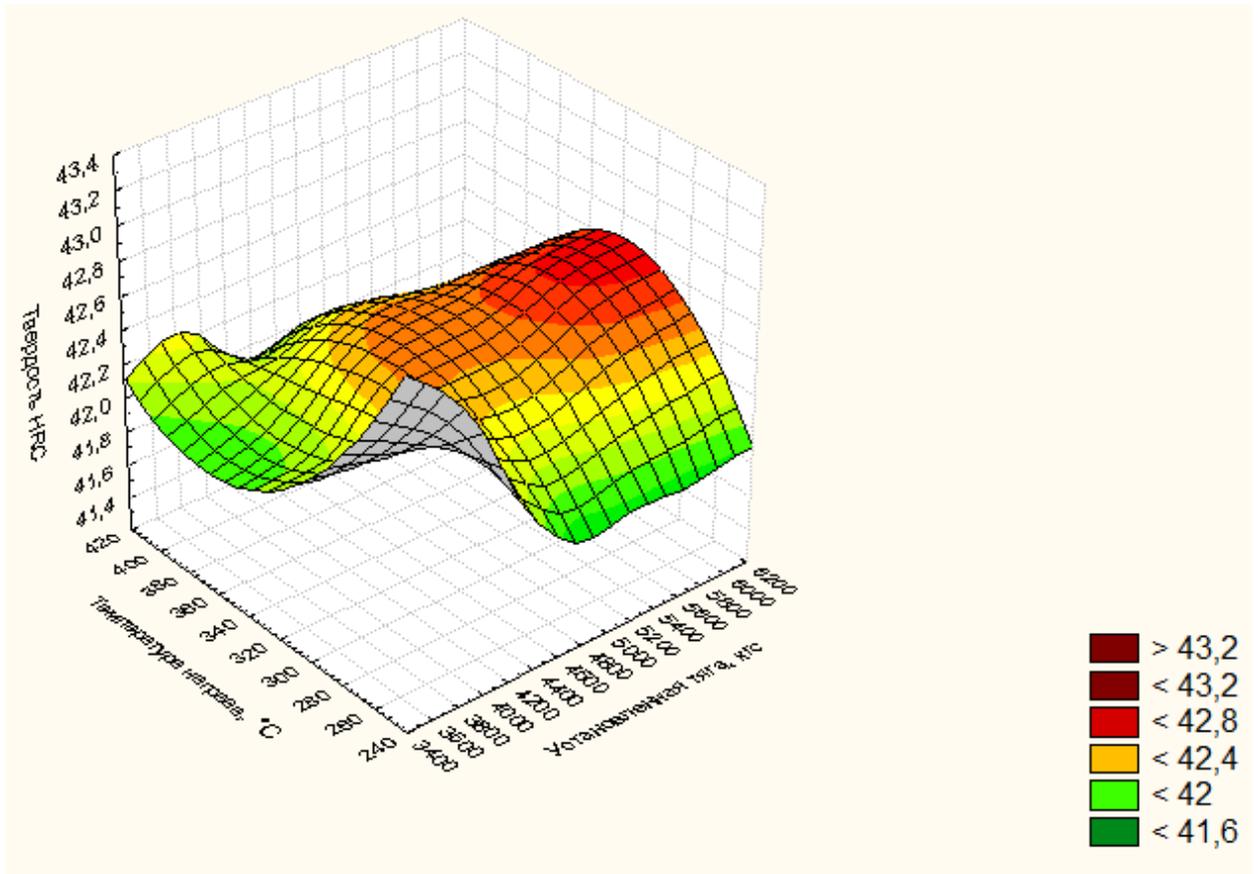


Рисунок 5.7 – Влияние параметров управления на твердость

Результаты эксперимента показывают, что наиболее существенную роль в динамике изменения механических свойств арматуры при стабилизации играет температура нагрева. Повышение температуры нагрева с 250 °С до 400 °С приводит к снижению показателей прочности: разрывного усилия, временного сопротивления и условного предела текучести.

Показатель пластичности δ_{10} имеет тенденцию к росту с повышением температуры обработки, причем он наиболее заметен в диапазоне 250...320 °С с последующим менее интенсивным изменением в области более высоких температур.

В ходе обработки результатов эксперимента не отмечено существенного влияния установленной тяги на показатели временного сопротивления и относительного удлинения арматуры. В диапазоне температур 250...400 °С изменение значений установленной тяги с 3500 до 6000 кгс приводило к максимальной разнице в значениях временного сопротивления не более 30 Н/мм², относительного удлинения не более 1,12 %.

Влияние параметров управления на твердость несущественно и не имеет четко выраженной тенденции.

В результате математического моделирования получены уравнения регрессии для механических свойств высокопрочной арматуры диаметром 9,6 мм (таблица 5.5).

Таблица 5.5 – Результаты множественного регрессионного анализа

Уравнение регрессии	F_p	R^2
$P = 105700 + 3,1633N + 124,3344T - 0,0003N^2 - 0,001NT - 0,2349T^2$	13,45	0,92
$\sigma_B = 1378,8 + 0,0423N + 1,8465T - 0,00000352N^2 - 0,000017695NT - 0,0033T^2$	11,68	0,91
$\sigma_{0,2} = 1995,3 - 0,0567N - 1,0454T + 0,000002256N^2 + 0,0001NT - 0,001T^2$	89,24	0,99
$\delta_{10} = -7,7 + 0,0012N + 0,0668T - 0,000000176N^2 + 0,0000010884NT - 0,000098029T^2$	6,62	0,85

Полученные регрессионные зависимости статистически значимы, т.к. $F_p > F_{\text{табл}} = 4,39$. Вероятность нулевой гипотезы (p-level) значительно меньше 0,05, что говорит об общей значимости уравнений регрессии. Полученное уравнение для твердости неадекватно и в таблице 5.5 не приводится.

5.3 Исследование воздействий возмущающих факторов при стабилизации высокопрочной арматуры

По разработанной методике (см. п. 2.2) проведена процедура идентификации возмущающих факторов, влияющих на формирование показателей качества высокопрочной арматуры при стабилизации (см. рисунок 5.8). Анализ матрицы показал, что необходимо провести количественную оценку следующих видов технологической неопределенности категорий 1М и 2М: $\delta_{1M}(N)$, $\delta_{2M}(N)$, $\delta_{1M}(T)$, $\delta_{2M}(T)$.

<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p style="text-align: center;">Возмущающие факторы, влияющие на показатели качества</p> </div> <div style="width: 45%; text-align: center;"> <p>ПК</p> <p>P</p> <p>σ_B</p> <p>$\sigma_{0,2}$</p> <p>δ_{10}</p> <p>HRC</p> </div> </div>					ПК	P	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ_{10}	HRC
					ВФ					
					$\xi_{1M}^{ПК}$	-	-	-	-	-
					$\xi_{2M}^{ПК}$	-	-	-	-	-
					$\xi_{3M}^{ПК}$	+	+	+	+	-
$\xi_{4M}^{ПК}$	+	+	+	+	+					
ВФ	$\xi_{1M}^{ВХ}$	$\xi_{2M}^{ВХ}$	$\xi_{3M}^{ВХ}$	$\xi_{4M}^{ВХ}$	ПК	P	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ_{10}	HRC
ВХ					ВХ					
Параметры управления					Параметры управления					
N	+	+	+	+	N	+	+	+	+	-
T	+	+	+	+	T	+	+	+	+	-

Рисунок 5.8 – Матрица возмущающих факторов, влияющих на формирование показателей качества высокопрочной арматуры при стабилизации

В соответствии с разработанной методикой (см. п. 2.3) проведена количественная оценка технологической неопределенности категорий 1М и 2М, результаты которой представлены на рисунках 5.9 и 5.10.

В таблицах 5.6 и 5.7 приведены оценки технологической неопределенности категории 3М.

ОТЧЕТ О ВЛИЯНИИ ОБОРУДОВАНИЯ И ПЕРСОНАЛА НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ПАРАМЕТРА УПРАВЛЕНИЯ														
Нормативный документ ТУ 0930-011-01115863-2008				Наименование оборудования Линия стабилизации MFL				Оператор А						
Наименование изделия Арматурный пруток диам. 9,6 мм								Оператор В						
Характеристика		Допуск						Оператор С						
Установленная тяга, кгс														
Оператор/		Измерения через интервалы 15 мин.												
Измер. №		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
1.	А	1	4746	4777	4776	4778	4754	4748	4749	4753	4759	4760		
2.		2	4748	4773	4748	4757	4761	4723	4728	4755	4760	4766		
3.		3	4722	4766	4748	4756	4788	4714	4740	4770	4746	4776		
4.		X _{ij} *	4739	4772	4757	4764	4768	4728	4739	4759	4755	4767	X _j *	4755
5.	В	1	4762	4791	4768	4755	4792	4753	4724	4731	4720	4767		
6.		2	4739	4794	4744	4746	4766	4773	4734	4722	4745	4730		
7.		3	4762	4752	4727	4752	4793	4769	4739	4753	4743	4752		
8.		X _{ij} *	4754	4779	4746	4751	4784	4765	4732	4735	4736	4750	X _j *	4753
9.	С	1	4755	4747	4735	4742	4746	4733	4757	4770	4744	4717		
10.		2	4773	4746	4735	4762	4754	4743	4733	4771	4712	4713		
11.		3	4758	4738	4738	4739	4734	4746	4737	4761	4741	4723		
12.		X _{ij} *	4762	4744	4736	4748	4745	4741	4742	4767	4732	4718	X _j *	4743
Образцы		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
13.		X _i **	4752	4765	4747	4754	4765	4745	4738	4754	4741	4745		
14.	Техн. неопр. оборудования						δ_{1M}	13,7						
15.	Техн. неопр. персонала						δ_{2M}	5,7						

Рисунок 5.9 – Результаты количественной оценки технологической неопределенности $\delta_{1M}(N)$, $\delta_{2M}(N)$

ОТЧЕТ О ВЛИЯНИИ ОБОРУДОВАНИЯ И ПЕРСОНАЛА НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ПАРАМЕТРА УПРАВЛЕНИЯ														
Нормативный документ				Наименование оборудования				Оператор А						
ТУ 0930-011-01115863-2008				Линия стабилизации MFL										
Наименование изделия								Оператор В						
Арматурный прутки диам. 9,6 мм														
Характеристика		Допуск						Оператор С						
Температура, °С														
Оператор/		Измерения через интервалы 15 мин.												
Измер. №		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
1. А		1	320	323	320	318	318	318	321	317	319	320		
2,		2	321	320	321	319	321	318	320	318	319	319		
3,		3	321	323	321	319	320	319	321	318	320	320		
4,		X _{ij} *	320,7	322,0	320,7	318,7	319,7	318,3	320,7	317,7	319,3	319,7	X _j *	319,7
5. В		1	322	320	321	321	320	320	320	319	317	322		
6,		2	320	320	321	320	319	320	320	321	318	320		
7,		3	320	319	321	321	321	321	321	319	318	320		
8,		X _{ij} *	320,7	319,7	321,0	320,7	320,0	320,3	320,3	319,7	317,7	320,7	X _j *	320,1
9. С		1	320	319	322	318	320	319	321	320	319	320		
10,		2	320	319	322	320	321	321	319	319	320	320		
11,		3	319	320	320	321	320	320	320	319	319	319		
12,		X _{ij} *	319,7	319,3	321,3	319,7	320,3	320,0	320,0	319,3	319,3	319,7	X _j *	319,9
Образцы		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
13,		X _i **	320,3	320,3	321,0	319,7	320,0	319,6	320,3	318,9	318,8	320,0		
14,		Техн. неопр. оборудования					δ _{1М}	1,1						
15,		Техн. неопр. персонала					δ _{2М}	0,2						

Рисунок 5.10 – Результаты количественной оценки технологической неопределенности $\delta_{1M}(T)$, $\delta_{2M}(T)$

Таблица 5.6 – Технологическая неопределенность метода управления для установленной тяги и температуры нагрева

Параметры управления	Технологическая неопределенность метода управления
Установленная тяга, кгс	750
Температура нагрева, °С	10

Таблица 5.7 – Технологическая неопределенность метода управления для механических свойств высокопрочной арматуры

Показатель качества	Технологическая неопределенность метода управления
Разрывное усилие P , Н	$\delta_{3M}(P) = 3,1633\delta(N) + 124,3344\delta(T) - 0,0006N\delta(N) - 0,001(N\delta(T) + T\delta(N)) - 0,4698T\delta(T)$
Временное сопротивление σ_B , Н/мм ²	$\delta_{3M}(\sigma_B) = 0,0423\delta(N) + 1,8465\delta(T) - 0,0000072N\delta(N) - 0,000017695(N\delta(T) + T\delta(N)) - 0,0066T\delta(T)$
Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	$\delta_{3M}(\sigma_{0,2}) = -0,0567\delta(N) - 1,0454\delta(T) + 0,000004512N\delta(N) + 0,0001(N\delta(T) + T\delta(N)) - 0,002T\delta(T)$
Относительное удлинение δ_{10} , %	$\delta_{3M}(\delta_{10}) = 0,0012\delta(N) + 0,0668\delta(T) - 0,000000352N\delta(N) + 0,0000010884(N\delta(T) + T\delta(N)) - 0,000196058T\delta(T)$

В соответствии с матрицей возмущающих факторов (рисунок 5.6) необходимо провести анализ MSA и расчет технологической неопределенности категории 4M для следующих параметров:

- установленная тяга N ;
- температура нагрева T ;
- разрывное усилие P ;
- временное сопротивление σ_B ;
- условный предел текучести $\sigma_{0,2}$;
- относительное удлинение δ_{10} ;
- твердость HRC.

Результаты количественной оценки представлены на рисунках 5.11-5.17.

ОТЧЕТ О СХОДИМОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ												ОТЧЕТ О СХОДИМОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ																							
ОТНОСИТЕЛЬНО ПОЛНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА												ОТНОСИТЕЛЬНО ПОЛНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА																							
Нормативные документы ТУ 0930-011-01115863-2008			Наименование средства измер. Программируемый логический контроллер Siemens S7-300			Контролер А			Контролер В			Контролер С			№ чертежа ТУ 0930-011-01115863-2008		Наименование средства измер. Программируемый логический контроллер Siemens S7-300		Контролер А		Контролер В		Контролер С												
Наименование изделия Арматурный пруток диам. 9,6 мм			Характеристика Установ. тяга, кгс			Повторений 3			Образцов 10			Контролеров 3			ДАТА			Наименование изделия Арматурный пруток диам. 9,6 мм		Характеристика Установ. тяга, кгс		Повторений 3		Образцов 10		Контролеров 3		ДАТА							
Контролер/ Повтор №												АНАЛИЗ ИЗМЕРЕНИЙ												% ОБЩ. ИЗМЕНЧИВОСТИ											
Образцы												Средние												Сходимость-изменчивость оборудования (EV)											
1												2												EV = R x K ₁				Повторы K ₁				% EV = 100 (EV/TV)			
2												3												EV = 21,170				2 0,8862				% EV = 52,76			
3												4																3 0,5908							
4, Сред												X _с = 4760												Воспроизводимость-изменчивость контролера (AV)											
5, R												Г _с = 57												AV = $\{(X_{\text{DIFF}} \times K_2)^2 - (EV^2/nr)\}^{1/2}$				% AV = 100 (AV/TV)							
6, B												4769												AV = 13,8563				% AV = 34,53							
7,												4775												n = количество образцов				Контролеры 2 3							
8,												4772												г = количество повторений				K ₂ 0,7071 0,5231							
9, Сред												X _с = 4772												Сходимость и воспроизводимость (GRR)											
10, R												Г _с = 27												GRR = $\{(EV^2 + AV^2)\}^{1/2}$				Образцы K ₃				% GRR = 100 (GRR/TV)			
11, C												4747												GRR = 25,302				2 0,7071				% GRR = 63,05			
12,												4744												δ _{4M} = 24,8				3 0,5231							
13,												4743												Изменчивость образца (PV)				4 0,4467							
14, Сред												X _с = 4744												PV = R _p x K ₃				5 0,4030				% PV = 100 (PV/TV)			
15, R												Г _с = 23												PV = 31,145				6 0,3742				% PV = 77,62			
Образцы												X_с= 4759																7 0,3534							
Сред (Xp)												R_p= 99												Общая изменчивость (TV)				8 0,3375							
17,												(Г _с + Г _с + Г _с) / (кол-во контролеров) = R= 35,833												TV = $\{(GRR^2 + PV^2)\}^{1/2}$				9 0,3249				ndc = 1,41 (PV/GRR)			
18,												(Max X - Min X) = X _{DIFF} = 27,500												TV = 40,127				10 0,3146				ndc = 1,735651			

Рисунок 5.11 – Результаты анализа MSA и количественной оценки технологической неопределенности $\delta_{4M}(N)$

ОТЧЕТ О СХОДИМОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ПОЛНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА												ОТЧЕТ О СХОДИМОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ПОЛНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА																				
Нормативные документы ТУ 0930-011-01115863-2008			Наименование средства измер. Пирометр мод. Modline 5G-1007000 ф. Raytek			Контролер А			Контролер В			Контролер С			№ чертежа ТУ 0930-011-01115863-2008		Наименование средства измер. Пирометр мод. Modline 5G-1007000 ф. Raytek		Контролер А		Контролер В		Контролер С									
Наименование изделия Арматурный пруток диам. 9,6 мм			Характеристика Температура нагрева, °С			Допуск			Повторений 3			Образцов 10			Контролеров 3			ДАТА			Наименование изделия Арматурный пруток диам. 9,6 мм		Характеристика Температура нагрева, °С		Повторений 3		Образцов 10		Контролеров 3		ДАТА	
Контролер/												АНАЛИЗ ИЗМЕРЕНИЙ																				
Повтор №												% ОБЩ. ИЗМЕНЧИВОСТИ																				
Образцы												Сходимость-изменчивость оборудования (EV)																				
Средние												Сходимость-изменчивость контролера (AV)																				
1												EV = R x K₁																				
2												Повторы K₁																				
3												% EV = 100 (EV/TV)																				
4												EV = 1,989																				
5												2 0,8862 % EV = 57,82																				
6												3 0,5908																				
7												Воспроизводимость-изменчивость контролера (AV)																				
8												AV = $\{(X_{DIFF} \times K_2)^2 - (EV^2/nr)\}^{1/2}$																				
9												AV = 0,2411																				
10												% AV = 100 (AV/TV)																				
11												% AV = 7,01																				
12												n = количество образцов																				
13												Контролеры 2 3																				
14												g = количество повторений																				
15												K₂ 0,7071 0,5231																				
16												Сходимость и воспроизводимость (GRR)																				
17												GRR = $\{(EV^2 + AV^2)\}^{1/2}$																				
18												Образцы K₃																				
19												% GRR = 100 (GRR/TV)																				
20												GRR = 2,004																				
21												2 0,7071 % GRR = 58,24																				
22												3 0,5231																				
23												Изменчивость образца (PV)																				
24												PV = R_p x K₃																				
25												4 0,4467																				
26												5 0,4030 % PV = 100 (PV/TV)																				
27												PV = 2,796																				
28												6 0,3742 % PV = 81,29																				
29												7 0,3534																				
30												Общая изменчивость (TV)																				
31												TV = $\{(GRR^2 + PV^2)\}^{1/2}$																				
32												8 0,3375																				
33												9 0,3249 ndc = 1,41 (PV/GRR)																				
34												10 0,3146 ndc = 1,96796																				
35												17 (Г₃ + Г₆ + Г_с) / (кол-во контролеров) = R= 3,367																				
36												18 (Max X - Min X) / X_{DIFF} = 0,833																				

Рисунок 5.12 – Результаты анализа MSA и количественной оценки технологической неопределенности $\delta_{4M}(T)$

ОТЧЕТ О СХОДИМОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ПОЛНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА												ОТЧЕТ О СХОДИМОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ПОЛНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА															
Нормативные документы ТУ 0930-011-01115863-2008			Наименование средства измер. Машина испытательная LFM 250			Контролер А			№ чертежа ТУ 0930-011-01115863-2008			Наименование средства измер. Машина испытательная LFM 250			Контролер А												
Наименование изделия Арматурный пруток diam. 9,6 мм						Контролер В			Наименование изделия Арматурный пруток diam. 9,6 мм						Контролер В												
Характеристика Допуск Разр. усилие, Н 90000						Контролер С			Характеристика Разр. усилие, Н						Контролер С												
			Повторений 3		Образцов 10		Контролеров 3		ДАТА					Повторений 3		Образцов 10		Контролеров 3		ДАТА							
Контролер/ Повтор №												АНАЛИЗ ИЗМЕРЕНИЙ												% ОБЩ. ИЗМЕНЧИВОСТИ			
Образцы												Сходимость-изменчивость оборудования (EV)															
Средние												Сходимость-изменчивость оборудования (EV)															
1. А 1												EV = R x K ₁												Повторы K1 % EV = 100 (EV/TV)			
2. 2												EV = 755,46												2 0,8862 % EV = 34,97			
3. 3																								3 0,5908			
4. Сред 129681												Воспроизводимость-изменчивость контролера (AV)															
5. R 1101												AV = $\{(X_{DIFF} \times K_2)^2 - (EV^2/nr)\}^{1/2}$												% AV = 100 (AV/TV)			
6. В 1												AV = 0,00												% AV = 0,00			
7. 2												n = количество образцов												Контролеры 2 3			
8. 3												g = количество повторений												K ₂ 0,7071 0,5231			
9. Сред 129126												Сходимость и воспроизводимость (GRR)															
10. R 1768												GRR = $\{(EV^2 + AV^2)\}^{1/2}$												Образцы K ₃ % GRR = 100 (GRR/TV)			
11. С 1												GRR = 755,46												2 0,7071 % GRR = 34,97			
12. 2												δ _{AM} = 740												3 0,5231			
13. 3												Изменчивость образца (PV)												4 0,4467			
14. Сред 128824												PV = R _p x K ₃												5 0,4030 % PV = 100 (PV/TV)			
15. R 2435												PV = 2024,00												6 0,3742 % PV = 93,69			
Образцы 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10												X = 125882												7 0,3534			
Сред (Xp) 129210												Общая изменчивость (TV)												8 0,3375			
17. (Γ _а + Γ _б + Γ _с) / (кол-во контролеров) = R = 1278,7												TV = $\{(GRR^2 + PV^2)\}^{1/2}$												9 0,3249 ndc = 1,41 (PV/GRR)			
18. (Max X - Min X) = X _{DIFF} = 55,9												TV = 2160,388												10 0,3146 ndc = 3,777633			

Рисунок 5.13 – Результаты анализа MSA и количественной оценки технологической неопределенности $\delta_{4M}(P)$

ОТЧЕТ О СХОДИМОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ												ОТЧЕТ О СХОДИМОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ											
ОТНОСИТЕЛЬНО ПОЛНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА												ОТНОСИТЕЛЬНО ПОЛНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА											
Нормативные документы ТУ 0930-011-01115863-2008		Наименование средства измер. Машина испытательная LFM 250			Контролер А					№ чертежа ТУ 0930-011-01115863-2008		Наименование средства измер. Машина испытательная LFM 250			Контролер А								
Наименование изделия Арматурный пруток diam. 9,6 мм					Контролер В					Наименование изделия Арматурный пруток diam. 9,6 мм					Контролер В								
Характеристика Допуск Врем. сопр., Н/мм ² 1570					Контролер С					Характеристика Врем. сопр., Н/мм ²					Контролер С								
					Повторений 3		Образцов 10		Контролеров 3		ДАТА				Повторений 3		Образцов 10		Контролеров 3		ДАТА		
Контролер/ Повтор №	Образцы										Средние	АНАЛИЗ ИЗМЕРЕНИЙ						% ОБЩ. ИЗМЕНЧИВОСТИ					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		Сходимость-изменчивость оборудования (EV)											
1. А	1	1703	1719	1690	1706	1691	1699	1692	1703	1695	1709		1701	EV	=	R x K ₁	Повторы		K ₁	% EV	=	100 (EV/TV)	
2,	2	1698	1716	1694	1700	1682	1710	1715	1709	1707	1713		1704	EV	=	8,232	2	0,8862	% EV	=	63,19		
3,	3	1707	1718	1689	1697	1698	1718	1705	1713	1708	1712		1707				3	0,5908					
4,	Сред	1703	1718	1691	1701	1690	1709	1704	1708	1703	1711	X _g =	1704	Воспроизводимость-изменчивость контролера (AV)									
5,	R	9	3	5	9	16	19	23	10	13	4	Г _g =	11	AV	=	{(X _{DIFF} x K ₂) ² - (EV ² /nr)} ^{1/2}			% AV	=	100 (AV/TV)		
6. В	1	1686	1731	1694	1699	1678	1708	1697	1709	1717	1712		1703	AV	=	1,4052			% AV	=	10,79		
7,	2	1685	1717	1668	1690	1695	1698	1719	1703	1723	1717		1702	n = количество образцов	Контролеры		2	3					
8,	3	1704	1721	1677	1695	1683	1701	1689	1697	1725	1705		1700	r = количество повторений	K ₂	0,7071	0,5231						
9,	Сред	1692	1723	1680	1695	1685	1702	1702	1703	1722	1711	X _g =	1701	Сходимость и воспроизводимость (GRR)									
10,	R	19	14	26	9	17	10	30	12	8	12	Г _g =	16	GRR	=	{(EV ² + AV ²)} ^{1/2}	Образцы		K ₃	% GRR	=	100 (GRR/TV)	
11. С	1	1703	1701	1674	1706	1690	1710	1697	1691	1701	1707		1698	GRR	=	8,351	2	0,7071	% GRR	=	64,11		
12,	2	1704	1697	1680	1707	1678	1704	1698	1705	1715	1726		1701	δ _{4M}	=	8,2	3	0,5231					
13,	3	1712	1706	1674	1681	1688	1724	1714	1693	1709	1703		1700	Изменчивость образца (PV)									
14,	Сред	1706	1701	1676	1698	1685	1713	1703	1696	1708	1712	X _g =	1700	PV	=	R _p x K ₃	5	0,4030	% PV	=	100 (PV/TV)		
15,	R	9	9	6	26	12	20	17	14	14	23	Г _g =	15	PV	=	9,997	6	0,3742	% PV	=	76,75		
Образцы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	X	1702				7	0,3534						
Сред (X _p)	1700	1714	1682	1698	1687	1708	1703	1703	1711	1712	R _p =	32	Общая изменчивость (TV)										
17,	(Г _a + Г _b + Г _c) / (кол-во контролеров) =				R =		13,933							TV	=	{(GRR ² + PV ²)} ^{1/2}	9	0,3249	ndc	=	1,41 (PV/GRR)		
18,	(Max X - Min X) =				X _{DIFF} =		3,933							TV	=	13,026	10	0,3146	ndc	=	1,68798		

Рисунок 5.14 – Результаты анализа MSA и количественной оценки технологической неопределенности δ_{4M}(σ_B)

ОТЧЕТ О СХОДИМОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ПОЛНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА												ОТЧЕТ О СХОДИМОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ПОЛНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА																				
Нормативные документы ТУ 0930-011-01115863-2008			Наименование средства измер. Машина испытательная LFM 250			Контролер А			Контролер В			Контролер С			№ чертежа ТУ 0930-011-01115863-2008		Наименование средства измер. Машина испытательная LFM 250		Контролер А		Контролер В		Контролер С									
Наименование изделия Арматурный пруток диам. 9,6 мм			Характеристика Допуск			Усл. пр. тек., Н/мм ² 1400			Повторений 3			Образцов 10			Контролеров 3			ДАТА			Наименование изделия Арматурный пруток диам. 9,6 мм		Характеристика Усл. пр. тек., Н/мм ²		Повторений 3		Образцов 10		Контролеров 3		ДАТА	
Контролер/												АНАЛИЗ ИЗМЕРЕНИЙ												% ОБЩ. ИЗМЕНЧИВОСТИ								
Образцы												Сходимость-изменчивость оборудования (EV)																				
Средние												Сходимость-изменчивость контролера (AV)																				
Повтор №												Сходимость и воспроизводимость (GRR)																				
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10												EV = R x K₁												Повторы K1 % EV = 100 (EV/TV)								
1. А 1 1552 1545 1537 1552 1532 1561 1549 1554 1540 1557 1548												EV = 4,431												2 0,8862 % EV = 66,27								
2. 2 1552 1542 1543 1557 1535 1561 1553 1557 1542 1551 1549												3 0,5908																				
3. 3 1560 1544 1544 1556 1544 1562 1558 1559 1551 1555 1553												Воспроизводимость-изменчивость контролера (AV)																				
4. Сред 1555 1544 1541 1555 1537 1561 1553 1557 1544 1554 X _а = 1550												AV = 2,2477												% AV = 33,62								
5. R 8 3 7 5 12 1 9 5 11 6 Г _а = 7												AV = $\{(X_{DIFF} \times K_2)^2 - (EV^2/nr)\}^{1/2}$												% AV = 100 (AV/TV)								
6. В 1 1560 1540 1540 1561 1543 1539 1553 1549 1555 1559 1550												n = количество образцов												Контролеры 2 3								
7. 2 1548 1546 1539 1566 1549 1534 1540 1551 1556 1565 1549												r = количество повторений												K ₂ 0,7071 0,5231								
8. 3 1558 1550 1546 1561 1543 1544 1554 1550 1555 1558 1552												Сходимость и воспроизводимость (GRR)																				
9. Сред 1555 1545 1542 1563 1545 1539 1549 1550 1555 1561 X _б = 1550												GRR = $\{(EV^2 + AV^2)\}^{1/2}$												Образцы K₃ % GRR = 100 (GRR/TV)								
10. R 12 10 7 5 6 10 14 2 1 7 Г _б = 7												GRR = 4,968												2 0,7071 % GRR = 74,31								
11. С 1 1552 1563 1568 1535 1544 1559 1560 1553 1550 1553 1554												δ _{4М} = 9,7																				
12. 2 1555 1566 1566 1539 1545 1562 1548 1560 1563 1563 1557												Изменчивость образца (PV)																				
13. 3 1552 1555 1558 1541 1550 1564 1560 1553 1553 1552 1554												PV = R _P x K ₃												4 0,4467								
14. Сред 1553 1561 1564 1538 1546 1562 1556 1555 1555 1556 X _с = 1555												PV = 4,474												5 0,4030 % PV = 100 (PV/TV)								
15. R 3 11 10 6 6 5 12 7 13 11 Г _с = 8																								6 0,3742 % PV = 66,92								
Образцы																								7 0,3534								
Сред (Xр)												Общая изменчивость (TV)																				
17. (Г _а + Г _б + Г _с) / (кол-во контролеров) = R= 7,500												TV = $\{(GRR^2 + PV^2)\}^{1/2}$												8 0,3375								
18. (Max X - Min X) = X _{DIFF} = 4,567												TV = 6,686												9 0,3249 ndc = 1,41 (PV/GRR)								
																								10 0,3146 ndc = 1,269761								

Рисунок 5.15 – Результаты анализа MSA и количественной оценки технологической неопределенности $\delta_{4M}(\sigma_{0,2})$

ОТЧЕТ О СХОДИМОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ													ОТЧЕТ О СХОДИМОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ													
ОТНОСИТЕЛЬНО ПОЛНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА													ОТНОСИТЕЛЬНО ПОЛНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА													
Нормативные документы ТУ 0930-011-01115863-2008			Наименование средства измер. Машина испытательная LFM 250			Контролер А			№ чертежа ТУ 0930-011-01115863-2008			Наименование средства измер. Машина испытательная LFM 250			Контролер А											
Наименование изделия Арматурный пруток diam. 9,6 мм			Характеристика Отн. удл., %			Допуск 6			Контролер В			Наименование изделия Арматурный пруток diam. 9,6 мм			Контролер В											
									Контролер С			Характеристика Отн. удл., %			Контролер С											
			Повторений 3			Образцов 10			Контролеров 3			ДАТА			Повторений 3			Образцов 10			Контролеров 3			ДАТА		
Контролер/		Образцы										Средние		АНАЛИЗ ИЗМЕРЕНИЙ								% ОБЩ. ИЗМЕНЧИВОСТИ				
Повтор №		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			Сходимость-изменчивость оборудования (EV)												
1. А		1	70,6	70,4	70,6	70,3	70,6	70,5	70,0	70,8	70,5	70,7	70,5	EV	=	R x K ₁	Повторы		K1	% EV	=	100 (EV/TV)				
2,		2	70,6	70,4	70,6	70,4	70,8	70,4	70,2	70,8	70,6	70,6	70,5	EV	=	0,107	2		0,8862	% EV	=	47,87				
3,		3	70,6	70,5	70,4	70,2	70,8	70,5	70,1	70,6	70,7	70,8	70,5			3		0,5908								
4,		Сред	70,6	70,4	70,5	70,3	70,7	70,4	70,1	70,7	70,6	70,7	X ₀ =			Воспроизводимость-изменчивость контролера (AV)										
5,		R	0,0	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	Г ₃ =	0,2	AV	=	{(X _{DIFF} x K ₂) ² - (EV ² /nr)} ^{1/2}			% AV	=	100 (AV/TV)				
6. В		1	70,7	70,5	70,6	70,4	70,9	70,5	70,3	70,6	70,7	70,6	70,6	AV	=	0,0000			% AV	=	0,00					
7,		2	70,6	70,4	70,5	70,3	71,0	70,6	70,2	70,6	70,7	70,5	70,5	n = количество образцов		Контролеры		2	3							
8,		3	70,5	70,7	70,4	70,5	70,7	70,4	70,1	70,6	70,5	70,7	70,5	r = количество повторений		K ₂		0,7071	0,5231							
9,		Сред	70,6	70,5	70,5	70,4	70,9	70,5	70,2	70,6	70,6	70,6	X ₀ =	70,5	Сходимость и воспроизводимость (GRR)											
10,		R	0,2	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	Г ₀ =	0,2	GRR	=	{(EV ² + AV ²)} ^{1/2}	Образцы		K ₃	% GRR	=	100 (GRR/TV)			
11. С		1	70,5	70,4	70,5	70,6	70,7	70,4	70,2	70,8	70,6	70,5	70,5	GRR	=	0,107	2		0,7071	% GRR	=	47,87				
12,		2	70,4	70,6	70,5	70,3	70,8	70,4	70,2	70,8	70,7	70,8	70,5	δ _{4M}	=	0,1	3		0,5231							
13,		3	70,4	70,4	70,4	70,5	70,9	70,5	70,3	70,6	70,6	70,6	70,5	Изменчивость образца (PV)												
14,		Сред	70,5	70,5	70,5	70,5	70,8	70,4	70,2	70,7	70,7	70,6	X ₀ =	70,5	PV	=	R _p x K ₃	4		0,4467						
15,		R	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,3	Г ₀ =	0,2	PV	=	0,196	5		0,4030	% PV	=	100 (PV/TV)			
Образцы		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	X=	70,5			6		0,3742	% PV	=	87,80					
Сред (Xp)		70,5	70,5	70,5	70,4	70,8	70,4	70,2	70,7	70,6	70,7	R _p =	0,6			7		0,3534								
17,		(Г ₃ + Г ₀ + Г ₀) / (кол-во контролеров) =										R=	0,181	Общая изменчивость (TV)												
18,		(Max X - Min X) =										X _{DIFF} =	0,025	TV	=	{(GRR ² + PV ²)} ^{1/2}	8		0,3375	9	0,3249	ndc	=	1,41 (PV/GRR)		
														TV	=	0,223	10		0,3146	ndc	=	2,58586				

Рисунок 5.16 – Результаты анализа MSA и количественной оценки технологической неопределенности $\delta_{4M}(\delta_{10})$

ОТЧЕТ О СХОДИМОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ПОЛНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА												ОТЧЕТ О СХОДИМОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ПОЛНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА																																																																															
Нормативные документы ТУ 0930-011-01115863-2008				Наименование средства измер. Прибор для измерения твердости по методу Роквелла типа ТК-2М, ТР 5006-02				Контролер А				№ чертежа ТУ 0930-011-01115863-2008				Наименование средства измер. Прибор для измерения твердости по методу Роквелла типа ТК-2М, ТР 5006-02				Контролер А																																																																							
Наименование изделия Арматурный прутки диам. 9,6 мм				Характеристика Твердость, HRC				Допуск 44				Контролер В				Наименование изделия Арматурный прутки диам. 9,6 мм				Характеристика Твердость, HRC				Контролер В																																																																			
				Повторений 3				Образцов 10				Контролеров 3				ДАТА								Повторений 3				Образцов 10				Контролеров 3				ДАТА																																																							
Контролер/ Повтор №												Образцы												Средние				АНАЛИЗ ИЗМЕРЕНИЙ								% ОБЩ. ИЗМЕНЧИВОСТИ																																																							
1. А												1												44				42				43				43				43				42				42				44				42				43				EV = R x K ₁				Повторы				K ₁				% EV = 100 (EV/TV)															
2.												2												43				43				43				43				42				43				42				43				44				42				43				EV = 0,591				2				0,8862				% EV = 74,60											
3.												3												44				41				43				42				43				43				43				42				43				42				43				3				0,5908																			
4.												Сред												44				42				43				43				43				42				42				44				42				X _g = 43				Воспроизводимость-изменчивость контролера (AV)																											
5.												R												1				2				0				1				1				0				1				1				1				0				Γ _g = 1				AV = $\{(X_{DIFF} \times K_2)^2 - (EV^2/nr)\}^{1/2}$								% AV = 100 (AV/TV)															
6. В												1												43				41				43				42				43				42				43				42				43				42				43				42				43				AV = 0,0571								% AV = 7,21							
7.												2												43				42				44				43				44				43				43				43				43				43				41				43				n = количество образцов				Контролеры				2				3							
8.												3												43				41				43				44				43				43				43				42				43				41				43				r = количество повторений				K ₂				0,7071				0,5231											
9.												Сред												43				41				43				43				43				43				42				43				41				43				X _g = 43				Сходимость и воспроизводимость (GRR)																							
10.												R												0				1				1				2				1				1				0				1				0				1				Γ _g = 1				GRR = $\{(EV^2 + AV^2)\}^{1/2}$				Образцы				K ₃				% GRR = 100 (GRR/TV)											
11. С												1												43				42				43				42				43				43				42				42				44				41				43				GRR = 0,594				2				0,7071				% GRR = 74,95											
12.												2												44				41				42				44				44				43				43				43				43				43				43				43				43				δ _{4M} = 0,6				3				0,5231							
13.												3												43				43				43				43				44				44				43				44				43				41				43				Изменчивость образца (PV)				4				0,4467															
14.												Сред												43				42				43				43				44				43				43				43				43				42				43				X _c = 43				PV = R _p x K ₃				5				0,4030				% PV = 100 (PV/TV)							
15.												R												1				2				1				2				1				1				2				1				2				Γ _c = 1				PV = 0,524				6				0,3742				% PV = 66,21															
Образцы												1												2				3				4				5				6				7				8				9				10				X = 43																															
Сред (Xp)												43												42				43				43				43				43				43				43				43				42				43				R _p = 2				Общая изменчивость (TV)				8				0,3375															
17.																								(Γ _a + Γ _b + Γ _c) / (кол-во контролеров) =				R = 1,000																																TV = $\{(GRR^2 + PV^2)\}^{1/2}$				9				0,3249				ndc = 1,41 (PV/GRR)																			
18.																								(Max X - Min X) = X _{DIFF} = 0,233																																												TV = 0,792				10				0,3146				ndc = 1,24556											

Рисунок 5.17 – Результаты анализа MSA и количественной оценки технологической неопределенности δ_{4M} (HRC)

В таблице 5.8 приведены значения технологической неопределенности для параметров управления операцией стабилизацией. В таблице 5.9 представлены зависимости для расчета технологической неопределенности механических свойств высокопрочной арматуры.

Таблица 5.8 – Технологическая неопределенность параметров управления

Параметр управления	Возмущающий фактор	Технологическая неопределенность
Установленная тяга $N, Н$	ξ_{1M}^N	13,7
	ξ_{2M}^N	5,7
	ξ_{3M}^N	750
	ξ_{4M}^N	24,8
	ξ^N	750,6
Температура нагрева $T, ^\circ C$	ξ_{1M}^T	1,1
	ξ_{2M}^T	0,2
	ξ_{3M}^T	10
	ξ_{4M}^T	2,0
	ξ^T	10,3

Таблица 5.9 - Технологическая неопределенность механических свойств высокопрочной арматуры

Показатель качества	Возмущающий фактор	Технологическая неопределенность
Разрывное усилие $P, Н$	ξ_{3M}^P	$\delta_{3M}(P) = 3650 - 0,4606N - 5,57T$
	ξ_{4M}^P	$\delta_{4M}(P) = 740$
Временное сопротивление $\sigma_B, Н/мм^2$	$\xi_{3M}^{\sigma_B}$	$\delta_{3M}(\sigma_B) = 50,7 - 0,00547N - 0,081T$
	$\xi_{4M}^{\sigma_B}$	$\delta_{4M}(\sigma_B) = 8,2$
Условный предел текучести $\sigma_{0,2}, Н/мм^2$	$\xi_{3M}^{\sigma_{0,2}}$	$\delta_{3M}(\sigma_{0,2}) = -53,3 + 0,0044N - 0,0545T$
	$\xi_{4M}^{\sigma_{0,2}}$	$\delta_{4M}(\sigma_{0,2}) = 9,7$

Продолжение таблицы 5.9

Относительное удлинение δ_{10} , %	$\xi_{3M}^{\delta_{10}}$	$\delta_{3M}(\delta_{10}) = 1,59 - 0,00025N - 0,0012T$
	$\xi_{4M}^{\delta_{10}}$	$\delta_{4M}(\delta_{10}) = 0,1$
Твердость HRC	ξ_{4M}^{HRC}	$\delta_{4M}(HRC) = 0,6$

В результате проведенных исследований установлено, что на механические свойства высокопрочной арматуры при стабилизации оказывают влияние возмущающие факторы категорий 3М и 4М.

5.4 Оценивание робастности операции стабилизации высокопрочной арматуры

По разработанной методике (см. п. 2.4.1) проведена оценка робастности операции стабилизации. Результаты количественной оценки робастности по разрывному усилию представлены в таблицах 5.10 и 5.11. Графическая интерпретация результатов эксперимента представлена на рисунках 5.18-5.20.

Таблица 5.10 – Матрица планирования эксперимента (для разрывного усилия)

№ эксперимента	Уровень		Значение отклика, Н	Технологическая неопределенность, Н	Показатель η_{3M} , дБ
	для установленной тяги N	для температуры T			
1	1	1	128624	645	23,00
2	1	2	127710	255	26,99
3	1	3	126154	32	35,90
4	1	4	123846	190	28,13
5	2	1	129172	69	32,70
6	2	2	128170	321	26,02
7	2	3	126564	543	23,67
8	2	4	124207	766	22,10
9	3	1	128782	506	24,05
10	3	2	127693	896	21,54
11	3	3	126037	1119	20,52
12	3	4	123630	1342	19,64

Таблица 5.11 – Средние значения показателей эксперимента (для разрывного усилия)

Параметр управления	Уровень	$\overline{\eta}_{3M}$, дБ	$\Delta\overline{\eta}_{3M}$, дБ	\bar{y} , Н	$\Delta\bar{y}$, Н
Установленная тяга N	1	28,51	7,07	126583	493
	2	26,12		127028	
	3	21,44		126535	
Температура T	1	26,58	3,41	128859	4965
	2	24,85		127858	
	3	26,70		126252	
	4	23,29		123894	

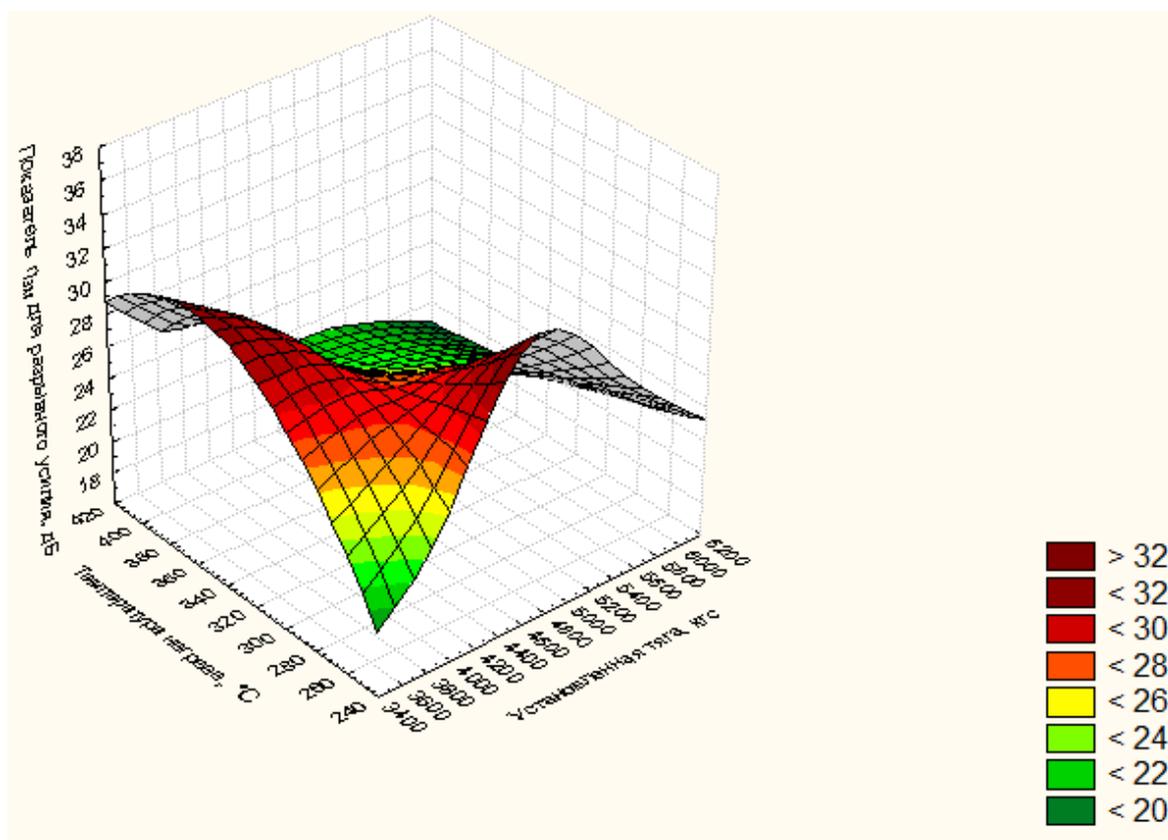


Рисунок 5.18 – Зависимость показателя η_{3M} от параметров управления (для разрывного усилия)



Рисунок 5.19 – Диаграмма эффектов параметров управления по показатель η_{3M} (для разрывного усилия)

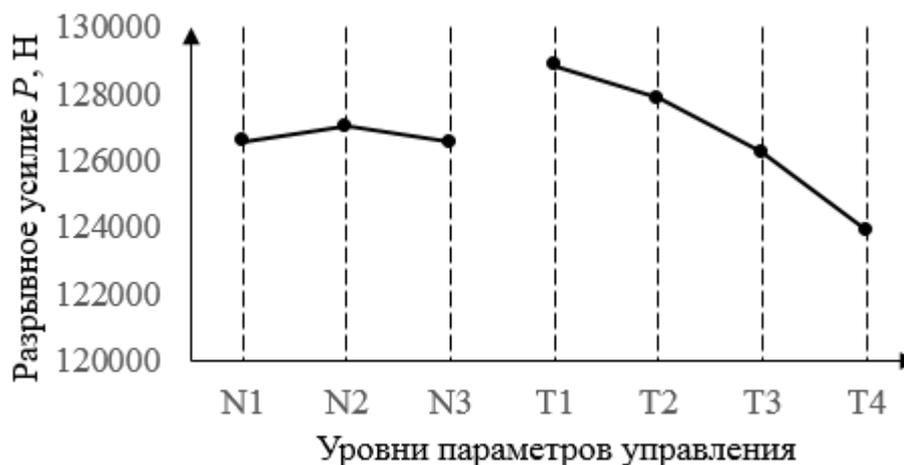


Рисунок 5.20 – Диаграмма эффектов параметров управления по разрывному усилию P

По результатам проведенного эксперимента для разрывного усилия можно сделать вывод, что наибольшее влияние на показатель η_{3M} оказывает установленная тяга: с увеличением усилия натяжения показатель η_{3M} снижается.

В таблицах 5.12 и 5.13 представлены результаты эксперимента для временного сопротивления. Графическая интерпретация результатов представлена на рисунках 5.21-5.23.

Таблица 5.12 – Матрица планирования экспериментов (для временного сопротивления)

№ эксперимента	Уровень		Значение отклика, Н/мм ²	Технологическая неопределенность, Н/мм ²	Показатель η_{3M} , дБ
	для установленной тяги N	для температуры T			
1	1	1	1724	11	21,83
2	1	2	1717	6	24,83
3	1	3	1698	2	28,49
4	1	4	1670	1	33,02
5	2	1	1735	4	25,88
6	2	2	1726	1	31,63
7	2	3	1707	4	25,86
8	2	4	1677	8	23,40
9	3	1	1735	2	28,68
10	3	2	1725	8	23,33
11	3	3	1705	11	21,80
12	3	4	1674	14	20,62

Таблица 5.13 – Средние значения показателей эксперимента (для временного сопротивления)

Параметр управления	Уровень	$\bar{\eta}_{3M}$, дБ	$\Delta\bar{\eta}_{3M}$, дБ	\bar{y} , Н/мм ²	$\Delta\bar{y}$, Н/мм ²
Установленная тяга N	1	27,04	3,43	1702	9
	2	26,69		1711	
	3	23,61		1710	
Температура T	1	25,46	1,22	1731	57
	2	26,60		1723	
	3	25,38		1703	
	4	25,68		1674	

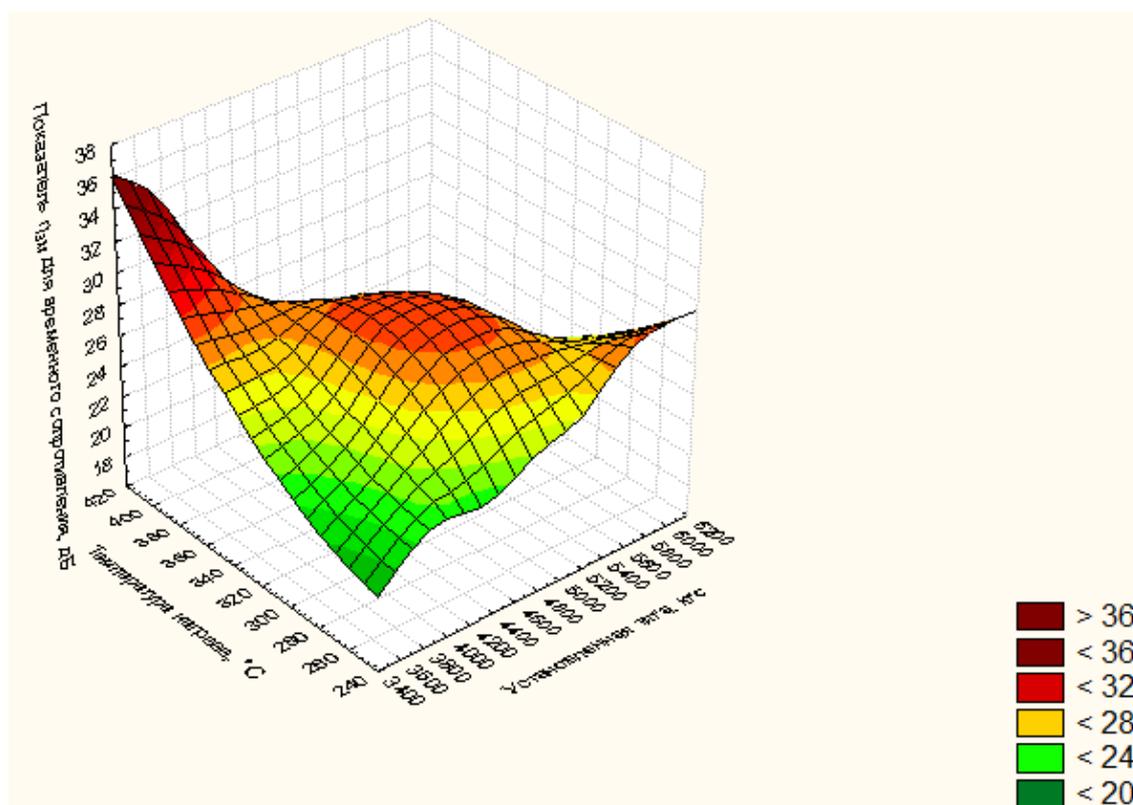


Рисунок 5.21 – Зависимость показателя $\eta_{ЗМ}$ от параметров управления (для временного сопротивления)

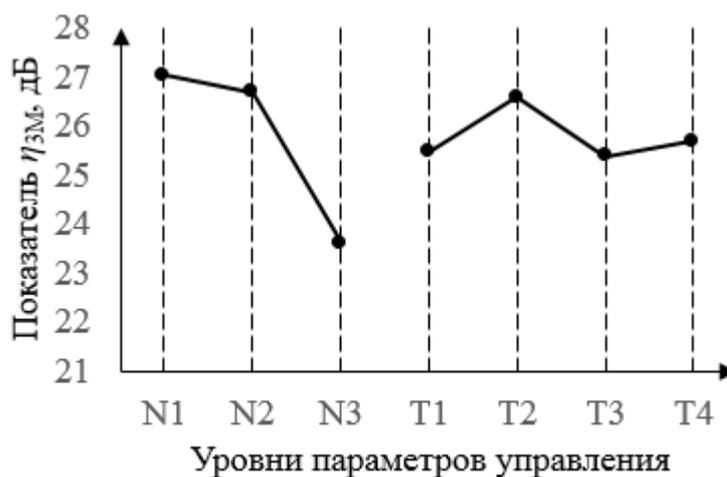


Рисунок 5.22 – Диаграмма эффектов параметров управления по показателю $\eta_{ЗМ}$ (для временного сопротивления)

Из рисунков 5.19, 5.20 видно, что наибольшее влияние на показатель $\eta_{ЗМ}$ оказывает установленная тяга: увеличение тяги приводит к снижению показателя $\eta_{ЗМ}$.



Рисунок 5.23 – Диаграмма эффектов параметров управления по временному сопротивлению σ_B

В таблицах 5.14 и 5.15 представлены результаты робастного эксперимента для условного предела текучести. Графическая интерпретация результатов представлена на рисунках 5.24-5.26.

Таблица 5.14 – Робастный эксперимент для условного предела текучести

№ эксперимента	Уровень		Значение отклика, Н/мм ²	Технологическая неопределенность, Н/мм ²	Показатель $\eta_{зм}$, дБ
	для установленной тяги N	для температуры T			
1	1	1	1588	24	18,17
2	1	2	1500	20	18,67
3	1	3	1445	18	19,00
4	1	4	1386	16	19,37
5	2	1	1572	19	19,25
6	2	2	1492	15	20,01
7	2	3	1442	13	20,56
8	2	4	1389	11	21,21
9	3	1	1562	13	20,74
10	3	2	1491	9	22,03
11	3	3	1446	7	23,05
12	3	4	1398	5	24,47

Таблица 5.15 – Средние значения показателей эксперимента (для условного предела текучести)

Параметр управления	Уровень	$\bar{\eta}_{3M}$, дБ	$\Delta\bar{\eta}_{3M}$, дБ	\bar{y} , Н/мм ²	$\Delta\bar{y}$, Н/мм ²
Установленная тяга N	1	18,80	3,77	1480	6
	2	20,26		1474	
	3	22,57		1475	
Температура T	1	19,39	2,30	1574	183
	2	20,24		1494	
	3	20,87		1444	
	4	21,69		1391	

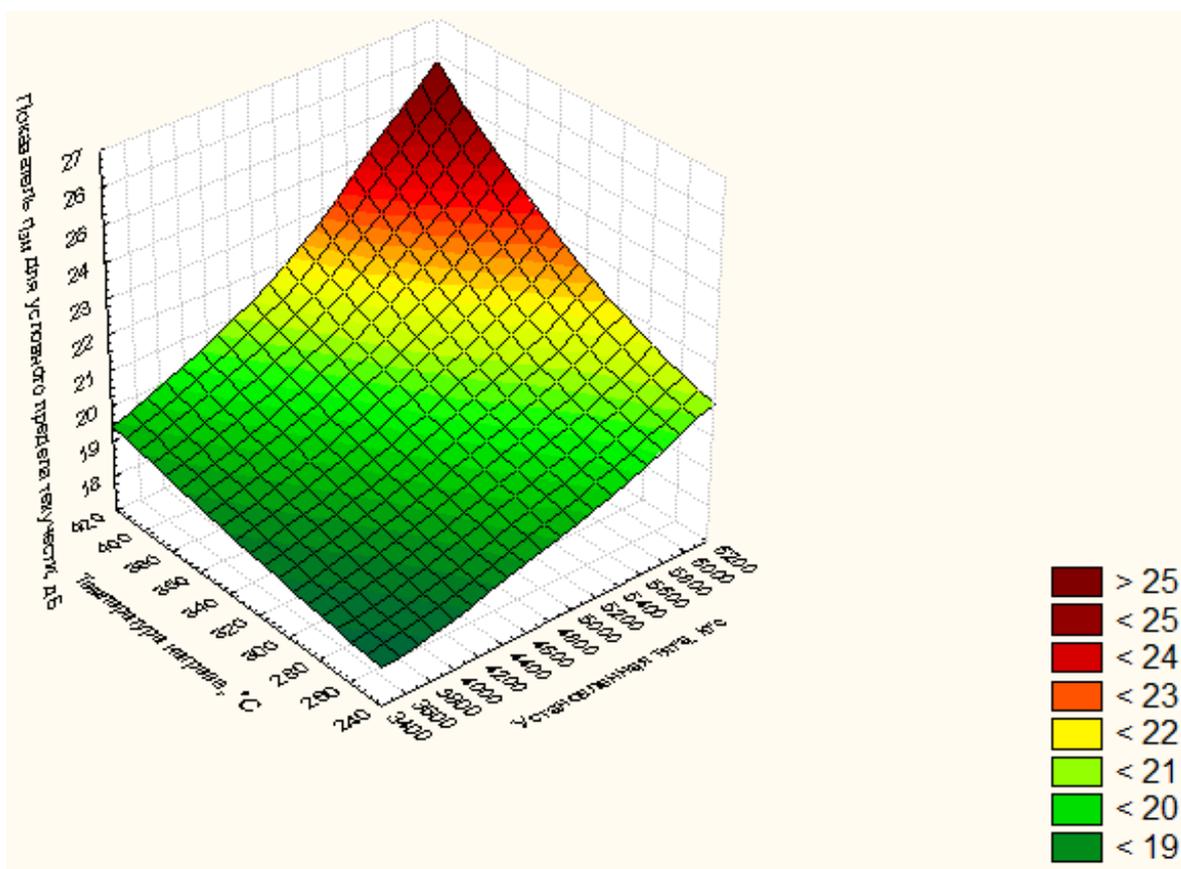


Рисунок 5.24 – Зависимость показателя η_{3M} от параметров управления (для условного предела текучести)



Рисунок 5.25 – Диаграмма эффектов параметров управления
(для условного предела текучести)

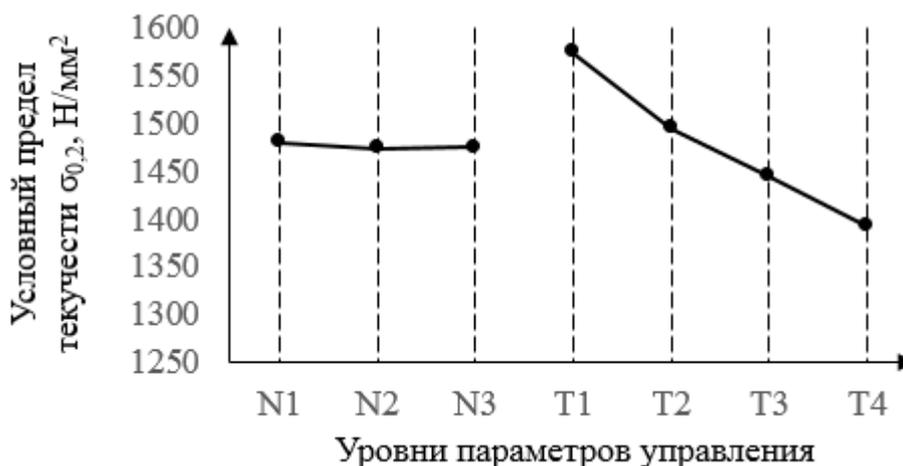


Рисунок 5.26 – Диаграмма эффектов параметров управления
по условному пределу текучести $\sigma_{0,2}$

По результатам проведенного эксперимента для условного предела текучести можно сделать вывод, что наибольшее влияние на показатель $\eta_{ЗМ}$ оказывает установленная тяга: увеличение тяги приводит к повышению показателя $\eta_{ЗМ}$.

В таблицах 5.16 и 5.17 представлены результаты эксперимента для относительного удлинения. Графическая интерпретация результатов приведена на рисунках 5.27-5.29.

Таблица 5.16 – Матрица планирования эксперимента (для относительного удлинения)

№ эксперимента	Уровень		Значение отклика, %	Технологическая неопределенность, %	Показатель $\eta_{зм}$, дБ
	для установленной тяги N	для температуры T			
1	1	1	5,87	0,40	11,65
2	1	2	6,90	0,32	13,36
3	1	3	7,06	0,27	14,17
4	1	4	6,90	0,22	14,92
5	2	1	5,89	0,09	18,39
6	2	2	7,02	0,002	35,79
7	2	3	7,23	0,05	21,97
8	2	4	7,13	0,09	18,81
9	3	1	5,37	0,23	13,67
10	3	2	6,59	0,31	13,21
11	3	3	6,86	0,36	12,77
12	3	4	6,81	0,41	12,20

Таблица 5.17 – Средние значения показателей эксперимента (для относительного удлинения)

Параметр управления	Уровень	$\bar{\eta}_{зм}$, дБ	$\Delta\bar{\eta}_{зм}$, дБ	\bar{y} , %	$\Delta\bar{y}$, %
Установленная тяга N	1	13,52	10,78	6,68	0,41
	2	23,74		6,82	
	3	12,96		6,41	
Температура T	1	14,57	6,22	5,71	1,34
	2	20,79		6,84	
	3	16,30		7,05	
	4	15,31		6,95	

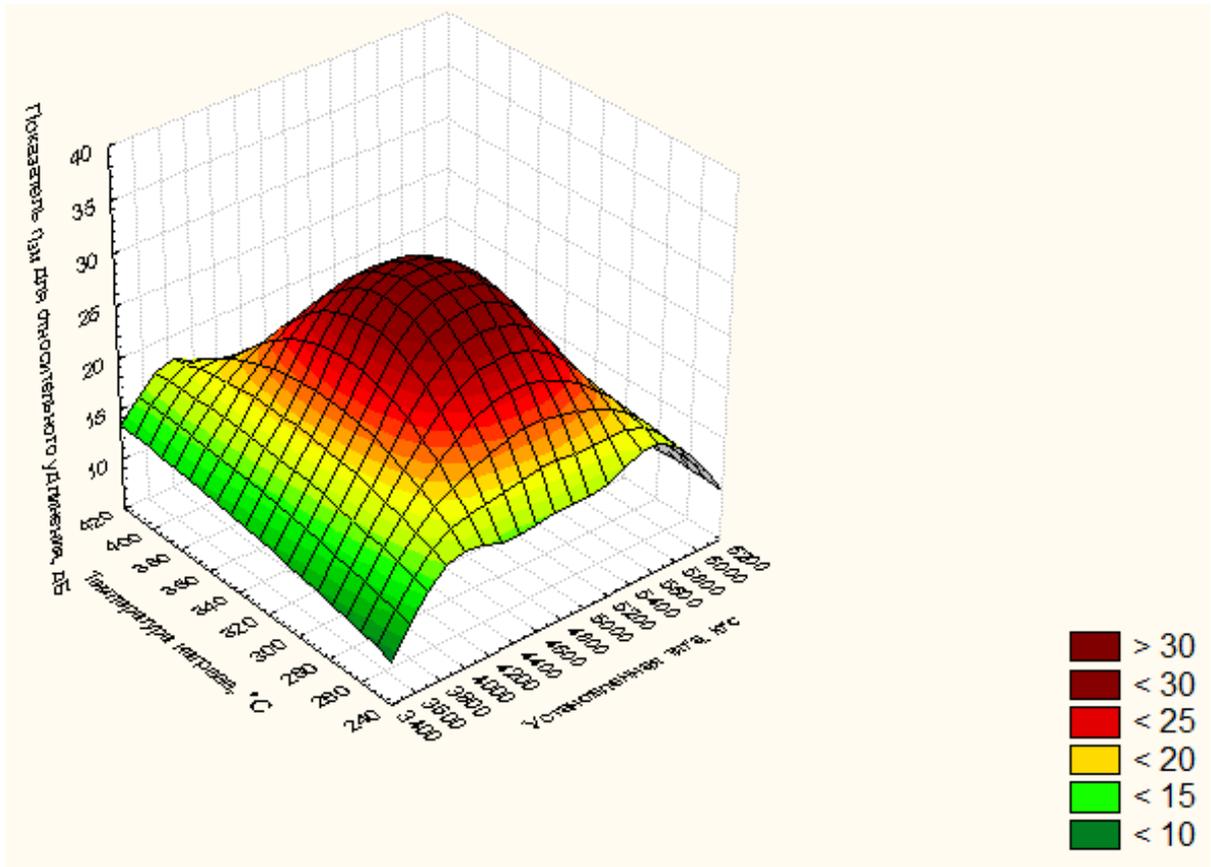


Рисунок 5.27 – Зависимость показателя $\eta_{ЗМ}$ от параметров управления
(для относительного удлинения)



Рисунок 5.28 – Диаграмма эффектов параметров управления
по показателю $\eta_{ЗМ}$ (для относительного удлинения)

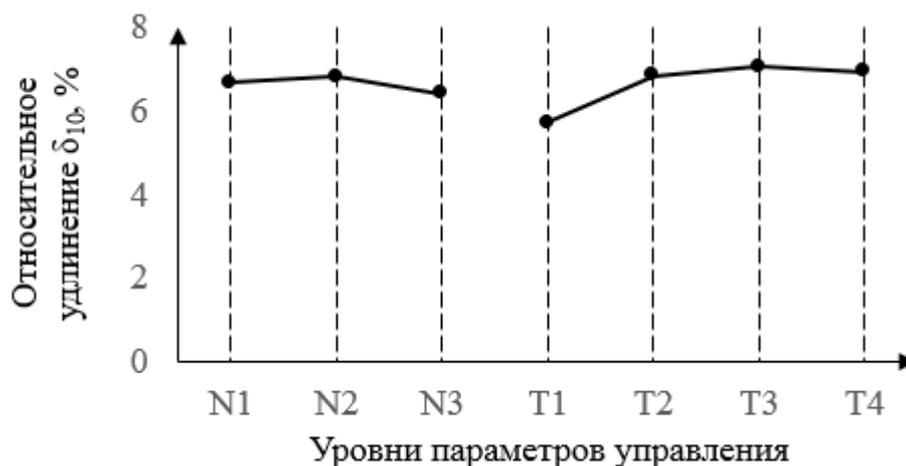


Рисунок 5.29 – Диаграмма эффектов параметров управления по относительному удлинению δ_{10}

На первом этапе оптимизации необходимо выбрать оптимальный режим, обеспечивающий наибольшее значение показателя технологической устойчивости операции стабилизации высокопрочной арматуры. Для расчета данного показателя проведено ранжирование показателей механических свойств и расчет коэффициентов значимости в соответствии с методикой, изложенной в п. 2.4.2. Результаты представлены в таблице 5.18.

Таблица 5.18 – Результаты ранжирования показателей механических свойств высокопрочной арматуры

Показатель качества	Разрывное усилие Р, Н	Временное сопротивление σ_B , Н/мм ²	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	Относительное удлинение δ_{10} , %
Ранг	7	8	8	7
Коэффициент значимости	0,23	0,27	0,27	0,23

В таблице 5.19 приведены расчеты показателя технологической устойчивости операции стабилизации, полученные при различных комбинациях параметров управления.

Таблица 5.19 – Результаты расчета показателя технологической устойчивости операции стабилизации высокопрочной арматуры

№ эксперимента	$\eta_{3M}(P)$, дБ	$\eta_{3M}(\sigma_B)$, дБ	$\eta_{3M}(\sigma_{0,2})$, дБ	$\eta_{3M}(\delta_{10})$, дБ	Показатель устойчивости θ , дБ
1	23,00	21,83	18,17	11,65	18,75
2	26,99	24,83	18,67	13,36	21,02
3	35,90	28,49	19,00	14,17	24,34
4	28,13	33,02	19,37	14,92	24,01
5	32,70	25,88	19,25	18,39	23,95
6	26,02	31,63	20,01	35,79	28,19
7	23,67	25,86	20,56	21,97	23,03
8	22,10	23,40	21,21	18,81	21,44
9	24,05	28,68	20,74	13,67	21,98
10	21,54	23,33	22,03	13,21	20,20
11	20,52	21,80	23,05	12,77	19,73
12	19,64	20,62	24,47	12,20	19,46

По результатам расчетов можно сделать вывод, что максимальное значение показателя устойчивости операции стабилизации $\theta = 28,19$ дБ достигается в эксперименте № 6 (N2T2).

На рисунке 5.30 представлена зависимость показателя технологической устойчивости θ от параметров управления.

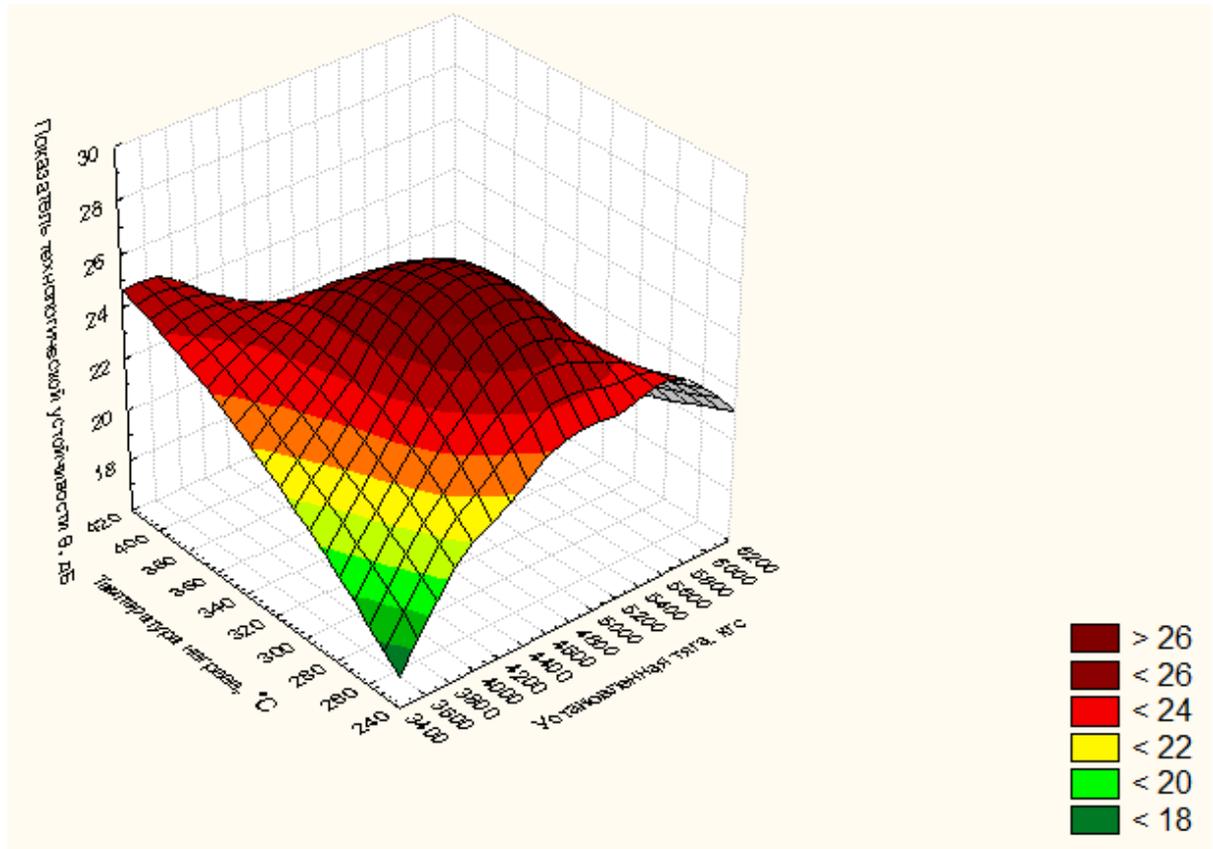


Рисунок 5.30 – Зависимость показателя технологической устойчивости θ операции стабилизации от параметров управления

В таблице 5.20 приведены средние значения показателя технологической устойчивости процесса при различных уровнях параметров управления. На рисунке 5.31 приведена диаграмма эффектов параметров управления по показателю технологической устойчивости операции стабилизации.

Таблица 5.20 – Средние значения показателя технологической устойчивости операции стабилизации

Параметр управления	Уровень	$\bar{\theta}$, дБ	$\Delta\bar{\theta}$, дБ
Установленная тяга N	1	22,03	3,81
	2	24,15	
	3	20,34	
Температура T	1	21,56	1,58
	2	23,14	
	3	22,37	
	4	21,64	



Рисунок 5.31 – Диаграмма эффектов параметров управления по показателю технологической устойчивости

По результатам расчетов область технологической устойчивости операции стабилизации определяется границами [26,78; 28,19], в которые попадает эксперимент № 6 с комбинацией параметров управления (N2T2). Следовательно, на данном этапе оптимизация завершается.

Оптимальный технологический режим операции стабилизации высокопрочной арматуры для железобетонных шпал приведен в таблице 5.21.

Таблица 5.21 – Оптимальный технологический режим стабилизации высокопрочной арматуры диаметром 9,6 мм по ТУ 0930-011-01115863-2008

Параметр управления	Значение
Установленная тяга N , кгс	4750
Температура T , °С	320

Проведена оценка соответствия показателей качества высокопрочной арматуры, получаемых при оптимальном технологическом режиме, требованиям ТУ 0930-011-01115863-2008 (см. таблицу 5.22).

Таблица 5.22 – Оценка соответствия показателей качества высокопрочной арматуры требованиям

ТУ 0930-011-01115863-2008

Показатель качества	Возмущающий фактор	Технологическая неопределенность	Вклад, %	Фактический допуск	Требуемый допуск	Оценка соответствия требованиям	Мероприятие по снижению технологической неопределенности
Разрывное усилие P , Н	ξ_{3M}^P	32,4	0,2	[125413; 126895]	Не менее 90000	Соответствует	Не требуется
	ξ_{4M}^P	740,0	99,8				
	ξ_{Σ}^P	740,7	-				
Временное сопротивление σ_B , Н/мм ²	$\xi_{3M}^{\sigma_B}$	19,1	84,4	[1678; 1719]	Не менее 1570	Соответствует	Не требуется
	$\xi_{4M}^{\sigma_B}$	8,2	15,6				
	$\xi_{\Sigma}^{\sigma_B}$	20,7	-				
Условный предел текучести, $\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	$\xi_{3M}^{\sigma_{0,2}}$	27,0	88,6	[1416; 1473]	Не менее 1400	Соответствует	Не требуется
	$\xi_{4M}^{\sigma_{0,2}}$	9,7	11,4				
	$\xi_{\Sigma}^{\sigma_{0,2}}$	28,7	-				
Относительное удлинение при разрыве δ_{10} , %	ξ_{3M}^{γ}	0,3	87,7	[6,8; 7,3]	Не менее 6	Соответствует	Не требуется
	ξ_{4M}^{γ}	0,1	12,3				
	ξ_{Σ}^{γ}	0,3	-				
Твердость, HRC	ξ_{4M}^{HRC}	0,6	100	[41,4; 42,6]	Не более 44	Соответствует	Не требуется
	ξ_{Σ}^{HRC}	0,6	-				

По результатам оценки можно сделать вывод о соответствии всех показателей качества высокопрочной арматуры требованиям потребителя.

Для подтверждения результатов оптимизации проведен контрольный эксперимент (таблица 5.23).

Таблица 5.23 – Результаты контрольного эксперимента

Показатель	Базовые условия		Оптимальные условия		Прирост		
	Расчетное значение	Проверочное значение	Расчетное значение	Проверочное значение	Расчетное значение	Проверочное значение	
Показатель технологической устойчивости	19,46	19,87	28,19	28,32	8,73	8,45	
Показатели качества	Разрывное усилие P , Н	123630	124919	128170	133341	4540	8422
	Временное сопротивление σ_B , Н/мм ²	1674	1734	1726	1777	52	43
	Условный предел текучести, $\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	1398	1431	1492	1501	94	70
	Относительное удлинение при разрыве δ_{10} , %	6,8	6,9	7	7,1	0,2	0,2

Результаты контрольного эксперимента подтверждают повышение показателя технологической устойчивости операции стабилизации и улучшение показателей качества высокопрочной арматуры.

5.5 Реализация усовершенствованного режима стабилизации высокопрочной арматуры

Проведенный комплекс мероприятий, направленный на совершенствование режима стабилизации высокопрочной арматуры, позволил спроектировать оптимальные режимы обработки, которые были реализованы в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ».

В качестве исходной заготовки использовали горячекатаный прокат диаметром 16 мм из стали 80P производства ПАО «ММК».

Патентирование катанки осуществляли по следующим режимам:

- температура печи по зонам: I – 1020 °С, II – 1020 °С, III – 1000 °С, IV – 970 °С;

- температура ванны расплава свинца 550...560° С;

- скорость движения катанки через агрегат патентирования 4,6...4,8 м/мин.

Подготовку поверхности подката перед волочением проводили по технологическим инструкциям, действующим на предприятии. Волочение осуществляли по следующему маршруту: 16,0 мм → 14,78 мм → 13,48 мм → 12,38 мм → 11,46 мм → 10,68 мм → 9,98 мм. Скорость волочения составляла 2,5 м/с. В процессе волочения использовались волокна производства фирмы «KONER» с полууглом рабочего конуса 4...6°. В качестве смазочных материалов использовали TRAXIT TR 41 и Tecno lubre FM/501. Холоднодеформированная проволока-заготовка имела следующий комплекс механических свойств: временное сопротивление $\sigma_b = 1627 \text{ Н/мм}^2$, относительное удлинение при разрыве $\delta_{10} = 4,5 \%$.

Проволоку-заготовку диаметром 9,98 мм подвергали профилированию с последующим отпуском под натяжением по следующему режиму:

- температура нагрева 320 °С;

- усилие натяжения 4750 кгс;

- скорость обработки 50...60 м/мин.

В таблице 5.24 представлены механические свойства стабилизированной высокопрочной арматуры, произведенной по усовершенствованному режиму стабилизации.

Таблица 5.24 – Механические свойства высокопрочной арматуры диаметром 9,6 мм по ТУ 0930-011-01115863-2008

Характеристика	Значение
Разрывное усилие резьбового конца стержня при длине свинчивания ≥ 25 мм P , Н, не менее	126020
Временное сопротивление σ_B , Н/мм ² , не менее	1685
Условный предел текучести, $\sigma_{0,2}$, Н/мм ² , не менее	1465
Относительное удлинение при разрыве δ_{10} , %, не менее	7
Твердость, HRC, не более	42

Дополнительно были проведены исследования специальных свойств стабилизированной высокопрочной арматуры. Испытания на релаксационную стойкость проводились по методике ГОСТ 28334 «Проволока и канаты стальные для армирования предварительно напряженных железобетонных конструкций. Метод испытания на релаксацию при постоянной деформации» при начальной нагрузке 70% от временного сопротивления. Релаксация напряжений на базе выдержки до 1000 часов в образцах высокопрочной арматуры составила 2,8 %.

Испытания для оценки усталостной прочности проводили при осевом растяжении под действием повторяющейся пульсирующей нагрузке при следующих параметрах: максимальное усилие цикла $P_{\max} = 81,8$ кН; размах цикла усилий $\Delta P = 13,1$ кН; максимальное значение напряжений

$\sigma_{\max} = 180$ МПа. Испытания проводили на пульсаторе с контролем усилий при частоте приложения нагрузки 8 Гц. По результатам испытаний арматура выдержала не менее 2,0 млн. циклов.

Испытания коррозионной стойкости были проведены с постоянным в течение 100 часов контактом арматуры с коррозионной средой (600 частей по массе азотного кальция, 50 частей по массе азотнокислого аммония) при напряжении, равном 1280 МПа. После испытаний коррозионных растрескиваний обнаружено не было.

Результаты испытаний механических и специальных свойств показали, что полученная арматура по уровню качества соответствует ведущим мировым аналогам.

5.6 Выводы по главе

1. Получены математические модели, описывающие взаимосвязь параметров управления операции стабилизации с показателями механических свойств арматуры для железобетонных шпал диаметром 9,6 мм, обеспечивающие формирование заданного комплекса свойств готовой продукции.

2. Проведена процедура идентификации возмущающих факторов, вызывающих вариабельность механических свойств высокопрочной арматуры на операции стабилизации. Проведены экспериментальные исследования и получены зависимости технологической неопределенности показателей качества арматуры для железобетонных шпал. Получена количественная оценка технологической неопределенности установленной тяги и температуры нагрева высокопрочной арматуры.

3. На основе выполненных исследований осуществлено робастное параметрическое проектирование операции стабилизации высокопрочной арматуры диаметром 9,6 мм и определены оптимальные режимы, обеспечивающие заданный уровень показателей качества по механическим свойствам.

4. Разработана и реализована в ОАО «ММК-МЕТИЗ» усовершенствованная операция стабилизации, обеспечивающая повышение эффективности по показателю технологической устойчивости и уровню показателей качества высокопрочной арматуры диаметром 9,6 мм по ТУ 0930-011-01115863-2008, используемой для армирования железобетонных шпал.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 управ-

ления 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, определяемой с помощью ранжирования по степени воздействия на завод-изготовитель, завод-получатель и конечного пользователя.

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 в 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 требуемого уровня показателей качества готовой продукции.

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, обеспечивающие формирование заданного комплекса потребительских свойств готовой продукции. 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 требуемого уровня показателей качества готовой продукции, применяемой в качестве напрягаемой арматуры в предварительно напряженных железобетонных конструкциях.

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 определены оптимальные режимы обработки, обеспечивающие заданный уровень механических свойств.

6. 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 (Приложения А-Е), 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) (Приложение Ж).

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВХ – входной параметр

ВФ – возмущающий фактор

МГТУ им. Г.И. Носова – Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

НТД – нормативно-технический документ

ОАО «ММК-МЕТИЗ» – Открытое акционерное общество «Магнитогорский метизно-калибровочный завод «ММК-МЕТИЗ»

Отношение SN – отношение сигнал/шум

П – параметр

ПАО «ММК» – Публичное акционерное общество «Магнитогорский металлургический комбинат»

ПК – показатель качества

ПУ – параметр управления

ХМ – характеристика материала

ЖБШ – железобетонная шпала

1М – категория «Оборудование»

2М – категория «Персонал»

3М – категория «Метод управления»

4М – категория «Измерение»

FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) – анализ видов и последствий отказов

GRA (Gray Relational Analysis) – серый реляционный анализ

GRR – сходимость и воспроизводимость результатов измерений

MSA (Measurement Systems Analysis) – анализ измерительных систем

RPD (Robust parameter design) – робастное параметрическое проектирование

SPC (Statistical Process Control) – статистическое управление процессом

\bar{P} – среднее арифметическое значение параметра

В – характеристики передельной заготовки

d – диаметр

$F_{\text{табл}}$ – табличный критерий Фишера

F_p – расчетный критерий Фишера

k_α – коэффициент толерантности

N – установленная тяга

P – разрывное усилие

$P_{\sigma,1}$ – нагрузка при условном пределе текучести

ΔP_r – потери напряжения от релаксации

R – ранг значимости показателя качества

R^2 – коэффициент детерминации

T – температура

t – время

U – параметры управления

u – значение параметра управления

V – параметры качества исходной заготовки

v – значение характеристики материала

v^N – номинальное значение характеристики материала

V – скорость

W – уравнения, связывающие переменные

Y – показатели качества

y – значение показателя качества

y_{base} – значение показателя качества при базовых условиях проектирования

y_{opt} – значение показателя качества при оптимальных условиях проектирования

y_{max} – максимально допустимое значение показателя качества

y_{min} – минимально допустимое значение показателя качества

$y'_{basemax}$ – максимальное значение показателя качества в выборке при базовых условиях проектирования

$y'_{basemin}$ – минимальное значение показателя качества в выборке при базовых условиях проектирования

y'_{optmax} – максимальное значение показателя качества в выборке при базовых условиях проектирования

y'_{optmin} – минимальное значение показателя качества в выборке при базовых условиях проектирования

\bar{y} – среднее значение показателя качества

Δy – прирост показателя качества

$\Delta y'$ – проверочный прирост показателя качества

$\Delta \bar{y}$ – градиент показателя качества

z – нормированное значение показателя качества

α – коэффициент значимости показателя качества

β – коэффициент, задающий область технологической устойчивости

γ – общая реляционная оценка множественных характеристик качества

$\delta(\Pi)$ – технологическая неопределенность параметра

$\delta_{\mathfrak{S}}(\Pi)$ – технологическая неопределенность параметра, вызываемая возмущающими факторами категории \mathfrak{S}

δ_{10} – относительное удлинение при разрыве

$\delta_{изм}$ – погрешность средства измерения

δ_{max} – полное относительное удлинение при максимальной нагрузке

δ'_{base} – технологическая неопределенность при базовых условиях проектирования

δ'_{opt} – технологическая неопределенность при оптимальных условиях проектирования

ε – серый реляционный коэффициент

$\varepsilon_{в}$ – величина обжата при волочении

η – отношение сигнал шум

η_{3M} – отношение сигнал шум метода управления

η'_{3M} – проверочное значение отношения сигнал шум метода управления

$\overline{\eta_{3M}}$ – среднее значение показателя сигнал шум метода управления

$\Delta\overline{\eta_{3M}}$ – градиент показателя сигнал шум метода управления

θ – показатель технологической устойчивости

θ_{base} – значение показателя технологической устойчивости при базовых условиях проектирования

θ_{opt} – значение показателя технологической устойчивости при оптимальных условиях проектирования

θ'_{base} – проверочное значение показателя технологической устойчивости при базовых условиях проектирования

θ'_{opt} – проверочное значение показателя технологической устойчивости при оптимальных условиях проектирования

$\Delta\theta$ – прирост показателя технологической устойчивости

$\Delta\theta'$ – проверочный прирост показателя технологической устойчивости

\mathfrak{X} – технологическая схема процесса

ξ – возмущающий фактор

$\xi_{\mathfrak{S}}^{BX}$ – возмущающий фактор категории \mathfrak{S} , воздействующий на входные параметры процесса

$\xi_{\mathfrak{S}}^{PK}$ – возмущающий фактор категории \mathfrak{S} , воздействующий на показатели качества

$\sigma_{0,1}, \sigma_{0,2}$ – условный предел текучести

σ_b – временное сопротивление

φ – коэффициент отличия

ψ – относительное сужение

$\omega_{\mathfrak{S}}(\Pi)$ – вклад возмущающего фактора категории \mathfrak{S} в общую неопределенность параметра

\mathfrak{S} – категория 1M÷4M

$g(\cdot)$ – оператор технологических ограничений

$\mathfrak{M}(\cdot)$ – оператор модели

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пономарева, О.С. Тенденции развития и структура российского рынка метизной продукции / О.С. Пономарева, Д.Б. Симаков, Ю.Г. Терентьева // Перспективы науки. – 2016. – № 12. – С. 23-26.
2. Коптева, Л.А. Проблемы и пути выхода на внешние рынки предприятий по производству метизов Донецкой Народной Республики / Л.А. Коптева, Л.В. Шабалина, И.В. Коробков // Конкурентоспособность субъектов хозяйствования в условиях новых вызовов внешней среды: проблемы и пути их решения. – 2018. – 246 с.
3. Семенов, В.Л. Формирование факторов повышения качества продукции с применением методов прогнозирования / В.Л. Семенов // Вестник Чувашского университета. – 2012. – № 2. – С. 477-481.
4. Семенов, В.Л. Реализация «Голоса потребителя», «Дерева свойств» и «Дерева функций» в рамках повышения параметров качества продукции / В.Л. Семенов // Вестник Чувашского университета. – 2012. – № 4. – С. 454-460.
5. Гугис, Н.Н. Основные тенденции развития производства проката, труб и метизов в период 2017-2019 гг. / Н.Н. Гугис // Metallurg. – 2019. – № 12. – С. 4-13.
6. Дидевич, А. Продукция «Северстали» - строительной отрасли, или разумная универсальность метизов / А. Дидевич // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2011. – № 4 (147). – С. 20-22.
7. Зиновьева, Е.Г. Оценка рынка метизной промышленности / Е.Г. Зиновьева, Н.Н. Костина, С.В. Коптякова // Экономика и предпринимательство. – 2020. – № 9 (122). – С. 813-820.
8. Яранцев, Б.М. Метизная отрасль - часть российской экономики // Деловая слава России. – 2013. – № 2 (40). – С. 24-27.

9. Ерофеев, В.С. Проблемы и пути развития метизного производства в России / В.С. Ерофеев, Р.Б. Фейгинов // Черные металлы. – 2009. – № 1. – С. 8-10.

10. Производство метизов на предприятиях РФ «ММК-МЕТИЗ» на рынке метизов / С.В. Кривошеков, А.Д. Носов, Д.Н. Бахчеев, В.П. Прохоренко, М.В. Холопова, С.Я. Унру, Е.Л. Кандауров // Metallurg. – 2006. – № 2. – С. 10-13.

11. Радионова, Л.В. Современное состояние и перспективы развития волоочильного производства стальной проволоки / Л.В. Радионова, А.А. Радионов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2013. – № 1. – С. 3-11.

12. Базин, С.А. Анализ видов и последствий потенциальных отказов процесса производства метизных изделий / С.А. Базин, Т.П. Киселёва // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 2/3 (286). – С. 128-132.

13. Чичко, А.Н. О новом подходе к оценке вкладов различных этапов технологического цикла в систему контроля качества метизной продукции / А.Н. Чичко, Л.А. Феклистова, В.Ф. Соболев // Литьё и металлургия. – 2009. – № 3. – С. 50-56.

14. Михайловский, И.А. Анализ качества автомобильных компонентов и используемых в процессе их производства операций ОМД путем иерархической декомпозиции качества / И.А. Михайловский, Е.И. Гун // Известия ТГУ. Технические науки. – 2014. – № 10-1. – С. 143-149.

15. Михайловский, И.А. Учет технологических рисков при анализе качества продукции путем иерархической декомпозиции качества / И.А. Михайловский, Е.И. Гун // Качество в обработке материалов. – 2014. – № 2 (2). – С. 33-38.

16. Белан, А.К. Оборудование и технологии изготовления крепежных изделий в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ» / А.К. Белан, О.А. Белан // Механическое оборудование металлургических заводов. – 2015. – № 2. – С. 36-41.

17. Корчунов, А.Г. Математические модели управления показателями качества продукции в технологических процессах обработки / А.Г. Корчунов // Качество в обработке материалов. – 2015. – № 1 (3). – С. 62-67.

18. Кабулова, Е.Г. Интеллектуальное управление многостадийными системами металлургического производства / Е.Г. Кабулова // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2019. – Т. 7. – № 1. – С. 341-351.

19. Рожков, И.М. Математические модели для выбора рациональной технологии и управления качеством стали / И.М. Рожков, С.А. Власов, Г.Н. Мулько. – М.: Металлургия, 1990. – 184 с.

20. Адаптивные подходы к конструированию технологических процессов и управлению качеством металлопродукции / М.В. Чукин, Э.М. Голубчик, А.Г. Корчунов и др. – СПб.: Питер, – 2016. – 464 с.

21. Кабулова, Е. Г. Модель интеграции разнородной информации при управлении сложными технологическими системами в условиях неопределенности / Е.Г. Кабулова // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2018. – Т. 22. – № 4. – С. 104-111.

22. Брагин, Ю.В. Идея робастного проектирования / Ю.В. Брагин // Методы менеджмента качества. – 2006. – № 12. – С. 18-24.

23. Taguchi G. Taguchi's Quality Engineering Handbook / G. Taguchi, S. Chowdhury, Y. Wu. – New Jersey, Hoboken, – 2005. – 1629 p.

24. Дубровин, В.И. Офлайновые методы управления качеством / В.И. Дубровин, Г.В. Табунщик // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 1999. – № 1. – С. 120-123.

25. Дубровин, В.И. Проектирование качества: допусковый анализ / В.И. Дубровин, Г.В. Табунщик // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2000. – Т. 3, – № 1. – С 149-152.

26. Табунщик, Г.В. Использование робастного планирования эксперимента в задачах технической диагностики // Вестник двигателестроения. – 2006. – № 1. – С. 54-58

27. Табунщик, Г.В. Робастное планирование эксперимента в задачах моделирования технических объектов // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2004. – Т. 11. – № 1. – С. 90-94.

28. ГОСТ Р ИСО 16336-2020. Статистические методы. Применение к новым технологиям и процессу разработки продукции. Робастное параметрическое проектирование (RPD). – М.: Стандартинформ, 2020. – 66 с.

29. Варжапетян, А.Г. Современные инструменты менеджмента качества. Робастное проектирование. Ч.1: учебное пособие / А.Г. Варжапетян. – СПб.: ГУАП, 2008. – 172 с.

30. Брагин, Ю.В. Методология робастного проектирования по Тагути / Ю.В. Брагин // Методы менеджмента качества. – 2006. – № 11. – С. 31-36.

31. Брагин, Ю.В. Робастная оптимизация производственного процесса / Ю.В. Брагин // Методы менеджмента качества. – 2007. – № 3. – С. 35-41.

32. Брагин, Ю.В. Сопоставление традиционного и робастного подходов к проектированию / Ю.В. Брагин // Методы менеджмента качества. – 2007. – № 2. – С. 8-12.

33. Кузнецов, Л. А. Обобщенная мера оценки качества / Л. А. Кузнецов // Методы менеджмента качества. – 2007. – № 4, – С. 42-47.

34. Применение дифференциального метода оценки уровня качества продукции / Д.А. Запорожцева, Н.Л. Клейменова, А.Н. Пегина, Л.И. Назина // Международный студенческий научный вестник. – 2021. – № 2. – С. 115.

35. Развитие комплексной оценки качества сортопрокатной металлопродукции / А.Б. Моллер, С.А. Левандовский, А.В. Найденова, И.В. Логинова // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – № 2.– С. 42-46.

36. Волченко, В.Н. Вероятность и достоверность оценки качества металлопродукции / В.Н. Волченко. – М.: Metallurgia, 1979. – 88 с.

37. Обломец, В.П. Модель управления производством на основе интегрированных ключевых показателей / В.П. Обломец, Е.Г. Филиппов, О.С. Логунова // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2011. – № 1-2. – С. 88-96.

38. Азгальдов, Г.Г. О квалиметрии / Г.Г. Азгальдов, Э. П. Райхман. – М.: Изд-во стандартов, 1977. – 247 с.

39. К вопросу комплексной оценки качества металлопроката /М.Е. Фрейдензон, Б.П. Соколкин, И.Я. Винокуров и др. // Сталь. – 1977. – № 1.– С. 82-84.

40. Сосновский, С. А. Статистический критерий качества материалов и методика его определения / С.А. Сосновский // Заводская лаборатория. – 1973. – № 12. – С. 1508-1514.

41. Ткаченко, В.А. Управление качеством продукции в трубной промышленности / В.А. Ткаченко, В.П. Сокурченко, В.М. Ворона // Черная металлургия. Бюллетень НТИ. – 1977. – № 7. – С. 16-25.

42. Генезис научных исследований в области качества металлопродукции / Г.С. Гун, И.Ю. Мезин, Г.Ш. Рубин и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2014. – Т. 45. № 1. – С. 92-96.

43. Актуальные проблемы квалиметрии метизного производства в период зарождения шестого технологического уклада / Г.С. Гун, М.В. Чукин, Г.Ш. Рубин, И.Ю. Мезин, А.Г. Корчунов //Металлург. – 2014. – № 4. – С. 92-95.

44. Функционально-целевой анализ как метод структурирования свойств и функций металлоизделий / Г.Ш. Рубин, М.В. Чукин, Г.С. Гун, М.А. Полякова // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2016. – Т. 59. – № 10. – С. 715-719.

45. Рубин, Г.Ш. Стандартизация метизной продукции: особенности, проблемы, перспективы развития / Г.Ш. Рубин, Г.С. Гун, М.А. Полякова // Известия ТГУ. Технические науки. – 2014. – Вып. 10. – Ч. 2. – С. 27-34.

46. Стеблов, А.Б. Комплексный показатель качества металлопроката и его применение / А.Б. Стеблов // Литьё и металлургия. – 2017. – Т. 86. – № 1. С. 97-102.

47. Рубин, Г.Ш. Комплексная оценка качества стальной канатной проволоки / Г.Ш. Рубин, Г.С. Гун, Е.А. Пудов // Сталь. – 1983. – № 1. – С. 56.

48. Разработка теории квалиметрии метизного производства / Г.Ш. Рубин, М.В. Чукин, Г.С. Гун, Д.М. Закиров, И.Г. Гун // Черные металлы. – 2012. – № 7. – С. 15-20.

49. Закиров, Д.М. Развитие теории оценки качества и практики производства метизов автомобильного назначения на основе разработки конкурентоспособных технологий: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Д.М. Закиров; Магнитогорск. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова. – Белебей, 2008. – 350 с.

50. Румянцев, М. И. Унифицированный подход к расчету дифференциальных оценок при квалиметрическом оценивании качества проката / М.И. Румянцев, А.С. Цепкин, Т. В. Оплачко // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2007. – № 3. – С. 39-42.

51. Сравнение методов прогнозирования деформационного упрочнения металла при автоматизированном проектировании режимов холодной прокатки / М.И. Румянцев, И.Г. Шубин, В.С. Митасов, В.В. Насонов // Вест-

ник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2012. – № 2. – С. 39-42.

52. Рубин, Г.Ш. Функционально-целевой анализ качества изделий / Г.Ш. Рубин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2011. – № 2 (34). – С. 29-30.

53. Рубин, Г.Ш. Стандартизация метизной продукции: особенности, проблемы, перспективы развития / Г.Ш. Рубин, Г.С. Гун, М.А. Полякова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2014. – № 10-2. – С. 27-34.

54. Гун, Г.С. Управление качеством в метизном производстве / Г.С. Гун, М.В. Чукин, Г.Ш. Рубин // Metallurgical processes and equipment. – 2013. – № 4 (34). – С. 106-111.

55. Данилова, Ю.В. Поиск консенсуса между потребителем и производителем - важный этап при разработке нормативных документов / Ю.В. Данилова, М.А. Полякова, Г.Ш. Рубин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2015. – Т.50. – № 2. – С. 79-84.

56. Барбашова, Е.В. Статистический подход к формированию функции желательности в задачах экономико-математического моделирования / Е.В. Барбашова, Т.А. Чекулина, В.Г. Шуметов // Вестник ОрелГИЭТ. – 2015. – № 2. – С. 94-100.

57. Любушин, Н.П. Использование обобщенной функции желательности Харрингтона в многопараметрических экономических задачах / Н.П. Любушин, Г.Е. Брикач // Экономический анализ: теория и практика. – 2014. – Т. 370. – № 18. С. 2-10.

58. Юсупова, Г.Ф. Использование функции желательности в оценке уровня техносферной безопасности территории / Г.Ф. Юсупова // Социально-

экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. – 2017. – № 3. – С. 67-81.

59. Пичкалев, А.В. Обобщенная функция желательности Харрингтона для сравнительного анализа технических средств /А.В. Пичкалев // Космические аппараты и технологии. – 2012. – № 1. – С.25-28.

60. Адлер, Ю.П. Сравнение результатов построения обобщенного параметра оптимизации процесса с помощью функций Харрингтона и Тагути / Ю.П. Адлер, Г.В. Стасова [Электронный ресурс] // 17-й Ежегодный международный семинар «Непрерывное совершенствование деятельности организаций» – М.: МИСИС, 2012. – 12 с.

61. Беднова, О.В. Использование функции желательности Харингтона для оптимизации многокритериальной оценки состояния лесных экосистем в условиях урбанизированной территории / О.В. Беднова //Лесной вестник. – 2011. – № 7 – С. 35-40.

62. Integrated Taguchi-GRA-RSM optimization and ANN modelling of thermal performance of zinc oxide nanofluids in an automobile radiator /Abdul Razak Kaladgi, Asif Afzal, A. Muthu Manokar, Deepak Thakur, Umit Agbulut, Saad Alshahrani, Ahamed Saleel C, Ram Subbiah // Case Studies in Thermal Engineering. – 2021. –Vol. 26. – P. 101068. DOI:10.1016/j.csite.2021.101068

63. Durairaj, M. Analysis of Process Parameters in Wire EDM with Stainless Steel using Single Objective Taguchi Method and Multi Objective Grey Relational Grade /M. Durairaj, D. Sudharsun, N. Swamynathan. // Procedia Engineering. – 2013. – Vol. 64. – P. 868-877. DOI:10.1016/j.proeng.2013.09.163

64. Адлер, Ю.П. Проблемы применения методов статистического управления процессами на отечественных предприятиях / Ю.П. Адлер, С.Ф. Жулинский, В.Л. Шпер // Методы менеджмента качества. – 2009. – № 9.– С. 34-38.

65. Исаев, С.В. Внедрение методик статистического управления процессами и анализа измерительных систем / С.В. Исаев // Методы менеджмента качества. – 2006. – № 9. – С. 39-41.

66. Носов, А.Д. Формирование заданного уровня качества самонарезающих винтов на основе разработанных статистических моделей в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ» / А.Д. Носов, Ф.Т. Вахитова // Производство проката. – 2009. – № 6. – С. 22-25.

67. Клочков, Ю.С. Методика оценки уровня качества производственного процесса / Ю.С. Клочков // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. ГИ Носова. – 2010. – № 4. – С. 62-64.

68. Ломакин, М. И. Оценка качества продукции в условиях потребительской неопределенности / М.И. Ломакин, Е.В. Глушакова // Транспортное дело России. – 2014. – № 5. – С. 145-147.

69. Мостовой, Я.А. Статистические феномены больших распределённых кластеров наноспутников / Я.А. Мостовой // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2011. – № 2(26). – С. 80-90.

70. Жариков, Р.В. Системная модель оценки и повышения качества машиностроительной продукции / Р.В. Жариков // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2016. – № 1. – С. 58-62.

71. Прохоренко, В.М. Научно-техническая проблема автоматизированного контроля качества сварных соединений / В.М. Прохоренко, И.М. Чертов, В.О. Гаевский // Вісник ДДМА. – 2012. – № 3. – С. 236-240.

72. Особенности применения методов статистического управления (SPC) в многофакторных технологических процессах производства топливных таблеток / А.Н. Самохвалов, Е.Н. Михеев, Ю.Л. Ярополов, Е.С. Платоно-

ва // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2018. – № 4(95). – С. 95-108.

73. SPC. Статистическое управление процессами. Ссылочное руководство. Перевод с английского второго издания от июля 2005 г. – Н. Новгород: ООО СМЦ «Приоритет», 2012. – 424 с. (официальное двуязычное издание).

74. Розенталь, Р.М. Результаты внедрения SPC: только факты / Р.М. Розенталь // Методы менеджмента качества. – 2010. – № 6. – С. 45-60.

75. Певзнер, М.З. Возможности статистического мониторинга в непрерывном производстве / М.З. Певзнер // Методы менеджмента качества. – 2009. – № 11. – С. 44-48.

76. Рекуррентные нейронные сети и методы оптимизации проектных технологических процессов в АСТПП машиностроительного производства / С.Н. Поезжалова, С.Г. Селиванов, О.А. Бородкина, К.С. Кузнецова // Вестник УГАТУ. – 2011. – Т. 15. – № 5(45). – С. 36-46.

77. Разработка композиций химического состава и технологии широкополосной прокатки микролегированных трубных сталей категории прочности X80 / В.М. Салганик, А.М. Песин, В.И. Тимошенко, А.В. Титов, С.В. Денисов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2009. – № 2. – С. 59-63.

78. Разработка критериальной оценки эффективности процессов интенсивной пластической деформации конструкционных углеродистых сталей / М.В. Чукин, А.Г. Корчунов, М.А. Полякова, А.В. Лысенин, А.Е. Гулин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2015. – Т. 56. – № 2. – С. 46-51.

79. Оптимизация процессов деформирования слоистых материалов в условиях математической неопределённости / М.В. Чукин, С.Ф. Рашников,

Ю.А. Щербо, И.В. Ситников // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. ГИ Носова. – 2005. – № 3 (11). – С.62-65.

80. Осипов, С.Н. О стохастической оценке результатов волнового просвечивания твердых материалов при малом количестве измерений / С.Н. Осипов // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2015. – № 3. – С. 60-68.

81. Мамонтова, М.Ю. Стохастические модели управления качеством результатов обучения: ограничения и перспективы использования / М.Ю. Мамонтова // Образование и наука. Известия УРО РАО. – 2009. – № 6(63). – С. 21-35.

82. Методы управления качеством инновационных технологических процессов / В.А. Васильев и др. // Качество. Инновации. Образование. – 2016. – № 8-10. – С. 56-60.

83. Носов, А.Д. Моделирование сквозных технологий на основе нечетких отображений / А.Д. Носов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2009. – № 1 (25). – С. 69-72.

84. Корчунов, А.Г. Методология управления показателями качества продукции в технологиях метизного производства на основе моделей с элементами нечеткой логики: автореф. дис. ...д-ра техн. наук / А.Г. Корчунов; Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. – Магнитогорск, 2010. – 38 с.

85. Чукин, М.В. Магнитогорская школа качества (научный обзор) / М.В. Чукин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallургия. – 2015. – Т.15. – № 2. – С. 49-56.

86. Методологический подход к управлению качеством метизной продукции, основанный на нечетких множествах / Г.Ш. Рубин, Ф.Т. Вахитова, В.Н. Лебедев, Е.Н. Гусева, А.А. Шишов // Вестник Магнитогорского госу-

дарственного технического университета им. Г.И. Носова.– 2009. – № 4 (28).– С. 50-53.

87. Корчунов, А.Г. Управление качеством продукции металлургии в условиях нечеткости технологической информации /А.Г. Корчунов // Обработка сплошных и слоистых материалов. –2011. – № 1. – С. 95-100.

88. Корчунов, А.Г. К вопросу обеспечения качества продукции в технологиях метизного производства / А.Г. Корчунов // Metallurg. – № 10. – 2008. – С. 67-72.

89. Корчунов, А.Г. Управление качеством металлургической продукции на основе моделей с элементами нечеткой логики / А.Г. Корчунов, А.В. Лысенин //Когнитивный анализ и управление развитием ситуаций (CASC'2011). – 2011. – С. 212-218.

90. Кулеша, В.А. Разработка научных основ формирования свойств высококачественных метизов и создание эффективных технологий их производства: автореф. дис. ...д-ра техн. наук / В.А. Кулеша; Белорецкий металлургич. комбинат. – Москва, 2000. – 69 с.

91. Голубчик, Э.М. Применение принципов технологической адаптации при управлении показателями качества в многовариантной технологической системе изготовления холоднокатаной ленты / Э.М. Голубчик, В.Е. Телегин, Г.Ш. Рубин // Качество в обработке материалов. – 2014. – № 1(1). – С. 34 - 41.

92. Голубчик, Э.М. Адаптивное управление качеством металлопродукции / Э.М. Голубчик // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. – 2014. – № 1. – С. 63-68.

93. Голубчик, Э.М. Современные концепции адаптивного управления качеством металлопродукции /Э.М. Голубчик, // Качество в обработке материалов. – 2015. – № 1 (3). – С. 68 - 75.

94. Применение модели и принципов технологической адаптации показателей качества в процессах производства метизной продукции / Э.М. Голубчик, А.С. Кузнецова, Г.Ш. Рубин, Г.С. Гун, Х. Дья // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2016. – № 1. – С. 101-108.

95. Мелехин, В.Б. Многоуровневая модель ситуационного управления технологическими процессами обработки деталей в машиностроении / В.Б. Мелехин, В.М. Хачумов // Проблемы управления. – 2019. – № 1. С. 73-81.

96. Кузьмин, А.М. Методы Тагути /А. М.Кузьмин // Методы менеджмента качества. – 2007. – № 5. – С. 23.

97. Управление качеством. Робастное проектирование // Метод Тагути: [пер. с англ.]: Монография / Р. Леон и др. – М.: Сейфи, 2002. – 384 с.

98. M. Balaji. Optimization of Cutting Parameters in Drilling of AISI 304 Stainless Steel Using Taguchi and ANOVA / M. Balaji, B.S.N. Murthy, Rao N. Mohan // Procedia Technology. – 2016. – Vol.25. – P.1106-1113. DOI:10.1016/j.protcy.2016.08.217

99. Робастный подход к логистическому инжинирингу на этапах концептуального проектирования / Н.З. Базылева, Р.А. Панов, А.Ф. Можиль, М.С. Володькин, И.А. Богачев, Н.Д. Шурупов // Нефтяное хозяйство. – 2019.– № 1. – С. 104-108.

100. Токарев, В.Е. Современная методология проектирования и разработки научно-технической продукции / В.Е. Токарев, Г.Г. Кобко // Горизонты экономики. – 2014. – № 6 (18). – С. 39-44.

101. H. Albetran. Characterization and optimization of electrospun TiO₂/PVP nanofibers using Taguchi design of experiment method /H. Albetran, Y. Dong, I. M. Low // Journal of Asian Ceramic Societies. – September 2015. – Volume 3. Iss. 3. – P. 292-300. DOI:10.1016/j.jascer.2015.05.001

102. Xavier Sánchez-Sánchez. Processing of ultra-high molecular weight polyethylene/graphite composites by ultrasonic injection moulding: Taguchi optimization / Sánchez-Sánchez Xavier, Alex Elias-Zuñiga, Marcelo Hernández-Avila // *Ultrasonics Sonochemistry*. – June 2018. – Vol. 44. – P. 350-358. DOI:10.1016/j.ultsonch.2018.02.042

103. Analysis of the effects of fabrication parameters on the mechanical properties of Areca fine fiber-reinforced phenol formaldehyde composite using Taguchi technique / Chrispin Das Mohan Das, Athijayamani Ayyanar, Sidhardhan Susaiyappan, Ramanathan Kalimuthu // *Journal of Applied Research and Technology*. – 2017. – Vol. 15. – Iss. 4. – P. 365-370. DOI:10.1016/j.jart.2017.03.003

104. P. Bharath. Optimization of 316 Stainless Steel Weld Joint Characteristics using Taguchi Technique / P. Bharath, V.G. Sridhar, M. Senthil kumar // *Procedia Engineering*. – 2014. – Vol. 97. – P. 881-891. DOI:10.1016/j.proeng.2014.12.363

105. Brajesh Kumar Lodhi. Optimization of Machining Parameters in WEDM of AISI D3 Steel Using Taguchi Technique / Kumar Lodhi Brajesh, SanjayAgarwal // *Procedia CIRP*. – 2014. – Vol. 14. – P. 194-199. DOI:10.1016/j.procir.2014.03.080

106. Wear Behavior in Dry Sliding of Inconel 600 Alloy Using Taguchi Method and Regression Analysis / J. Vaishal Banker, Jitendra M. Mistry, Malhar R.T hakor, Bhargav H. Upadhyay // *Procedia Technology*. – 2016. – Vol. 23. – P. 383-390. DOI:10.1016/j.protcy.2016.03.041

107. Zulfiqar Ali Raza. Multi-response optimization of rhamnolipid production using grey rational analysis in Taguchi method / Zulfiqar Ali Raza, Naseer Ahmad, Shahid Kamal // *Biotechnology Reports*. – September 2014. – Vol. 3. DOI:10.1016/j.btre.2014.06.007

108. Разумов-Раздолов, К.Л. Применение робастной оптимизации при проектировании /К.Л. Разумов-Раздолов, И.В. Волокитина // Известия ТГУ. Технические науки. – 2008. – № 1. – С. 223-228.

109. Разумов-Раздолов, К.Л. Управление качеством при проектировании изделий / К.Л. Разумов-Раздолов // Известия ТГУ. Технические науки. – 2008.– № 1. – С. 252-257.

110. Адлер, Ю.П. Методы Тагути: технология качества. Часть 2. Робастное проектирование / Ю.П. Адлер // Методы менеджмента качества. – 2020. – № 10. – С. 30-35.

111. Лисенков, А.Н. Инжиниринговый подход к обеспечению качества / А.Н. Лисенков // Методы менеджмента качества. – 2016. –№ 10. – С. 26-32.

112. Лисенков, А.Н. О многокритериальной оценке качества / А.Н. Лисенков // Методы менеджмента качества. – 2007. – № 6. – С. 10-16.

113. Лисенков, А.Н. Робастное проектирование: использование ортогональных планов неполного перебора вариантов / А.Н. Лисенков // Методы менеджмента качества. – 2007. – № 5. – С. 18-22.

114. Лисенков, А.Н. Многокритериальная оценка объектов управления в организациях железнодорожного транспорта / А.Н. Лисенков, М.А. Стомба// Методы менеджмента качества. – 2008. – № 9. – С. 30-38.

115. Design Optimization of the Robot Manipulator Based on Global Performance Indices Using the Grey-based Taguchi Method /Hyun-seopLim, Soonwoong Hwang, Kyoo-sik Shin, Chang-soo Han // IFAC Proceedings Volumes. – 2010. – Vol. 43. – Iss. 18. – P. 285-292. DOI:10.3182/20100913-3-US-2015.00078

116. EDM investigation of Al 7075 alloy reinforced with B4C and fly ash nanoparticles and parametric optimization for sustainable production /Sweety Mahanta, M. Chandrasekaran, Sutanu Samanta, R. M. Arunachalam // Journal of the

Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – Article 2018. – Vol. 40. – Iss. 263. DOI:10.1007/s40430-018-1191-8

117. Evaluation of Mechanical Properties of Epoxy/Nanoclay/Multi-Walled Carbon Nanotube Nanocomposites using Taguchi Method /K.Z.K. Ahmad, S. Hj. Ahmad, M.A. Tarawneh, P.R. Apte // *Procedia Chemistry*. – 2012. – Vol. 4. – P. 80-86. DOI:10.1016/j.proche.2012.06.012

118. Evaluation of wear resistance of Vanadis23 PM steel subjected to cryogenic treatment // *Materials Today: Proceedings*. – 2021.– Vol. 46. – Part 17. – P. 7170-7174. DOI:10.1016/j.matpr.2020.11.335

119. Electrical Discharge Machining on Biodegradable AZ31 Magnesium Alloy Using Taguchi Method /M.A. Razak, A.M. Abdul-Rani, T.V.V.L.N. Rao, S.R. Pedapati, S. Kamal // *Procedia Engineering*. – 2016. – Vol. 148. – P. 916-922. DOI:10.1016/j.proeng.2016.06.501

120. Лунева, Е.Е. Использование метода робастного проектирования Тагути для оптимизации бизнес-процессов / Е.Е. Лунева, Е.А. Дмитриева, Г.П. Цапко // *Экономика, статистика и информатика. Вестник УМО*. – 2011. – № 3. – С. 193-197.

121. Богомолова, С.А. Применение методологии робастного параметрического проектирования при разработке методик измерений / С.А. Богомолова // *Законодательная и прикладная метрология*. – 2021. – № 2(170). – С. 44-48.

122. Богомолова, С.А. Применение робастного параметрического проектирования при разработке методики количественного химического анализа в металлургическом производстве / С.А. Богомолова, И.В. Муравьева // *Метрология*. – 2021. – № 3. – С. 48-61.

123. Erratum to “Taguchi-fuzzy multi output optimization (MOO) in high speed CNC turning of AISI P-20 tool steel” [Exp. Syst. Appl. 38(6) (2011) 6822–6828] / Jonathan D. Linton, Quanhong Jiang, Christopher J. Gatti, Mark J. Em-

brechts // Expert Systems with Applications. – March 2013. – Vol. 40. – Iss. 4. – P. 1408-1409. DOI:10.1016/j.eswa.2012.08.043

124. Efficiency Improvement of Blood Supply Chain System Using Taguchi Method and Dynamic Simulation /Seyed Mojib Zahraee, Jafri Mohd Rohani, Alireza Firouzi, Ataollah Shahpanah // Procedia Manufacturing. – 2015. – Vol. 2. – P. 1-5. DOI:10.1016/j.promfg.2015.07.001

125. Effect and Optimization of Machine Process Parameters on MRR for EN19 & EN41 Materials Using Taguchi /Vikas, Shashikant, A.K.Roy, Kaushik Kumar // Procedia Technology. – 2014. – Vol. 14. – P. 204-210. DOI:10.1016/j.protcy.2014.08.027

126. Effects of calcined clay, sawdust ash and chemical admixtures on Strength and Properties of concrete for pavement and flooring applications using Taguchi approach /Temitope Funmilayo Awolusi, Adebayo Olatunbosun Sojobi, Daniel Oluwafemi Oguntayo, Olufunke O. Akinkurolere, B.O. Orogbade // Case Studies in Construction Materials. – December 2021. – Vol. 15. – e00568. DOI:10.1016/j.cscm.2021.e00568

127. Fong-Jung Yu. Economic-Statistical Design of X-bar Control Charts Using Taguchi Loss Functions /Fong-Jung Yu, Hsuan-Kai Chen. // IFAC Proceedings Volumes. – 2009. – Vol. 42. Iss. 4. – P. 1719-1723. DOI:10.3182/20090603-3-RU-2001.0098

128. Vijay Kumar S. Jatti. Taguchi Approach for Diamond-like Carbon Film Processing /Vijay Kumar S. Jatti, Meena Laad, T.P. Singh // Procedia Materials Science. – 2014. – Vol. 6. – P. 1017-1023. DOI:10.1016/j.mspro.2014.07.172

129. Vijaykumar S. Jatti. Multi-characteristics optimization in EDM of NiTi alloy, NiCu alloy and BeCu alloy using Taguchi's approach and utility concept /Vijaykumar S. Jatti // Alexandria Engineering Journal. – December 2018. – Vol. 57. – Iss. 4. – P. 2807-2817. DOI:10.1016/j.aej.2017.11.004

130. Жуков, А.Д. Локальная аналитическая оптимизация технологических процессов / А.Д. Жуков, А.В. Чугунков // Вестник МГСУ. – 2011. – № 1-2. – С. 273–278.

131. Жуматаева, Ж.Е. Исследование робастной устойчивости системы управления летательным аппаратом /Ж.Е. Жуматаева // Труды МАИ. – 2012. – № 53. – 13 с.

132. Hamid Eskandari-Naddaf. Performance evaluation of dry-pressed concrete curbs with variable cement grades by using Taguchi method /Hamid Eskandari-Naddaf, Mohammad Azimi-Pour // Ain Shams Engineering Journal.– December 2018.– Vol. 9. – Iss. 4. – P. 1357-1364. DOI:10.1016/j.asej.2016.09.004

133. Hamid Reza Pouretedal. Modification of RDX and HMX crystals in procedure of solvent/anti-solvent by statistical methods of Taguchi analysis design and MLR technique /Hamid Reza Pouretedal, Sajjad Damiri, Abolfazl Shahsavan // Defence Technology. – February 2018. – Vol. 14. – Iss. 1. – P. 59-63. DOI:10.1016/j.dt.2017.08.003

134. Hari Vasudevana. Multiobjective Optimization of Drilling Characteristics for NEMA G-11 GFRP/Epoxy Composite using Desirability coupled with Taguchi Method /Hari Vasudevana , Ramesh R. Rajgurub, Naresh C. Deshpande // Procedia Engineering. – 2014. – Vol. 97. – P. 522-530. DOI:10.1016/j.proeng.2014.12.278

135. Huu - Phan Nguyen. Single objective optimization of die- sinking electrical discharge machining with low frequency vibration assigned on workpiece by Taguchi method /Huu - Phan Nguyen, Van - Dong Pham // Journal of King Saud University - Engineering Sciences. – January 2021. – Vol. 33. – Iss. 1. – P. 37-42. DOI:10.1016/j.jksues.2019.11.001

136. Ikuo Tanabea. Development of Innovative Tool Using Taguchi-methods / Ikuo Tanabea, Hideki Sakamoto, Kazuhide Miyamoto // AASRI Procedia. – 2014. – Vol. 9. – P. 107-113. DOI:10.1016/j.aasri.2014.09.018

137. Thermal performance evaluation of an integrated photovoltaic thermal-phase change material system using Taguchi method /Haoshan Ren, Wenye Lin, Zhenjun Ma, Wenke Fan, Xiaolin Wang // Energy Procedia. – September 2017. – Vol. 121. – P. 118-125. DOI:10.1016/j.egypro.2017.08.008

138. The Taguchi Method and Conditions for its Implementation in High Performance Athletic Training // Procedia - Social and Behavioral Sciences. – March 2014. – Vol. 117 – Iss. 19. – P. 378-382. DOI:10.1016/j.sbspro.2014.02.231

139. Use of Taguchi DOE for CFD Simulation to maximize the Reusability of Working Fluids of Centrifugal Filter /Pooja Tambolkar, Aishwarya Ponkshe, Vrushali Mulay, Anand Bewoor // Procedia Manufacturing. – 2020. – Vol. 46. – P. 608-614. DOI:10.1016/j.promfg.2020.03.087

140. Vaibhav Gaikwad. Optimization of material removal rate during electrical discharge machining of cryo-treated NiTi alloys using Taguchi's method /Vaibhav Gaikwad, S.Jatti VijayKumar // Journal of King Saud University - Engineering Sciences. – July 2018. – Vol. 30. – Iss. 3. – P. 266-272. DOI:10.1016/j.jksues.2016.04.003

141. Кирин, Ю.П. Робастное управление технологическими процессами производства губчатого титана /Ю.П. Кирин, В.В. Кирьянов // Проблемы управления. – 2016. – № 6, – С.71-79.

142. Горяшко, А.П. Робастная оптимизация, как новый подход к решению задач с неопределенностью /А.П. Горяшко, Е.В. Никульчев // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. – 2011. – № 1. – С. 77-86.

143. Дронов, П.А. О робастном проектировании смесительных элементов камеры жидкостного ракетного двигателя / П.А. Дронов //Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7. – №3. – С. 82-85.

144. Jia-Ping Tien. Hybrid Taguchi-chaos of multilevel immune and the artificial bee colony algorithm for parameter identification of chaotic systems / Jia-Ping Tien, Tzoo-Hseng S. Li. // *Computers & Mathematics with Applications*. – September 2012. – Vol. 64. – Iss. 5. – P. 1108-1119 DOI:10.1016/j.camwa.2012.03.029

145. J. Sudeepan. Study of Friction and Wear of ABS/Zno Polymer Composite Using Taguchi Technique /J. Sudeepan, K. Kumar, T.K. Barman, P. Sahoo // *Procedia Materials Science*. – 2014. Vol. 6. – P. 391-400. DOI:10.1016/j.mspro.2014.07.050

146. Levent Subasi. Multi objective optimization of water jet guided laser micro drilling on Inconel 718 using Taguchi Method /Levent Subasi, Mustafa I. Gokler, UlasYaman // *Procedia CIRP*. – 2020. – Vol. 94. – P. 505-510. DOI:10.1016/j.procir.2020.09.172

147. Lokman Yünlü. Taguchi DOE Analysis of Surface Integrity for High Pressure Jet Assisted Machining of Inconel 718 /Lokman Yünlü, Oğuz Çolak, Cahit Kurbanoglu // *Procedia CIRP*. – 2014. – Vol. 13. – P. 333-338. DOI:10.1016/j.procir.2014.04.056

148. Taguchi analysis for sliding wear characteristics of carbon nanotube-flyash reinforced aluminium nanocomposites // *Heliyon*. – 2021. – Vol. 7. – Iss. 2. e06170. DOI:10.1016/j.heliyon.2021.e06170

149. Thanapat Sangkharat. Spinning Process Design Using Finite Element Analysis and Taguchi Method /Thanapat Sangkharat, Surangsee Dechjarern. // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 207. – P. 1713-1718. DOI:10.1016/j.proeng.2017.10.927

150. Паляничко, Д.А. Применение робастных методов анализа данных при ограниченном числе наблюдений / Д.А. Паляничко, В.И. Згуря, Р.Г. Папуша // *Электротехнические и компьютерные системы*. – 2012. –№ 6 (82). – С. 34-38.

151. Попков, Ю.С. Оценивание характеристик рандомизированных статистических моделей данных (энтропийно-робастный подход) / Ю. С. Попков, А. Ю. Попков, Ю. Н. Лысак // Автоматика и телемеханика. – 2013. – № 11. – С. 114-131.

152. M. Burton. Systematic design customization of sport wheelchairs using the Taguchi method /M. Burton, A. Subic, M. Mazur, M. Leary // Procedia Engineering. – June 2010. – Vol. 2. – Iss. 2. – P. 2659-2665. DOI:10.1016/j.proeng.2010.04.048

153. Mahmut Altiner. Use of Taguchi approach for synthesis of calcite particles from calcium carbide slag for CO₂ fixation by accelerated mineral carbonation /Mahmut Altiner // Arabian Journal of Chemistry. – May 2019. – Vol. 12. – Iss. 4. – P. 531-540. DOI:10.1016/j.arabjc.2018.02.015

154. Manisha Ketkar. Evaluating and Ranking Candidates for MBA Program: Mahalanobis Taguchi System Approach /Manisha Ketkar, Omkarprasad SVaidya // Procedia Economics and Finance. – 2014. – Vol. 11. – P. 654-664. DOI:10.1016/S2212-5671(14)00231-7

155. Patel G. C. Manjunath Optimization of Squeeze Cast Process Parameters Using Taguchi and Grey Relational Analysis / Patel G. C. Manjunath, Prasad Krishna, Mahesh B. Parappagoudar //Procedia Technology. – 2014. – Vol. 14. – P. 157-164. DOI:10.1016/j.protcy.2014.08.021

156. T. Sathish. Wear behaviour analysis on aluminium alloy 7050 with reinforced SiC through taguchi approach /T. Sathish, S. Karthick // Journal of Materials Research and Technology. – May–June 2020. – Vol. 9. – Iss. 3. – P. 3481-3487. DOI:10.1016/j.jmrt.2020.01.085

157. Shivkant Tilekar. Process Parameter Optimization of Wire EDM on Aluminum and Mild Steel by Using Taguchi Method /Shivkant Tilekar, Sankha Shuvra Das, P.K. Patowari // Procedia Materials Science. – 2014. – Vol. 5. – P. 2577-2584. DOI:10.1016/j.mspro.2014.07.518

158. Малышев, М.А. Методы проектирования робастных систем управления / М.А. Малышев, Н.Н. Евсеев // Вестник Науки и Творчества. – 2016.– № 11(11). – С. 138-144.

159. Нестеренко, Д.В. Взаимосвязь робастного проектирования и бережливого проектирования в авиакосмической промышленности / Д.В. Нестеренко, А.Е. Чаманкина // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2017. –Т. 3. – № 13. – С. 81-82.

160. Multi-response optimization of transesterification parameters of mahogany seed oil using grey relational analysis in Taguchi method for quenching application / R.M. Dodo, T. Ause, E.T. Dauda, U. Shehu, A.P.I. Popoola // FUDMA Journal of Sciences. – 2020. – Vol. 4. – No. 3. – P. 305 - 312. DOI:10.33003/fjs-2020-0403-397

161. Zakir Hussain. Optimization of powder metallurgy processing parameters of Al₂O₃/Cu composite through Taguchi method with Grey relational analysis / Zakir Hussain, Sabah Khan, Pranjal Sarmah // Journal of King Saud University - Engineering Sciences. – May 2020. – Vol. 32. – Iss. 4. – P. 274-286. DOI:10.1016/j.jksues.2019.01.003

162. N. Manikandan. Multiple performance optimization of electrochemical drilling of Inconel 625 using Taguchi based Grey Relational Analysis / N. Manikandan, S. Kumanan, C. Sathiyarayanan // Engineering Science and Technology, an International Journal. – April 2017. – Vol. 20. – Iss. 2. – P. 662-671. DOI:10.1016/j.jestch.2016.12.002

163. Дзедик, В.А. Экономический анализ процессов СМК с использованием функции потерь / В.А. Дзедик // Методы менеджмента качества – 2015. – № 3. – С. 48-51.

164. Nabendu Ghosh. Parametric Optimization of MIG Welding on 316L Austenitic Stainless Steel by Grey-based Taguchi Method /Nabendu Ghosh, Pradip

Kumar Pal, Goutam Nandi // *Procedia Technology*. – 2016. – Vol. 25. – P. 1038-1048. DOI:10.1016/j.protcy.2016.08.204

165. Naif Alsaadi. Design and optimization of bimorph energy harvester based on Taguchi and ANOVA approaches / Naif Alsaadi, Muhammad Abdullah Sheeraz // *Alexandria Engineering Journal*. – February 2020. – Vol. 59. – Iss. 1. – P. 117-127. DOI:10.1016/j.aej.2019.12.016

166. Sanchit Kumar Khare. Optimization of Machining Parameters in Turning of AISI 4340 Steel under Cryogenic Condition using Taguchi Technique / Sanchit Kumar Khare, Sanjay Agarwal // *Procedia CIRP*. – 2017. – Vol. 63. – P. 610-614. DOI:10.1016/j.procir.2017.03.166

167. Sapana S. Madan. Optimization for benzeneacetic acid removal from aqueous solution using CaO₂ nanoparticles based on Taguchi method / Sapana S. Madan, Kailas L. Wasewar // *Journal of Applied Research and Technology*. 2017– Vol. 15 – Iss. 4. 15 – P. 332-339. DOI:10.1016/j.jart.2017.02.007

168. Nesredin Chekole Deresse. Experimental investigation of the effects of process parameters on material removal rate using Taguchi method in external cylindrical grinding operation / Nesredin Chekole Deresse, Vivek Deshpande, Ismail W.R. Taifa // *Engineering Science and Technology, an International Journal*. – April 2020. – Vol. 23. – Iss. 2. – P. 405-420. DOI:10.1016/j.jestch.2019.06.001

169. Optimisation of air-distributor channel structural parameters based on Taguchi orthogonal design / Guozeng Feng, Shuya Lei, Yuejiao Guo, Dachuan Shi, Jiu Bing Shen // *Case Studies in Thermal Engineering*. – October 2020. – Vol. 21. P.100685. DOI:10.1016/j.csite.2020.100685

170. Optimization of engine performance parameters and exhaust emissions in compression ignition engine fueled with biodiesel-alcohol blends using taguchi method, multiple regression and artificial neural network / Tanmaya Agrawal, Raghvendra Gautam, Sudeekcha Agrawal, Vishal Singh, Manish Kumar, Saket

Kumar // Sustainable Futures. – 2020. – Vol. – 2.100039.
DOI:10.1016/j.sftr.2020.100039

171. Optimization of Machining Parameters for end Milling of Inconel 718 Super Alloy Using Taguchi based Grey Relational Analysis / Lohithaksha M. Maiyar, R. Ramanujam, K.Venkatesan, J. Jerald // Procedia Engineering. – 2013. – Vol. 64. – P. 1276-1282. DOI:10.1016/j.proeng.2013.09.208

172. Optimisation of mechanical stir casting parameters for fabrication of carbon nanotubes–aluminium alloy composite through Taguchi method /Hashim Hanizam, Mohd Shukor Salleh, Mohd Zaidi Omar, Abu Bakar Sulong // Journal of Materials Research and Technology. – April 2019. – Vol. 8. – Iss. 2. – P. 2223-2231. DOI:10.1016/j.jmrt.2019.02.008

173. Reddy Sreenivasulu. Optimization of Surface Roughness and Delamination Damage of GFRP Composite Material in End Milling Using Taguchi Design Method and Artificial Neural Network /Reddy Sreenivasulu // Procedia Engineering. – 2013. –Vol. 64. – P.785-794. DOI:10.1016/j.proeng.2013.09.154

174. Sadik Alper Yildizela. Experimental and modelling study of mixture design optimisation of glass fibre-reinforced concrete with combined utilisation of Taguchi and Extreme Vertices Design Techniques / Sadik Alper Yildizela, Bassam A. Tayeh, Gokhan Calis // Journal of Materials Research and Technology. – March-April 2020. – Vol. 9. – Iss. 2. – P. 2093-2106. DOI:10.1016/j.jmrt.2020.02.083

175. Чернова, Ю.К. Первые шаги робастного проектирования в отечественном автомобилестроении /Ю.К. Чернова, В.В. Щипанов // Известия ТПУ. – 2006. – Т. 309. – № 5. – С. 193-197.

176. Масенков, Е.В. Анализ функции потерь водоснабжения с использованием методологии Тагути / Е. В. Масенков, Д. Б. Белов // Качество в производственных и социально-экономических системах. – 2016. – С. 242-246.

177. Чернова, Ю.К. Робастное проектирование как методология создания качественных систем /Ю.К. Чернова, В.В. Щипанов // Наука - производству. – 2005. – № 5. – С. 64-66.

178. Солер, Я.И. Робастное проектирование шлифования плоских деталей различной податливости высокопористыми абразивными инструментами / Я.И. Солер, А.Б. Стрелков, Е.О. Репей // Вестник ИГТУ. – 2016. – № 1 (108). – С. 16-24.

179. Сущенко, О.А. Проектирование робастных систем стабилизации оборудования беспилотных летательных аппаратов /О.А. Сущенко, В.Н. Азарсков // Вестник СГАУ им. академика С.П. Королёва (НИУ). – 2014.– № 1 (43). – С. 80-90.

180. Optimization of PVD process parameter for coating AZ91D magnesium alloy by Taguchi grey approach / M. Sivapragash, P. Kumaradhas, S.C.Vettivel, B. Stanly Jones Retnam // Journal of Magnesium and Alloys. – June 2018. – Vol. 6. – Iss. 2. – P. 171-179. DOI:10.1016/j.jma.2018.02.004

181. Optimization of immersion cooling performance using the Taguchi Method / Ilham Wahyu Kuncoro, Nugroho Agung Pambudi, Muhammad Kunta Biddinika, Cucuk Wawan Budiyanoto // Case Studies in Thermal Engineering. – October 2020. – Vol. 21. – 100729. DOI:10.1016/j.csite.2020.100729

182. Optimization of Operating and Design Parameters on Proton Exchange Membrane Fuel Cell by using Taguchi method / P. Karthikeyan, M. Muthukumar, S. Vignesh Shanmugam, P. Pravin Kumar, Suryanarayanan Murali, A.P. Senthil Kumar // Procedia Engineering. – 2013. – Vol. 64. – P. 409-418. DOI:10.1016/j.proeng.2013.09.114

183. Optimisation of laser welding parameters for welding of P92 material using Taguchi based grey relational analysis / B. Shanmugarajan, Rishabh Shrivastava, P. Sathiya, G. Buvanashakaran // Defence Technology. – August 2016. – Vol. 12. – Iss. 4. – P. 343-350. DOI:10.1016/j.dt.2016.04.001

184. Parametric Optimization in Drilling EN-8 Tool Steel and Drill Wear Monitoring Using Machine Vision Applied with Taguchi Method / Y.D. Chethan, H.V. Ravindra, Y.T. Krishne Gowda, G.D. Mohan Kumar // *Procedia Materials Science*. – 2014. – Vol. 5. – P. 1442-1449. DOI:10.1016/j.mspro.2014.07.463

185. N. Puneeth. Processing and Evaluation of Al6082 based Hybrid Matrix Composites for Fracture Toughness using Taguchi Method / N. Puneeth, J. Satheesh, G. J. Naveen // *Procedia Structural Integrity*. – 2019. – Vol. 14. – P. 53-59. DOI:10.1016/j.prostr.2019.05.008

186. R. Rajesh. Certain performance investigation on hybrid $TiO_2/Al_2O_3/MoS_2$ nanofiller coated $3\varnothing$ induction motor: A Taguchi and RSM based approach / R. Rajesh, S. Sumathi // *Energy Reports*. – November 2020. – Vol. 6. – P. 1638-1647. DOI:10.1016/j.egy.2020.06.016

187. Наконечный, В.С. Метод синтеза функции качества для оптимизации данных о параметрах процесса и продукции при реализации стратегии качество на этапе разработки / В.С. Наконечный, А.И. Терещенко // *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. – 2017. – № 2. – С. 12-19.

188. Талалай, А.М. Задача снижения вариабельности процессов и методы ее решения / А.М. Талалай // *Методы менеджмента качества*. – 2012. – №3. – С. 36-40.

189. Тихомиров, В.П. Применение нейрокомпьютерного робастного проектирования для оптимизации состава фрикционного спеченного порошкового материала / В.П. Тихомиров, Н.Н. Новикова // *Вестник БрГТУ*. – 2014. – № 3 (43). – С. 81-84.

190. Чубарев, И.В. Робастно-адаптивный регулятор для продольного движения высокоскоростного летательного аппарата / И.В. Чубарев, В.А. Леонов // *Труды МАИ*. – 2011. – № 44. – 6 с.

191. Parvesh Antil. Taguchi's Methodology Based Electrochemical Discharge Machining of Polymer Matrix Composites / Parvesh Antil, Sarbjit Singh,

Perminder Jit Singh // *Procedia Manufacturing*. – 2018. – Vol. 26. – P. 469-473.
DOI:10.1016/j.promfg.2018.07.055

192. A.I. Pereira. Taguchi method application in the pilot production phase-a case study / A.I. Pereira, E.C. Martins, M.P. Lopes // *Procedia Manufacturing*. – 2020. – Vol. 51. – P. 1069-1075. DOI:10.1016/j.promfg.2020.10.150

193. Physico-mechanical and Taguchi-designed sliding wear properties of Himalayan agave fiber reinforced polyester composite / Sanjeev Kumar, Lalita Prasad, Sandeep Kumar, Vinay Kumar Patel // *Journal of Materials Research and Technology*. – July-August 2019. – Vol. 8 – Iss. 4. – P. 3662-3671. DOI:10.1016/j.jmrt.2019.06.004

194. Prakash Kumar Sahu. Multi-response optimization of process parameters in friction stir welded AM20 magnesium alloy by Taguchi grey relational analysis / Kumar Sahu Prakash, Pal Sukhomay // *Journal of Magnesium and Alloys*. – March 2015. – Vol. 3. – Iss. 1. – P. 36-46. DOI:10.1016/j.jma.2014.12.002

195. J. Patil Prashant. Analysis of process parameters in surface grinding using single objective Taguchi and multi-objective grey relational grade / J. Patil Prashant, C. R. Patil // *Perspectives in Science*. – September 2016. – Vol. 8. – P. 367-369. DOI:10.1016/j.pisc.2016.04.077

196. Preparation and catalytic activity of bone-char ash decorated with MgO - FeNO₃ for ozonation of reactive black 5 dye from aqueous solution: Taguchi optimization data / Ghorban Asgari, Somaye Akbari, Abdol Motaleb SeidMohammadi, Ali Poormohammadi, Bahman Ramavandi // *Data in Brief*. – August 2017. – Vol. 13. – P. 132-136. DOI:10.1016/j.dib.2017.05.025

197. Process parameters optimization for eco-friendly high strength sand-concrete block using Taguchi method / Chijioke Christopher Ikeagwuani, Donald Chimobi Nwonu, Chiagoziem Kanayo Ugwu, Chukwudi Cajethan Agu // *Heliyon*. – 2020. – Vol. 6, – Iss. 6. – e04276. DOI:10.1016/j.heliyon.2020.e04276

198. Ивахненко, А.А. Инжиниринг качества на основе робастного проектирования /А.А. Ивахненко, Л.М. Червяков //Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2012. – № 2-1. – С. 038-043.

199. Ивахненко, А.А. Планирование качества изделий машиностроения на основе робастного проектирования /А.А. Ивахненко, Л.М. Червяков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2013. – № 4 (300). – С. 131-135.

200. Ивахненко, А.А. Робастная оптимизация при проектировании машиностроительной продукции и технологических процессов / А.А. Ивахненко, Л.М. Червяков //Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2013. – № 1. – С. 55-59.

201. Корнева, М.И. Проведение экспериментов по методу Г. Тагути для определения условий протягивания шестигранной латунной гайки / М.И. Корнева // Известия ТГУ. Технические науки. – 2011. – Ч.2. – № 6. – С. 35-41.

202. Корнева, М.И. Задачи оптимизации процесса отделочной обработки деталей из латуни комбинированным фасонным режущо-деформирующим инструментом /М.И. Корнева, В.Б. Протасьев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: Госуниверситет (УНПК), 2011. – № 6-2 (290) – С. 90-94.

203. Протасьев, В.Б. Методика оценки состояния производственных систем по критерию "сигнал/шум" на примере технологических процессов изготовления продукции из прутковых заготовок / В.Б. Протасьев, Е.В. Плахотникова, И. В. Литвинова // Черные металлы. – 2018. – № 6. – С. 20-25.

204. Протасьев, В.Б. Планирование логического эксперимента по методу Г. Тагути на примере процесса производства картонно-навивных изделий /

В.Б. Протасьев, Е.С. Петренко // Известия ТГУ. Технические науки. – 2012. – № 9. – С. 230-238.

205. Протасьев, В.Б. Пример реализации методики оценки состояния производственных систем по критерию " сигнал/шум" при производстве твердосплавных борфрез / В.Б. Протасьев, Е.В. Плахотникова, В.В. Истоцкий// Вестник БрГТУ. – 2019. – № 1. – С. 15-19.

206. Протасьев, В.Б. Улучшение качества по методам Генити Тагути / В.Б. Протасьев, Е.С. Петренко // Известия ТГУ. Технические науки. – 2011. – № 6-2. – С. 432-436.

207. Русских, И.В. Апробация методики робастного проектирования параметров наладки на операции послышной укладки расплавленной полимерной нити /И.В. Русских, А.С. Русских, Д.В. Ермилина // Известия ТГУ. Технические науки. – 2020. – № 6. – С. 231-237.

208. Серенков, П.С. Концепция робастного проектирования процессов в рамках системы менеджмента качества / П.С. Серенков, В.М. Романчик, Э.М. Короневич // Стандартизация. – 2004. – № 2. –С. 64-67.

209. Сыротюк, С.Д. Верификация процессов формирования компетентного ядра смарт-системы и оценка его уровня качества на основе робастного подхода / С.Д. Сыротюк // Азимут научных исследований: педагогика и психология. – 2019. – Т. 8. – № 2(27). – С. 244-247.

210. Система глубинных знаний Э. Деминга и возможности ее использования в России / В. Б. Протасьев и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. ГИ Носова. – 2019. – Т. 17.– № 3.– С. 54-59.

211. Благовещенская, М.М. Идентификационный аспект в методологии создания систем управления технологическими объектами с нестационарными параметрами /М.М. Благовещенская, В.В. Макаров // Вестник Воронеж-

ского государственного университета инженерных технологий. – 2014. – № 1. – С.85-89.

212. Максимов, Ю.П. Проектирование сложных технических систем в условиях априорной неопределенности / Ю.П. Максимов // Проектирование и технология электронных средств. – 2009. – № 3. – С. 28-33.

213. Антонов, А.В. Системный анализ: учебник для вузов / А.В. Антонов. – М.: Высшая школа, 2004. – 454 с. – ISBN: 5-06-004862-4.

214. Пономарев, В.Б. Математическое моделирование технологических процессов: курс лекций / В.Б. Пономарев, А.Б. Лошкарев Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2006. – 113 с.

215. Основы математического моделирования и оптимизации процессов и систем очистки и регенерации воздуха: учебное пособие / С.И. Дворецкий, С.В. Матвеев, С.Б. Путин, Е.Н. Туголуков. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – 324 с.

216. Дилигенский, Н.В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности: технология, экономика, экология: монография / Н.В. Дилигенский, Л.Г. Дымова, П.В. Севостьянов. – М.: Машиностроение - 1, – 2004. – 335 с.

217. Компьютерное моделирование технологических процессов и систем / С.И. Дворецкий, Ю.Л. Муромцев, В.А. Погонин, А.Г. Схиртладзе. – Тамбов: ТГТУ, 2006. – 158 с.

218. Белолипецкий, В.М. Математическое моделирование процесса электролитического получения алюминия для решения задач управления технологией / В.М. Белолипецкий, Т.В. Пискажова // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2015. – № 4. – С. 59-63.

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

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

221. 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. – № 3. – С. 84-89.

222. 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.

223. Пивоварова, К.Г. Управление показателями качества метизной продукции с использованием принципов робастного проектирования / К.Г. Пивоварова, А.Г. Корчунов // В сборнике: Современные проблемы и перспективы развития науки, техники и образования. Материалы I Национальной научно-практической конференции. 2020. – С. 720-723.

224. 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.

225. 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.

226. Боголюбов, А.Н. Основы математического моделирования / А.Н. Боголюбов – М.: МГУ, 2003. – 137 с.

227. Выгодчикова, И.Ю. Алгоритм оценки параметров линейной множественной модели регрессии по минимаксному критерию / И. Ю. Выгодчикова // Прикладная информатика. – 2015. – Т. 58. № 4. – 12 с.

228. Зарубин, В.С. Особенности математического моделирования технических устройств /В.С. Зарубин, Г.Н. Кувыркин //Математическое моделирование и численные методы. – 2014. – Т. 1. – № 1. – С. 5–17.

229. Тарасик, В.П. Математическое моделирование технических систем: Учебник для вузов /Тарасик В.П. – М.: Дизайн ПРО, 2004. – С. 640.

230. Штерензон, В.А. Моделирование технологических процессов: конспект лекций / В.А. Штерензон. Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та. – 2010. – 66 с.

231. Математическое и компьютерное моделирование / Е. Л. Еремин, В.В. Еремина, М.С. Капитонова. Учебное пособие. Благовещенск: Изд-во Благовещенского гос. пед. ун-та, 2005. – 135 с.

232. Мышкис, А.Д. Элементы теории математических моделей / А.Д. Мышкис. Изд. 3-е, испр. – М.: КомКнига, 2007. – 192 с.

233. Емельянов, С.Г. Математическое и методическое обеспечение управления качеством продукции на основе анализа данных о взаимодействии процессов /С. Г. Емельянов, М. Л. Сторублев, С. Ю. Сазонов // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2011. – Ч. 2. – № 6(39).– С. 144-150.

234. Борбаць, Н.М. Оценка неопределенности характеристик качества, обусловленной человеческим фактором / Н.М. Борбаць, Т.В. Школина // Компетентность. – 2020. – № 4. – С. 28-34.

235. Зиновкин, В.В. Критерии оптимального управления многопараметрическим технологическим процессом приготовления газобетона / В.В. Зиновкин, Э.М. Кулинич // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2010. –Т. 22. – № 1. С. 273-278.

236. Информационная поддержка системы управления технологическим процессом структурирования эластомерных систем с использованием реометрических кривых / А. С. Кузнецов и др. // Прикладная информатика. – 2016. – Т. 11. – № 2 (62). – С.23-30.

237. FMEA. Анализ видов и последствий потенциальных отказов. Справочное руководство. FMEA конструкции. FMEA процесса. Дополнительный FMEA для мониторинга и отклика системы. Первое издание-е изд. AIAG & VDA, 2019. – 237 с.

238. Филиппов, А.А. Получение качественного калиброванного проката для высадки высокопрочных болтов / А.А. Филиппов, В.Г. Пачурин, Г.В. Пачурин // Современные наукоемкие технологии . – 2015. – № 3. – С. 87-92.

239. Проектирование ресурсосберегающих режимов производства калиброванной стали для пружинных клемм /А.Г. Корчунов и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. ГИ Носова. – 2007. – № 1. – С. 74-76.

240. 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.

241. Власова, Е.В. Проблемы подготовки поверхности калиброванной стали к волочению /Е.В. Власова, Н.П. Руденко, Е.Н. Левко // Сталь. – 2013. – № 7. – С. 60-62.

242. 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. Слабожанкин // Труды пятого конгресса прокатчиков. – М.: Черметинформация, 2004. – Т. 1. – С. 410-412.

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

244. 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.

245. Голубчик, Э.М. Исследование формирования шероховатости в совмещенном процессе подготовки поверхности высокоуглеродистых заготовок перед сухим волочением / Э.М. Голубчик, А.Е. Гулин // Сталь. – 2020. – № 5. – С. 38-40.

246. Гун, Г.С. Исследование смазки для сухого волочения металла с применением термического анализа / Г.С. Гун, А.Г. Корчунов, К.Г. Пивоварова // Обработка сплошных и слоистых материалов. 2015. – № 1 (42). – С. 44-46.

247. 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: Технологии и машины обработки давлением. – М.: РАН, 2006. – С. 41-44.

248. 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 Czestochowa, – 2015. – № 48. – P. 170-173.

249. Гун, Г.С. Исследования технологических свойств смазок для сухого волочения калиброванного металла / Г.С. Гун, А.Г. Корчунов, К.Г. Пиво-

варова // Труды X конгресса прокатчиков. Липецк, 14-16 апреля 2015 г. – М.: Черметинформация, 2015. – Т.1. – С. 222-225.

250. Гун, Г.С. Моделирование процесса формирования микрорельефа поверхности калиброванного металла / Г.С. Гун, К.Г. Пивоварова, А.В. Антонов // Обработка сплошных и слоистых материалов. Вып. 32: межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск: МГТУ, 2005. – С. 16-22.

251. Гун, Г.С., Аналитический подход к описанию изменения шероховатости поверхности при волочении калиброванной стали / Г.С. Гун, К.Г. Пивоварова // Международная V научно-техническая конференция молодых специалистов ОАО «ММК»: тез. докл. Магнитогорск: ОАО «ММК», 2005. – С. 156-157.

252. 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: сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ, –2004. – С. 125-128.

253. 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.

254. Корчунов, А.Г. Производство калиброванного металла со специальной отделкой поверхности /А.Г. Корчунов //Заготовительные производства в машиностроении. – 2005. – №. 7. – С. 35-40.

255. Корчунов, А.Г. Моделирование процесса волочения проволоки с учетом зависимости коэффициента трения от температуры контактной поверхности / А.Г. Корчунов, Д.В. Константинов // Металлургические процессы и оборудование. – 2013. – № 4, – С. 16-23.

256. 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: Труды междунар. науч.-техн. конф. – СПб: СПГПУ, 2005. – С. 360-362.

257. Пальмов, Е.В. Температурный режим волоки при скоростном волочении /Е.В. Пальмов // Сталь. –1951. – № 5. –С. 430-450.

258. Пачурин, Г. В. Влияние химического состава и структуры стали на качество проката для изготовления болтов /Г.В. Пачурин, А.А.Филиппов, Н.А. Кузьмин // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 8-2. – С. 87-92.

259. Чукин, В.В. Отработка режимов сфероидизирующего отжига стали 40X «СЕЛЕКТ» / В.В. Чукин, А.Г. Корчунов, К.Г. Пивоварова // Международная IV научно-техническая конференция молодых специалистов ОАО «ММК»: тез. докл. Магнитогорск: ОАО «ММК», 2004. – С. 115-117.

260. 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 // В сборнике: Фазовые и структурные превращения в сталях. Выпуск 4: в 2-х томах. Магнитогорск, 2006. – С. 191-194.

261. 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. сб. науч. тр. / под ред. Г.С. Гуна. – Магнитогорск: МГТУ, – 2003. – С. 240-243.

262. Гун, Г.С. Анализ технологических схем волочения шестигранного профиля / Г.С. Гун, А.Г. Корчунов, К.Г. Пивоварова // Обработка сплошных и слоистых материалов. –2013. –№ 1 (39). –С. 93-98.

263. Перспективы производства калиброванного проката /Е.Л. Кандауров, С.В. Кривошеков, А.Д. Носов и др. // Сталь. – 2005. – № 1. – С. 70-71.

264. Филиппов, А.А. Ресурсосберегающая технология подготовки калиброванного проката под холодную высадку изделий / А.А. Филиппов, Г.В. Пачурин // Успехи современ. естествознания. – 2007. – № 12. – Ч. 1. – С. 139

265. 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.

266. Пивоварова, К.Г. Формирование шероховатости поверхности металла при калибровании в монолитной волоке / К.Г. Пивоварова // Обработка сплошных и слоистых материалов. – 2015. – № 2 (43). – С. 53-56.

267. 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: Труды междунар. науч.-техн. конф. – СПб.: СПГПУ, 2007. – С. 344-346.

268. Филиппов, А.А. Анализ контроля качества поверхности горячекатаного проката для холодной высадки метизов / А.А. Филиппов, В.Г. Пачурин, Г.В. Пачурин // Современные наукоемкие технологии. – 2010. – № 12. – С. 115-116.

269. Корчунов, А.Г. Анализ вариантов достижения регламентированной шероховатости поверхности калиброванной стали малыми обжатиями / А.Г. Корчунов, К.Г. Пивоварова // Международная VI научно-техническая конференция молодых специалистов ОАО «ММК»: тез. докл. Магнитогорск: ОАО «ММК», – 2006. – С. 145-146.

270. 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 им. Г.И. Носова», 2007. – 88 с.

271. Результаты моделирования изменения шероховатости поверхности металла при калибровании в монолитной волоке / А.Г. Корчунов, К.Г. Пивоварова, В.В. Андреев, А.В. Антонов // Моделирование и развитие технологических процессов обработки металлов давлением: межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. – С. 66-70.

272. Статистические модели изменения шероховатости поверхности стали при калибровании / Г.С. Гун, А.Г. Корчунов, К.Г. Пивоварова, В.П. Рудаков, Л.П. Ряхова // Производство конкурентоспособных метизов: сб. науч. трудов / под ред. А.Д. Носова. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. – С.78-85.

273. Технологические аспекты производства калиброванного металла со специальной отделкой поверхности /А.Г. Корчунов и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.– 2005. – Т. 9. – № 1. – С. 46-49.

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

275. Антошкина, К.А. Исследование причин образования дефектов на поверхности калиброванного проката, изготовленного в ПАО "ММК-МЕТИЗ" и предназначенного для ООО «Роберт Бош Саратов» / К.А. Антошкина, Ф.А. Столяров, К.Г. Пивоварова // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. Тезисы докладов 77-й международной научно-технической конференции. Магнитогорск, 2019. – С. 158.

276. Владимиров, Ю.В. Современное зарубежное механическое оборудование для производства калиброванного металла /Ю.В. Владимиров // Черная металлургия. Бюл. НТИ. – 1991. – № 11. – С. 29-56.

277. 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.

278. Использование малых пластических деформаций в технологических процессах формирования качества метизных изделий /А.Г. Корчунов и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2007. – Том 19 – № 3. – С. 52-55.

279. 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.

280. Исупов, В.Ф. Производство калиброванной стали / В.Ф. Исупов, В.С. Славкин. – М.: Металлургиздат, 1962. – 188 с.

281. 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.

282. 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. 120-124.

283. 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.

284. Анализ дефектности горячекатаного проката для холодной высадки метизов / А.А. Филиппов, К.Г. Пачурин, А.Н. Гушин, Г.В. Пачурин // Фундаментальные исследования. – 2006. – № 4. – 16 с.

285. 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.

286. 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.

287. Корчунов, А.Г. Технологические аспекты производства высокоточной калиброванной стали / А.Г. Корчунов, К.Г. Пивоварова, А.Г. Ульянов // Обработка сплошных и слоистых материалов. Вып.38: межвуз. сб. науч. тр. под ред. М.В. Чукина. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. – С.85-89.

288. Моделирование упругого последействия 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.

289. 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.

290. 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.

291. 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. Черные металлы. Специальный выпуск. – 2012. – № 3. – С. 71-74.

292. Ульянов, А.Г. Обеспечение точности размеров калиброванной стали на основе моделирования упругого последействия металла при волочении: автореф. дис. ... канд. техн. наук /А.Г. Ульянов; Магнитогорск. гос. тех. ун-т им. Г.И. Носова. – Магнитогорск, 2011. – 20 с.

293. 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.

294. Бородина, Е.Н. Управление качеством стальных канатов с применением комплексного показателя действенности технологии волочения и свивки: автореф. дис. канд. техн. наук / Е.Н. Бородина. – Магнитогорск: МГТУ, –2014. –20 с.

295. Мусихин, В.А. Сравнение арматурных канатов класса К1400 (К-7) и класса К1500 (К-19) / В.А. Мусихин // Строительство и архитектура. – 2013.– Т. 13. – № 2. – С. 22-27.

296. Кривцов, А.И. Оценка влияния калибрующего обжатия на качество арматурного каната / А. И. Кривцов, Ф. А. Столяров, В. А. Харитонов // Моделирование и развитие процессов ОМД. – 2019. – № 2. – С. 33-38.

297. Медведева, Е.М. Анализ финишных технологических операций, влияющих на напряженность стабилизированных арматурных канатов / Е.М. Медведева // Вопросы продуктивного взаимодействия в процессе обмена знаниями: сб. науч. тр. Казань: ООО «СитИвент», 2021. – С. 317-321.

298. Технология производства арматурных канатов для предварительно напряженных железнодорожных конструкций / А.Д. Носов, В.П. Манин, И.Г. Шубин, С.В. Адамчук. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2007. – 107 с.

299. Korchunov, A.G. 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. Shiryaev // CIS Iron and Steel Review. – 2017. – Vol. 13. – P. 38-40.

300. 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.

301. 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. – 2020. – С. 28-32.

302. 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.

303. 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.

304. Chukin, M. V. 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.

305. Разработка концепции совмещения процессов пластического деформирования для формирования ультрамелкозернистой структуры в длиннономерных 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 12-ой Всероссийск. науч.-практ. конф. Старый Оскол, 25-27 ноября 2015.* – 2015. – Том I. – С. 170-177.

306. Chukin, M.V. 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.

307. 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.

308. 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.

309. 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.

310. Gulin, A. Peculiarities of contact interactions between carbon steel wire and die in drawing with torsion / A. Gulin, M. Polyakova, K. Pivovarova, A. Stoly-

arov, K. Narasimhan, M.J.N.V. Prasad // 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. 75-76.

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

312. 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.

313. 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 Всероссийск. науч.-техн. конф. с междунар. участием, 8-11 октября 2018 года. – Самара: СГТУ, 2018. – С. 281-288.

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

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

316. 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.

317. 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. Емалеева // В сборнике: Многофункциональные конструкционные материалы нового поколения. Сборник статей. Сер. «Фундаментальные проблемы современного материаловедения» / Под общей редакцией В.Е. Громова. Новокузнецк, 2015. – С. 174-182.

318. 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.

319. 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.

320. Особенности формирования свойств и микроструктуры углеродистой проволоки после комбинированной деформационной обработки / М.А. Полякова, К. Narasimhan, К. Г. Пивоварова, А. Е. Гулин, М. J. N. V. Prasad // Функциональные материалы: прогнозирование свойств и технологии изготовления. Материалы международной научно-технической конференции, 15-18 апреля 2019 г. – г. Пермь. – 2019. – С. 15-23.

321. 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.

322. 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.

323. 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.

324. Polyakova, M.A. Peculiarities of carbon steel wire properties and microstructure formation after combined deformational processing/ М.А. Polyakova, K. Narasimhan, K.G. Pivovarova, A.E. Gulin, M.J.N.V. Prasad // В сборнике: *Материалы международной научно-технической конференции. Функциональные материалы: прогнозирование свойств и технологии изготовления*, 2019. – С. 68.

325. Матвеев, С.И. Релаксация и ползучесть металлов / С.И. Матвеев. М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1952. – 200 с.

326. Концепция системной модернизации технологического оборудования для производства стальных канатов / И.В. Хромов, В.Г. Хромов, Е.В. Хромов, О.В. Хромов, В.В. Леонтьев // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2015.– № 4 (312). – С. 98-104.

327. Исследование и разработка технологии изготовления нового вида продукции - стальных канатов с пластически обжатými прядями в ОАО «СЕВЕРСТАЛЬ-МЕТИЗ» / В.А. Трусков, Л.М. Капуткина, Т.В. Силуянова, Ю. С. Филина, В. А. Королев // *Производство проката*. – 2011. – № 10. – С. 33-37.

328. Зайнуллин, А.И. Состояние и направления развития производства проволоки для армирования бетонных шпал /А.И. Зайнуллин, В.А. Харитонов // Моделирование и развитие процессов ОМД. – 2019. – № 3. – С. 23-26.

329. Зайцева, М.В. Стратегия развития производства арматурной проволоки класса 500 в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ» / М.В. Зайцева, Э.П. Дрягун // Известия ТГУ. Технические науки. – 2020. – № 8. – С. 232-240.

330. Голубчик, Э.М. Освоение технологии производства высокопрочной арматуры для железобетонных шпал нового поколения / Э.М. Голубчик, А.Г. Корчунов, Б.А. Коломиец // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2011. – № 5 -1 (38). – С. 127-133.

331. Лебедев, В.Н. Опыт освоения производства высокопрочной стабилизированной арматуры для железобетонных шпал нового поколения / В.Н. Лебедев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2010. – № 2 (30). – С. 74-76.

332. Производство высокопрочной стальной арматуры для железобетонных шпал нового поколения / Под общей редакцией М.В. Чукина. М.:Металлургиздат, 2014. – 276 с.

333. Перспективы производства высокопрочной стальной арматуры для железобетонных шпал нового поколения на основе термомодеформационного наноструктурирования / М.В. Чукин, Г.С. Гун, А.Г. Корчунов, М.А. Полякова// Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2012. – № 4 (1348). – С. 100-105.

334. 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, 2011. – С. 75-76.

335. Инновационный потенциал новых технологий производства метизных изделий из наноструктурных сталей / М.В. Чукин, Н.В. Копцева,

М.П. Барышников, Ю.Ю. Ефимова, А.Д. Носов, Е.П. Носков, Б.А. Коломи-
ец // Вестник Магнитогорского государственного технического университета
им. Г.И. Носова. – 2009. – № 2 (26). – С. 64-68.

336. Лебедев, В.Н. Повышение результативности технологии производ-
ства для обеспечения качества высокопрочной арматуры: автореф. дисс. ...
канд. техн. наук / В.Н. Лебедев. – Магнитогорск, 2011. – 20 с.

337. Улучшение эксплуатационных свойств элементов верхнего строе-
ния пути метрополитена / В.М. Федин, А.В. Замуховский, Ю.Е. Григораши-
ли, А.И. Фимкин, Ю.В. Ронжина // Путь и путевое хозяйство. – 2018. –
№ 2. – С. 12-15.

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

339. Выбор оптимальной конструкции профиля высокопрочной арма-
туры / А.Г. Корчунов, Э.М. Голубчик, К.Г. Пивоварова, А.В. Мохнаткин,
А.В. Лысенин // Метизы. – 2011. – № 2. – С. 16.

340. Полякова, М.А. Развитие научных основ стандартизации в период
становления нового технологического уклада / М.А. Полякова // Вестник
Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallургия. –
2016. – Т. 16. – № 1. – С. 135-141.

341. Построение целевых функций 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 машинострое-
нии: сб. науч. трудов. Екатеринбург: Унив. Тип. «Альфа Принт». –2013. –
С. 690-692.

342. Корчунов, А.Г. Технология производства высокопрочной арматуры для железобетонных шпал современных магистралей / А.Г. Корчунов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2009. – № 2. – С. 25-29.

343. Обеспечение качества и результативности процесса производства высокопрочной стабилизированной арматуры для железобетонных шпал / М.В. Чукин, А.Г. Корчунов, В.Н. Лебедев, Г. Рубин, М.А. Полякова // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2011. – № 3-2(32). – С. 12-16.

344. Полякова, М. А. Оценка процесса производства арматурного проката на основе статистических показателей / М. А. Полякова, В. А. Харитонов, И. М. Петров // Теория и технология металлургического производства. – 2018. – № 2(25). – С. 22-26.

345. 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. – 2011. № 1. – С. 112-121.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Кв. № 16.058 - 05-06 от 10.05.2018 г.

ОАО «Магнитогорский метизно-калывровочный завод» «ММК-МЕТИЗ»	КАРТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА (ОПЫТНЫЙ ОБРАЗЕЦ)	УТВЕРЖДАЮ Директор О.П. Ширяев
ППК	ИЗГОТОВЛЕНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ АРМАТУРНЫХ КАНАТОВ ДИАМЕТРОМ 12,5 ММ	КЛ.00187240.05-КТП
		0



ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОПЕРАЦИИ

Диаметр горячекатаной заготовки, мм	Марка стали	Совмещенный процесс специальной термической обработки, травления и подготовки поверхности заготовок										Высокопроизводительная многократная холодная пластическая деформация заготовок					Совмещенный процесс свивки, рихтовки и специальной механотермической обработки наноструктурированных арматурных канатов																												
		Нагрев и выдержка в печи аустенизации	Изотермическое охлаждение	Охлаждение	Травление		Промывка	Бурирование		Сушка	Рекомендуемый маршрут для получения центральной проволоки		Рекомендуемый маршрут для получения наружной проволоки		Свивка	Рихтовка	Низкотемпературный нагрев под натяжением	Охлаждение																											
12,0	8	930±9	22	520±56	83	Охлаждение волой	55	НCl, %	10±	5±	45±6	Четырехручьевая промывка проточной водой	55	80	150±2	100	12,00 ²⁴	10,42 ²¹	9,11 ^{22,5}	8,02 ^{21,6}	7,10 ^{20,0}	6,35 ^{20,8}	5,65 ^{19,8}	5,06 ^{19,1}	4,55 ^{18,8}	4,10 ^{16,3}	4,30	12,00 ^{20,5}	10,70 ^{22,2}	9,11 ^{22,2}	8,02 ^{21,6}	7,10 ^{20,0}	6,35 ^{20,8}	5,65 ^{19,8}	5,06 ^{19,1}	4,55 ^{18,8}	4,10	1x7(1+6)	≤5	58±	82	380	50	Охлаждение волой и сушка сжатым воздухом	32

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(продолжение)

ОАО «Магнитогорский метизно-калыворочный завод» «ММК-МЕТИЗ»		КАРТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА (ОПЫТНЫЙ ОБРАЗЕЦ)		УТВЕРЖДАЮ Директор О.П. Ширяев Лист № 2 КП.00187240.05-КТП 0		
ППК		ИЗГОТОВЛЕНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ АРМАТУРНЫХ КАНАТОВ ДИАМЕТРОМ 12,5 ММ				
ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ АРМАТУРНЫХ КАНАТОВ						
Номинальный диаметр, мм	Предельное отклонение от номинального диаметра каната, мм	Номинальный диаметр проволоки каната, мм		Предельное отклонение от номинального диаметра проволоки, мм	Номинальная площадь поперечного сечения каната, мм ²	Шаг свивки каната, мм
		Центральной	Наружной			
12,5	+0,05 -0,02	4,3	4,1	+0,05 -0,01	93,0	175-200
МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ АРМАТУРНЫХ КАНАТОВ						
Временное сопротивление, Н/мм ² , не менее	Разрывное усилие, кН, не менее	Максимально допустимое разрывное усилие, кН	Нагрузка при условном пределе текучести $\sigma_{0,1}$, кН, не менее	Условный предел текучести $\sigma_{0,1}^*$, Н/мм ² , не менее	Полное относительное удлинение при максимальной нагрузке δ_{max} , %, не менее	Потери напряжения от релаксации в канате при начальной нагрузке 0,7 от фактического разрывного усилия после 1000 ч выдержки под напряжением при температуре $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$, %, не более
1860	173,0	204,0	163,7	1760	4,4	2,5
РАЗРАБОТАНА ФТБОО ВО «МЕТУ-ИМ.Г.М. Никова» Профессор, д-р техн. наук М.В. Чукин Профессор, д-р техн. наук А.Г. Корнунов Доцент канд. техн. наук К.Г. Пивоварова Младший научный сотрудник, канд. техн. наук Салому Д.Г. Емалеева		СОГЛАСОВАНА Начальник научно-технического центра Канаев Д.П. Старший менеджер группы инноваций и новой техники центра Куранов К.Ю., Начальник управления персонала и социальных программ Парфилов О.В.		Срок действия с 10.05.2018 до 31.12.2018		

ПРИЛОЖЕНИЕ Б



Открытое акционерное общество
«Магнитогорский метизно-калибровочный завод «ММК-МЕТИЗ»
(ОАО «ММК-МЕТИЗ»)

УТВЕРЖДАЮ

И.о. начальника управления
перспективного развития и
технического перевооружения
ОАО «ММК-МЕТИЗ»



А.Ю. Столяров

« 08 » 2021 г.

АКТ

использования результатов диссертационного исследования
Пивоваровой Ксении Григорьевны

Настоящим подтверждается, что результаты диссертационной работы Пивоваровой Ксении Григорьевны, представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.23 – Стандартизация и управление качеством продукции, рекомендованы к практическому использованию в деятельности технологического центра ОАО «ММК-МЕТИЗ» при разработке технологии производства метизной продукции различного назначения.

Предложенная в диссертационной работе методология управления качеством технологических процессов метизного производства может быть рекомендована к практическому применению, т.к. она позволит снизить воздействие возмущающих факторов на показатели качества готовой продукции. В работе также предложены и обоснованы технологические мероприятия, направленные на совершенствование режимов обработки изделий.

К результатам диссертационного исследования, представляющим несомненный практический интерес, относится алгоритм расчета параметрической неопределенности показателей качества метизных изделий на основе идентификации возмущающих факторов и учета их влияния на показатели качества. Такой подход во многом повысит результативность работы при создании новой и совершенствовании действующей технологической документации.

Главный специалист по
технологическому развитию и
новым видам продукции, к.т.н.

М.В. Зайцева

ПРИЛОЖЕНИЕ В

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

о возможности использования результатов исследований
диссертационной работы Пивоваровой Ксении Григорьевны

В рамках диссертационного исследования К.Г. Пивоваровой разработана методология управления показателями качества металлических изделий в многостадийных процессах с элементами робастного проектирования. Результаты работы представляют несомненный практический интерес, поскольку учет неопределенности исходных данных является одним из важных аспектов управления процессами производства. Использование разработанного подхода позволит обеспечить заданный уровень потребительских свойств готовой продукции при проектировании технологических режимов.

Предложенный в диссертационной работе алгоритм робастной оптимизации качества металлических изделий в условиях неопределенности может быть рекомендован к практическому внедрению, т.к. позволяет обеспечить наилучшие сочетания показателей качества производимой металлопродукции. Представленные в работе примеры реализации методологии наглядно демонстрируют логичность последовательности действий в данном алгоритме.

С практической точки зрения использование результатов теоретических исследований, содержащихся в диссертационной работе К.Г. Пивоваровой, представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.23 – Стандартизация и управление качеством продукции, позволит в значительной степени упростить выбор технологической схемы производства инновационных видов металлопродукции.

Начальник отдела мониторинга инвестиций

департамента по экономике АО «БМК»,

к.т.н.(специальность «Обработка металлов давлением», 05.16.05)

тел.:8(34792)5-6980, доб. 68-876.



T. A. Lapteva

Т.А. Лаптева

Подпись Лаптевой Т.А. подтверждаю:

Директор департамента кадрового администрирования

E. A. Rozhina

Е.А. Рощина

АО «Белорецкий металлургический комбинат»

Юридический адрес: 453502,

Республика Башкортостан, район Белорецкий,

г. Белорецк, ул. Блюхера, дом 1.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г



Акционерное общество «КОМПОЗИТ»

Пионерская ул., д. 4, г. Королёв, Московская область,
Россия, 141070

Телеграф БЕРЕЗА

тел. (495) 513-20-28, 513-23-29
канцелярия 513-22-56, факс (495) 516-06-17
e-mail: info@kompozit-mv.ru

ОКПО 56897835, ОГРН 1025002043813, ИНН / КПП 5018078448 / 501801001

УТВЕРЖДАЮ
Начальник отделения
металлических композиционных
материалов и спецпокрытий
АО «Композит»



 А. С. Ленковец

«26» января 2021 г.

АКТ № 0140-13
передачи результатов научных исследований
Пивоваровой Ксении Григорьевны

Настоящим актом удостоверяется, что для практического использования в АО «Композит» переданы следующие результаты научных исследований, проведенных К.Г. Пивоваровой:

- технические и технологические решения по робастному управлению процессами производства;
- алгоритм робастного управления технологическими процессами многостадийного производства.

Полученные результаты научных исследований К.Г. Пивоваровой являются надежным инструментом принятия решений при разработке новых видов продукции и могут быть использованы в деятельности АО «Композит», что позволит предприятию минимизировать влияние принципа «проб и ошибок» при выборе технологической схемы производства продукции различного функционального назначения.

Начальник сектора
разработки волокнистых металлических
композиционных материалов



Олешко Алексей Юрьевич

ПРИЛОЖЕНИЕ Д



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«СТРОИТЕЛЬСТВО»

АО-01/482 от 18.08.2021
на № _____ от «___» _____ 20__ г.

АКТ

о принятии к использованию
результатов диссертационного исследования
Пивоваровой Ксении Григорьевны

Настоящим актом подтверждается, что полученные результаты исследований Пивоваровой К.Г. приняты к практическому использованию в АО «НИЦ «Строительство». Разработанные математические модели позволяют прогнозировать уровень показателей качества металлоизделий в условиях неопределенности информации, что может быть использовано для обоснования принимаемых технических и технологических решений.

Предложенные в диссертационной работе подходы по прогнозированию уровня качества металлоизделий с использованием функций потерь качества являются теоретической основой для разработки технологических процессов производства конкурентоспособной продукции различного назначения.

С практической точки зрения результаты исследования, содержащиеся в диссертационной работе Пивоваровой К.Г., представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.23 - Стандартизация и управление качеством продукции, позволят минимизировать затраты на производство продукции аналогичной лучшим мировым аналогам с учетом неопределенности параметров качества исходных материалов и требований потребителей.

Заместитель генерального директора
по научной работе, д.т.н., профессор



А.И. Звездов

Исп.: Д.В. Конин

АА 19191

АО «НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО»:
109428, Москва, 2-я Институтская ул. 6,
тел.: +7 (499) 170-1548; +7 (495) 602-0070;
факс: +7 (499) 171-2250
inf@cstroy.ru | www.cstroy.ru

ИНН 5042109739, КПП 504201001,
ОГРН 1095042005255
Юридический адрес: 141367, Московская область,
Сергиево-Посадский муниципальный район, городское
поселение Сергиев Посад, пос. Загорские Дали, д. 6-11

ПРИЛОЖЕНИЕ Е


БИЗНЕС-КОНСАЛТ

УЧЕБНО-КОНСУЛЬТАЦИОННЫЙ ЦЕНТР

Адрес местонахождения: 445043, Самарская обл., г. Тольятти, ул. Коммунальная, 39, оф. 602
 Юридический адрес: 445031, Самарская обл., г. Тольятти, б-р Татищева, 9-69
 Почтовый адрес: 445043, Самарская обл., г. Тольятти-43, а/я 5676
 Телефон/факс: (8482) 75-82-79, e-mail: busconsuh@bk.ru
 www.buscons.com

ИНН 6321117202, КПП 632101001, ОКВЭД 85.42.9, ОКПО 59662972, ОГРН 1036300992848
 р/с 40702810411190000644 в Филиал «ЦЕНТРАЛЬНЫЙ» Банка ВТБ ПАО Г. МОСКВА,
 БИК 044525411, к/с 30101810145250000411,

№ 003/21 от « 26 » января 2021 г.

на № _____ от « ____ » _____ 20__ г

СПРАВКА
О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО
ИССЛЕДОВАНИЯ В УСТОЙЧИВУЮ ПРАКТИКУ ПРИМЕНЕНИЯ В
ООО «БИЗНЕС-КОНСАЛТ»

Настоящим подтверждается, что результаты диссертационной работы Пивоваровой Ксении Григорьевны, представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.23 – Стандартизация и управление качеством продукции, внедрены в устойчивую практику применения в деятельности ООО «БИЗНЕС-КОНСАЛТ» при реализации консультационной деятельности в области поддержки проектных работ связанных с разработкой технологических процессов производства продукции.

Разработанная Пивоваровой К.Г. методика принятия решений по организации технологического процесса позволяет учитывать неопределенность параметров качества исходных материалов и требований потребителей.

К перспективным для внедрения, результатам диссертационного исследования, представляющим несомненный практический интерес, также относится разработанный алгоритм робастной оптимизации качества продукции в условиях неопределенности. Представляется, что внедрение алгоритма и сопутствующих инструментов позволит изготавливать продукцию с повышенными потребительскими свойствами на уровне ведущих мировых стандартов.

Директор ООО «Бизнес-Консалт»



Е.А. Шакина

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по образовательной деятельности
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

Д.В. Терентьев

«10» 11 2021 г.

АКТ

об использовании в учебном процессе
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»
результатов диссертационной работы
Пивоваровой Ксении Григорьевны

Материалы диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук Пивоваровой Ксении Григорьевны внедрены в учебный процесс на основании рекомендации методической комиссии института металлургии, машиностроения и материалобработки.

Материалы диссертационного исследования используются в образовательном процессе при подготовке бакалавров по направлению 22.03.02 Металлургия, профиль подготовки «Обработка металлов и сплавов давлением (метизное производство)», магистров по направлению 22.04.02 Металлургия, профили подготовки «Инжиниринг инновационных технологий в обработке материалов давлением» и «Инжиниринг технологий материалов».

Результаты исследований используются при чтении лекций и проведении практических занятий по следующим дисциплинам: «Менеджмент качества», «Управление качеством», «Квалиметрия», «Основы современного инжиниринга», «Инновационные процессы в производстве металлоизделий», «Метрология, стандартизация и сертификация», «Методы оптимизации», а также при выполнении обучающимися научно-исследовательских работ, курсовых проектов, промежуточных и итоговых аттестаций.

Результаты диссертационного исследования отражены в следующих учебно-методических изданиях:

- Полякова М.А., Голубчик Э.М., Пивоварова К.Г. Стандартизация и управление качеством в процессах производства металлопродукции: учебное пособие. М.: ФГБУ НТЦ «Информрегистр», 2021; № гос. рег. 0322102899;

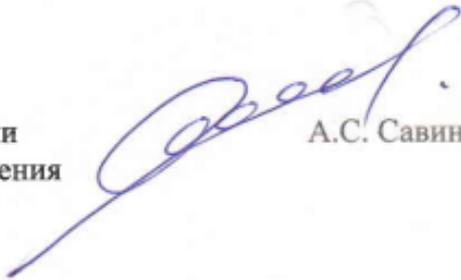
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

(продолжение)

- Харитонов В.А., Пивоварова К.Г. Бесфильтрные способы получения проволоки: учебное пособие. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2020. 63 с.;

- Харитонов В.А., Пивоварова К.Г., Емалеева Д.Г. Новые металлические материалы: учебное пособие. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2019. 182 с.

Председатель методической комиссии
института металлургии, машиностроения
и материалообработки,
заведующий кафедрой механики,
д-р техн. наук, доцент



А.С. Савинов

Заведующий кафедрой
технологий обработки материалов,
д-р техн. наук, профессор



А.Б. Моллер