

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ»**

На правах рукописи

ГРИБАНОВ Денис Алексеевич

**МЕТОДИКА КВАЛИМЕТРИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ
СОПРОТИВЛЕНИЯ РАЗРУШЕНИЮ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ
ПРИ УДАРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

Специальность:

05.02.23 – «Стандартизация и управление качеством продукции»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель

доктор физ-мат. наук

Атрошенко С.А.

Санкт-Петербург

2015

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 4 |
| ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО УДАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ | 11 |
| 1.1 Влияние ударного воздействия магнитно-импульсным методом на характеристики качества металлических материалов (кольцевых образцов) | 11 |
| 1.2 Современное развитие концепций по управлению качеством в производстве | 20 |
| 1.3 Обзор стандартов по управлению деловой деятельностью в области качества и общего управления | 29 |
| 1.4 Квалиметрические показатели качества продукции (материалов) | 30 |
| 1.5 Выводы по главе 1 | 48 |
| ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКОГО АППАРАТА ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО НАГРУЖЕНИЯ | 49 |
| 2.1 Материалы исследований..... | 49 |
| 2.2 Магнитно-импульсный метод нагружения металлических материалов | 51 |
| 2.3 Микроструктурные исследования | 54 |
| 2.4 Методика построения причинно-следственной диаграммы Исикавы..... | 55 |
| 2.5 Методика построения диаграммы Парето..... | 56 |
| 2.6 Инструмент квалиметрической оценки – диаграмма сравнения показателей качества . | 57 |
| 2.7 Инструмент квалиметрической оценки – функция желательности Харрингтона | 58 |
| 2.8 Инструмент квалиметрической оценки – планирование эксперимента..... | 60 |
| 2.9 Инструмент квалиметрической оценки – секторные диаграммы..... | 61 |
| 2.10 Инструмент квалиметрической оценки – Горизонтальные гистограммы | 63 |
| 2.11 Инструмент квалиметрической оценки – корреляционный анализ по диаграмме разброса | 63 |
| 2.12 Инструмент квалиметрической оценки – регрессионный анализ..... | 65 |
| 2.13 Построение причинно-следственной диаграммы Исикавы | 68 |
| 2.14 Построение Диаграммы Парето | 70 |
| 2.15 Разработка рабочей инструкции «Разработка и правила оформления документированных процедур, рабочих инструкций, форм» | 72 |
| 2.16 Разработка документированной процедуры «Процесс менеджмента ресурсов» | 74 |
| 2.17 Разработка методики оценки качества металлических материалов испытанных магнитно-импульсным методом..... | 76 |
| 2.18 Выводы по главе 2 | 80 |

| | |
|--|-----|
| ГЛАВА 3 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ОЦЕНКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ИСПЫТАННЫХ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНЫМ МЕТОДОМ..... | 81 |
| 3.1 Анализ экспериментальных данных из литературных источников..... | 81 |
| 3.2 Функция желательности материалов испытанных магнитно-импульсным методом..... | 99 |
| 3.3 Диаграмма сравнения показателей качества металлических материалов испытанных магнитно-импульсным методом..... | 102 |
| 3.4 Планирование эксперимента материалов испытанных магнитно-импульсным методом..... | 104 |
| 3.5 Секторные диаграммы материалов испытанных магнитно-импульсным методом..... | 106 |
| 3.6 Горизонтальные гистограммы материалов испытанных магнитно-импульсным методом..... | 108 |
| 3.7 Корреляционный анализ по диаграмме разброса материалов испытанных магнитно-импульсным методом..... | 111 |
| 3.8 Регрессионный анализ материалов испытанных магнитно-импульсным методом..... | 115 |
| 3.9 Процедура разработки стандарта организации «Методика квалитметрической оценки сопротивления разрушению металлических материалов испытанных магнитно-импульсным методом»..... | 117 |
| 3.10 Практическая ценность предложенной методики проведения оценки качества металлических материалов испытанных магнитно-импульсным методом..... | 127 |
| 3.11 Оценка экономического эффекта исследования опытного образца..... | 127 |
| 3.12 Модификация функции желательности Харрингтона..... | 130 |
| 3.13 Выводы по главе 3..... | 131 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ..... | 132 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК..... | 134 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А..... | 145 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б..... | 147 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В..... | 148 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Г..... | 149 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Д..... | 150 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Е..... | 151 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Ж..... | 152 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В настоящее время в соответствии с изменениями в экономическом и промышленном развитии страны существенно меняется политика в области обеспечения и повышения качества продукции. Правительство Российской Федерации выпустило постановление от 15 апреля 2014 г. N 328 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности»». Многие функции государства по реализации этой политики возложены непосредственно на производственные предприятия, которые самостоятельно внедряют систему менеджмента качества (СМК). Рыночные отношения дают простор для действий объективных экономических законов, поэтому необходимы методика, метод, инструментарий, позволяющий правильно оценивать процессы обеспечения качества и на этой основе принимать оптимальные управленческие решения. Анализ характеристик, показателей качества выпускаемой продукции и использование методик оценки качества направлен в первую очередь на повышение экономического эффекта, с целью удовлетворения потребителей и производителей. В области развития качества изделий, эксплуатация которых предполагается в условиях возникновения ударного воздействия, основной проблемой являются материалы, из которых они изготовлены.

В ряде областей новой техники выбор материала для изделий и элементов конструкций в виде труб, эксплуатация которых предполагается в условиях возникновения импульсных нагрузок, в основном решается методом экспертных оценок в пользу традиционных материалов. При этом оценка материала основывается на знаниях экспертов и опыте их работы в исследовании материалов при ударном нагружении. Но, наряду с экспертным методом, в данной области актуальна разработка дополнительных квалиметрических методов оценки качества материалов, поскольку экспертный метод предоставляет только субъективную оценку и может характеризоваться несогласованностью мнений экспертов.

Комплексная оценка сопротивления разрушению металлических материалов для труб и изделий (конструкций), изготовленных из них, эксплуатация которых предполагается в условиях возникновения высокоскоростного нагружения, представляет особый интерес, т.к. они применяются в аэрокосмической промышленности, для криогенных резервуаров, трубопроводов систем ракет-носителей однократного и многократного применения, космических кораблей и других космических аппаратов, в изделиях авиационной промышленности, машиностроения, работающих в условиях возникновения высокоскоростного ударного воздействия. Именно поэтому исследования, направленные на разработку методики квалиметрической оценки сопротивления разрушению металлических материалов (кольцевых образцов), испытанных при ко-

ротком времени нагружения ($T = 1$ мкс) с помощью высокоскоростного расширения магнитно-импульсным методом, являются актуальными.

Данное диссертационное исследование решает один из важнейших аспектов развития квалиметрии, а именно, совершенствование технологии оценивания качества. В настоящей работе проводится комплексное исследование по квалиметрической оценке сопротивления разрушению металлических материалов, испытанных при разных режимах высокоскоростного нагружения магнитно-импульсным методом.

Разработана методика проведения квалиметрической оценки сопротивления разрушению металлических материалов, испытанных магнитно-импульсным методом при коротком времени нагружения ($T = 1$ мкс), позволяющая повысить качество и систематизировать процесс выбора металлических материалов, эксплуатация которых предполагается в условиях возникновения ударного воздействия.

Значительное число работ в области квалиметрической оценки и управления качеством разнородной продукции и услуг опубликовано в разное время такими отечественными учеными, как Г. Г. Азгальдов, Ю.П. Адлер, В.Н. Азаров, С.А. Айвазян, С.А. Атрошенко, В.М. Балашов, В.В. Бураков, А. Г. Варжапетян, А.В. Гличев, О.П. Глудкин, Е.А. Горбашко, В.Д. Дурнев, Г.И. Коршунов, В.П. Ларин, В.А. Липатников, Н.Н. Рожков, Е.Г. Семенова, В. К. Федюкин, А.П. Ястребов. Необходимо отметить работы, ставшие классическими, в области управления качеством таких зарубежных ученых, как Э. Голдратт, Э. Деминг, У. Детмер, Д. Джуран, К. Ишикава, А. Фейгенбаум, Д. Харрингтон, У. Шухарт, К. Янг. Однако в нормативно-технической и научной литературе, посвященной исследованиям материалов в области управления качеством, наглядно не представлено комплексной методики квалиметрической оценки сопротивления разрушению металлических материалов, испытанных в области короткого времени нагружения ($T = 1$ мкс) с помощью высокоскоростного расширения кольцевых образцов магнитно-импульсным методом, что в свою очередь подтверждает необходимость научной разработки в этом направлении.

Цель работы и задачи исследования.

Целью работы является повышение качества металлических материалов, эксплуатируемых в условиях ударных воздействий, на основе методики квалиметрической оценки показателей качества и нормативно-технической документации системы менеджмента качества.

Отсутствие развернутых исследований в области качества по теме диссертационной работы обусловило необходимость постановки частных **задач**, направленных на достижение основной цели:

– определить основные показатели качества металлических материалов, эксплуатируемых в условиях ударного воздействия;

- адаптировать современные квалиметрические инструменты качества применительно к задаче оценивания сопротивления разрушению металлических материалов;
- разработать документированную процедуру «Процесс менеджмента ресурсов»;
- разработать методику квалиметрической оценки сопротивления разрушению металлических материалов, эксплуатируемых в условиях возникновения ударного воздействия;
- разработать методическое, технологическое, инструментальное обеспечение и технико-экономическое обоснование для апробации и внедрения стандарта организации «Методика квалиметрической оценки сопротивления разрушению металлических материалов, испытанных магнитно-импульсным методом».

Объектом исследования являются показатели качества металлических материалов в условиях ударных воздействий.

Предметом исследования являются квалиметрические инструменты качества оценки сопротивления разрушению металлических материалов.

Тематика работы соответствует областям исследования паспорта специальности 05.02.23 – «Стандартизация и управление качеством продукции»:

- по п. 2. «Стандартизация, метрологическое обеспечение, управление качеством и сертификация», разработана методика квалиметрической оценки сопротивления разрушению металлических материалов, эксплуатируемых в условиях возникновения ударного воздействия. Разработано методическое, технологическое, инструментальное обеспечение и технико-экономическое обоснование для апробации и внедрения стандарта организации «Методика квалиметрической оценки сопротивления разрушению металлических материалов, испытанных магнитно-импульсным методом».

- по п. 3. «Методы стандартизации и менеджмента (контроль, управление, обеспечение, повышение, планирование) качества объектов и услуг на различных стадиях жизненного цикла продукции», разработана документированная процедура «Процесс менеджмента ресурсов» для анализа и контроля качества объектов в условиях ударных воздействий;

- по п. 4. «Квалиметрические методы оценки качества объектов, стандартизации и процессов управления качеством» определены основные показатели качества металлических материалов, испытанных магнитно-импульсным методом, на основе проведенного анализа механических характеристик, полученных при испытаниях основных эксплуатационных свойств. Адаптирован квалиметрический инструмент качества - функция желательности Харрингтона, путем введения коэффициента экономического эффекта в комплексный показатель желательности.

- по п. 7. «Технико-экономические основы стандартизации и разработка системы стандартов», разработано методическое, технологическое, инструментальное обеспечение и техни-

ко-экономическое обоснование для апробации и внедрения стандарта организации «Методика квалитметрической оценки сопротивления разрушению металлических материалов, испытанных магнитно-импульсным методом».

Научная новизна выполненных исследований состоит в том, что:

- определены основные показатели качества металлических материалов, испытанных магнитно-импульсным методом, на основе проведенного анализа механических характеристик, полученных при испытаниях основных эксплуатационных свойств;

- адаптирован квалитметрический инструмент качества - функция желательности Харрингтона, путем введения коэффициента экономического эффекта в комплексный показатель желательности;

- создана методика квалитметрической оценки сопротивления разрушению металлических материалов, эксплуатируемых в условиях возникновения ударного воздействия;

- разработано методическое, технологическое, инструментальное обеспечение и технико-экономическое обоснование для апробации и внедрения стандарта организации «Методика квалитметрической оценки сопротивления разрушению металлических материалов, испытанных магнитно-импульсным методом».

Практическая значимость работы заключается в разработке рабочей инструкции «Разработка и правила оформления документированных процедур, рабочих инструкций, форм» и составлении на её основе документированной процедуры «Процесс менеджмента ресурсов». Применение результатов диссертационного исследования позволило повысить качество и систематизировать процесс выбора металлических материалов, эксплуатация которых предполагается в условиях возникновения ударного воздействия, что обеспечило положительный экономический эффект, в частности, предлагаемый способ исследования материалов путем испытания кольцевых образцов на магнитно-импульсной установке в комплексе с инструментами квалитметрической оценки привел к экономии затрат 31% в сравнении с величиной затрат на стендовые испытания детали. Исследования по теме диссертационной работы выполнены в рамках проекта с компанией «ГАЗПРОМ» (2008-2010); гранта РФФИ 13-01-00335 А; гранта ОПТЭК 2014.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что в ней определены основные квалитметрические показатели сопротивления разрушению металлических материалов, уточнена номенклатура критериев оценки квалитметрических показателей сопротивления разрушению металлических материалов, исследованы и уточнены возможности современных квалитметрических инструментов качества, модифицирован расчет комплексного показателя желательности, разработана методика квалитметрической оценки сопротивления разрушению металлических материалов эксплуатируемых при ударном воздействии. Сформулированы конкретные предло-

жения по совершенствованию стандартизации в области использования инструментов качества для квалитметрической оценки сопротивления разрушению металлических материалов, эксплуатация которых предполагается в условиях возникновения ударного воздействия. В результате проведенной работы сформулированы теоретически значимые выводы и предложения по совершенствованию методики оценки сопротивления разрушению металлических материалов.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались методы статистического анализа информации, квалитметрические методы оценки качества объектов, экспериментальные методы исследования материалов.

Наиболее существенные научные результаты, полученные лично соискателем и выносимые на защиту:

- уточнённый состав показателей качества оценки сопротивления разрушению металлических материалов, эксплуатируемых в условиях возникновения ударного воздействия;
- улучшенная методика расчета комплексного показателя желательности при оценивании сопротивления разрушению металлических материалов, эксплуатируемых в условиях возникновения ударного воздействия, путем введения коэффициента экономического эффекта;
- разработанная документированная процедура «Процесс менеджмента ресурсов» для анализа и контроля качества объектов в условиях ударных воздействий;
- созданная методика квалитметрической оценки сопротивления разрушению металлических материалов, эксплуатируемых в условиях возникновения ударного воздействия.
- разработанное методическое, технологическое, инструментальное обеспечение и технико-экономическое обоснование для апробации и внедрения стандарта организации «Методика квалитметрической оценки сопротивления разрушению металлических материалов, испытанных магнитно-импульсным методом».

Достоверность научных результатов, содержащихся в работе, определяется корректностью применения математического аппарата, инструментов и методов оценки качества, применением метрологически поверенных приборов и установок для проведения экспериментов, публикацией и обсуждением основных результатов исследований.

Апробация работы. Научные результаты и положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: Научно-практическая конференция факультета экономики и управления в машиностроении и института инновационного менеджмента «Четвертый научный конгресс студентов и аспирантов ИНЖЭКОН-2011», Санкт-Петербург, 2011 г.; «Век инноваций. XI Симпозиум научной молодежи Санкт-Петербурга», Санкт-Петербург, 2011 г.; XX Петербургские чтения по проблемам прочности, посвященные памяти профессора В.А. Лихачева, Санкт-Петербург, 2012 г.; Научно-практическая конференция факультета экономики и управления в машиностроении «Пятый научный конгресс студен-

тов и аспирантов ИНЖЭКОН-2012», Санкт-Петербург, 2012 г.; Конференция-семинар «Актуальные направления в механике сплошных сред», Санкт-Петербург, 2012 г.; 53 Международная конференция «Актуальные проблемы прочности», Витебск, Беларусь, 2012 г.; Международная научно-практическая конференция «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития 2012», Одесса, Украина, 2012 г.; X-ая Международная научно-техническая конференция «Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации», Курск, 2013 г.; Международная научно-техническая конференция «Качество в производственных и социально-экономических системах», Курск, 2013 г.; Восьмая Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы обеспечения взрывобезопасности и противодействия терроризму», Санкт-Петербург, 2013 г.; VII Международная конференция «Микромеханизмы пластичности, разрушения и сопутствующих явлений», Тамбов, 2013 г.; Всероссийская конференция «Взрыв в физическом эксперименте», Новосибирск, 2013г.; Международная научно-практическая конференция «Перспективное развитие науки, техники и технологий», Курск, 2013 г.; 13th International Conference on Fracture (ICF13) Beijing, China, 2013; XXI Петербургские чтения по проблемам прочности. К 100-летию со дня рождения Л.М. Качанова и Ю.Н. Работнова, Санкт-Петербург, 2014 г.; Девятая Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы обеспечения взрывобезопасности и противодействия терроризму», Санкт-Петербург, 2014 г.; Четвертая Международная научно-практическая конференция «Современные инновации в науке и технике», Курск, 2014 г.; 20th European Conference on Fracture (ECF20). Trondheim, Norway, 2014.; Международная научно-практическая конференция «Национальные концепции качества: обеспечение устойчивого развития экономики», Санкт-Петербург, 2014 г..

Исследования по теме диссертационной работы выполнены в рамках следующих проектов:

- Проект с компанией «ГАЗПРОМ» (2008-2010) - Динамическая прочность и трещиностойкость трубных сталей;

- Грант РФФИ 13-01-00335 А «Исследование процессов распространения импульсов сжатия и структурных перестроек материалов в условиях многомасштабного динамического деформирования»;

- Грант ОПТЭК 2014 «Qualimetric evaluation of metals fracture resistance under impact of distributed radial load by magnetic-pulse method».

Публикации. По основным материалам исследований опубликовано 16 печатных работ, из которых 5 - в ведущих рецензируемых научных изданиях.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, выводов, списка использованной литературы из 111 наименований. Основная часть работы изложена на 152 страницах машинописного текста, содержит 42 рисунка, 41 таблицу.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО УДАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ

1.1 Влияние ударного воздействия магнитно-импульсным методом на характеристики качества металлических материалов (кольцевых образцов)

В современных условиях развития промышленности наблюдается тенденция повышения требований к надежности и долговечности материалов элементов конструкций в виде труб, работающих в условиях возникновения ударно-волнового нагружения. В решении проблемы выбора исходных материалов соответствующего качества необходимо глубоко понимать поведение конструкционных материалов и изделий из них в определенных условиях и самых разнообразных ситуациях. Надежность - это комплексное свойство, которое включает в себя такие составляющие, как живучесть, долговечность и дефектность. Для конструкционных материалов такие качественные характеристики, как живучесть и долговечность оцениваются на основе лабораторных испытаний до изготовления из них изделий. Однако перечисленные параметры надежности, определенные на небольших лабораторных образцах без учета условий эксплуатации конкретной детали, достаточно показательны лишь для мягких малопрочных материалов. Необходимо также учитывать стремление к уменьшению металлоемкости конструкций, которое ведет к более широкому применению высокопрочных и, как правило, менее пластичных материалов с повышенной склонностью к хрупкому разрушению, а также факторы, действующие в условиях эксплуатации, дополнительно снижающие их пластичность, вязкость и увеличивающие опасность хрупкого разрушения. Отсюда возникают задачи определения и оценки истинных параметров разрушения, а также изучение закономерностей изменения механических свойств и структуры материалов в данных условиях. Возможным решением этих задач является проведение исследований кольцевых образцов металлических материалов в условиях высокоскоростного нагружения магнитно-импульсным методом. Это позволяет смоделировать дорогостоящие натурные испытания, что является актуальным. В то же время сложно оценить качество материала в этих условиях. Поэтому использование квалитметрических методов оценки качества материалов в условиях ударного нагружения может послужить заменой дорогостоящих испытаний изделий.

Предмет оценки качества материалов в условиях ударного нагружения заслуживает внимание, как с точки зрения фундаментальной науки, так и в решении практических задач.

Исследования ударно-волнового воздействия на структуру и механические свойства материалов проводятся с 70-х годов прошлого века [1-4]. Эти исследования проводятся и в настоящее время с целью более полного понимания процессов высокоскоростного деформирова-

ния металлов [5, 6] и построения широкодиапазонных определяющих уравнений для численных расчетов [7, 8]. В то же время влияние исходной микроструктуры, например, размера зерна, плотности дислокаций и двойников, на сдвиговую и откольную прочности металлов исследовано недостаточно [9,10]. Нет в настоящее время и достаточно обоснованных комплексных методик квалитметрической оценки поведения материалов в условиях высокоскоростного нагружения.

Экспериментальным изучением разрушения при растяжении и фрагментации при высоких скоростях деформирования занимались, как зарубежные так и отечественные учёные Атрошенко С.А., Ботвина Л.Р., Кривошеев С.И., Мещеряков Ю.И., Морозов В.А., Петров Ю.В., Степанов Г.В., Altynova M., Zhang O.H., Ravi-Chandar K., Murr L.E., Mercier S., Janiszewski J., Grady D.E., Benson D.A. Morales S.A. Niordson FI, Zhou F. и др.

В настоящее время актуальным являются исследования поведения материалов в области более короткого времени нагружения, реализованные с помощью экспериментов по высокоскоростному расширению кольцевых образцов магнитно-импульсным методом.

Экспериментальное изучение разрушения при растяжении и фрагментации колец при высоких скоростях деформирования было впервые получено Ниордсоном [11], который разработал схему электромагнитного нагружения расширяющегося кольца. Этот эксперимент предназначен для оценки влияния скорости деформации на пластичность, практически без ограничения скорости. Кольцо подвергается равномерному радиальному расширению до тех пор, пока однородная деформация не приведёт его к локализации в виде шейки. В частности, он получил, хорошее изображение, полученное с подсветкой от искры, которое появилось в точках разрыва из-за индуцированных токов, циркулирующих в кольцевом образце. Так как приблизительно девять искр были зарегистрированы вдоль кольца, он предположил, что разрывы произошли почти одновременно. Он также показал, что разрушение произошло после сдвиговой локализации под углом к направлению растяжения.

Возможность метода расширения кольца была полностью использована Грейди и Бенсоном, которые выполняли многочисленные эксперименты на образцах из OFHC меди и 1100-О алюминия. [12] Они использовали камеру для съёмки истории движения во времени одной точки кольца и таким образом смогли сопоставить измеренную деформацию в расширяющемся кольце с длинами фрагментов, собранных после теста. Радиальная скорость расширения кольца находилась в диапазоне 18-220 м/с для алюминиевых колец и 6-138 м/с для медных колец, соответствующие скорости деформации были в диапазоне 10^2 - 10^4 с⁻¹. Из двух серий экспериментальных наблюдений с расширяющимся кольцом были сделаны следующие выводы. Во-первых, Грейди и Бенсон отметили, что восстановленные фрагменты содержат шейки, которые не полностью разорваны. Поэтому, они составили таблицы количества зафиксированных шеек

и успешных разрывов, из которой было видно: количество фрагментов увеличилось почти линейно с увеличением скорости расширения. Во-вторых, они определили массу фрагментов и сравнили их с анализом Мотта, это позволило предположить, что идея волн разгрузки достаточно хорошо согласуется с экспериментальными наблюдениями, но было значительное количество фрагментов за пределами оценки Мотта. [12]

В экспериментальных работах [13-15] приведены результаты тестов по высокоскоростному растяжению кольцевых образцов магнитно-импульсным методом тонких металлических колец до разрыва. С помощью данного метода под действием электромагнитной нагрузки кольцо расширялось в диапазоне 80-200 м/с, что соответствует скорости деформации порядка 10^4 с^{-1} . Процесс формирования шеек и фрагментации был зафиксирован на фотографиях с использованием высокоскоростной камеры высокого разрешения.

Показано, что равномерные деформации до 25% могут быть сформированы в кольцевом образце при скорости деформации порядка 10^4 с^{-1} . В этом режиме деформационного упрочнения скорость деформации не влияет на пластическое поведение для алюминиевого сплава Al 6061-O. Количество шеек увеличивается с ростом скорости расширения кольца и распределяется в широком диапазоне длин в зависимости от статистических свойств материала и изменения микроструктуры. Деформация при зарождении шеек регулируется по критерию Консидера и не проявляет зависимости от скорости деформации для данного материала. Расстояние между шейками следует закону распределения Вейбулла. Такое распределение предполагает постановку задачи с помощью статистических изменений механических свойств с учетом волн разгрузки, которые распространяются от места локализации. Фрагменты появляются совершенно независимо друг от друга с их зарождения, определенного статистическими изменениями напряжения и разрушения. Деформации в начале этой локализации были почти равны квазистатическим деформациям шейки, подтверждая отсутствие эффектов упрочнения от скорости деформации. Дальнейшее деформирование произошло только в шейках, а области между ними не выдержали пластической деформации, значительно большей деформации образования шейки, и возможные разрывы генерировала волны разгрузки, которые способствуют дальнейшей деформации в соседних шейках, в соответствии с моделью волн разгрузки Мотта. Эти волны разгрузки определяли путем численного моделирования и использовали для идентификации регионов разгрузки на все кольца. Было установлено, что, прохождение волн разгрузки подавляло дальнейший рост шеек.

Гудудру и Фройнд [16] и Чжоу и соавторы [17] отмечают: Во-первых что шейки зарождаются почти одновременно и дальнейшее деформирование происходит в регионе шеек. Во-вторых, наблюдение показывает, что предел равномерной деформации существенно не отличается от квазистатических пределов, что противоречит наблюдениям Алтыновой и соавторов

[18] и подлежит дальнейшему изучению для образцов из различных материалов и геометрических форм [13].

В работе [14] было изучено влияние пластичности, деформационного упрочнения, а также геометрических параметров образцов из алюминиевых сплавов Al 6061-O, Al 1100-H14 (эквивалент марки алюминиевого деформируемого сплава АД33 по ГОСТ 4784-97) и меди Cu-101 (эквивалент марки меди марки М006 по ГОСТ 859–2001) таких, как поперечное сечение и размеры образца на возникновение и рост локализации деформации. Основные выводы из этого исследования следующие:

– для образцов с соотношением сторон поперечного сечения $\alpha = 2$ диффузное шейкообразование появляется в разных местах, как только напряжение превышает напряжение Консидере, напряжение начала локализации не зависит от скорости деформации. Это наблюдается во всех трех материалах, с разным деформационным упрочнением и пластичностью;

– для образцов с соотношением сторон поперечного сечения $\alpha > 5$ напряжение в образце далеко за пределами напряжения Консидере; локализация проявляется в виде полос сдвига. Деформационный уровень, на котором такие полосы сдвига появляются по всему поперечному сечению и предел дальнейшего деформирования образца варьируется в зависимости от поперечного сечения, а также от прилагаемой скорости деформации. Показано, что образцы из Al-6061-O с $\alpha = 10$ могут быть деформированы равномерно до $3 \varepsilon_N^{qs}$ (деформация при предельной нагрузке), что больше, чем в квазистатических деформациях шейки согласно Консидере критерию или шейки в листе по оценке Хилла. Это связано со временем, необходимым для распространения локализации поперечного сечения образца в результате инерционных и геометрических вкладов;

– наблюдается как абсолютное увеличение размера образца, так и увеличение равномерной деформации от диффузной локализации. Это объясняется временем распространения локализации по поперечному сечению образца;

– проведенные эксперименты демонстрируют, что геометрические и инерционные эффекты контролируют распространение локализации по поперечному сечению, а это, в свою очередь, определяет уровни равномерной деформации, которые могут быть достигнуты при высокоскоростном одноосном растяжении.

В работе [15] показано, что полимерные покрытия оказывают небольшой эффект при образовании шеек под воздействием высокой скорости деформации. Образцы из труб показали равномерное расширение до критической деформации, с последующим образованием полос сдвига и разрушения на пересечении этих полос.

Испытание на растяжение кольцевых образцов из алюминиевого сплава [19] при максимальной скорости $(0,3 - 2,3) \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ и длительности импульса от 5 до 41 мкс показал зависимость скорости удара и размеров расширяемых колец на деформацию алюминиевого сплава. Скорость нагружения ниже $2 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ не оказывает влияния на процесс деформации. Напряжение, при котором происходит растяжение кольца, проявляет зависимость от максимальной скорости деформации и от размера кольца. Более высокое напряжение отмечается в кольцевых образцах диаметром 50,8 мм, чем в образцах диаметром 25,4 мм.

В работе [20] Везенберг и Сагартз провели эксперименты по ударному разрушению на образцах из алюминия 6061 Т6. Цилиндры (длиной 102 мм, наружным диаметром 127 мм и толщиной 1,27 мм) были деформированы со скоростью 10^4 с^{-1} (сетка из линий, параллельных осям цилиндра была нанесена на внешнюю поверхность). После испытания авторы отметили, что разрушение произошло под углом 30° по отношению к оси цилиндра. Средний размер фрагментов был 35 мм. Ражендран и Файф [21] с целью измерения повышенной пластичности металлов при высоких скоростях деформации разработали устройство, где проволочка генерировала интенсивный импульс давления, который распространялся внутри коаксиального полиэтиленового цилиндра, который растягивал тонкое кольцо. Внутренний диаметр кольца был 25,4 мм, длина 3 мм, толщина стенки от 0,5 до 1 мм. При высоких скоростях деформации наблюдались многочисленные фрагменты в меди и алюминии. Грейди и Бенсон [12] разработали экспериментальную установку, где магнитные поля, созданные электромагнитами, расположенными рядом с внутренней поверхностью, расширяли кольцо. Они имеют различные интенсивности магнитного поля таким образом, чтобы увеличить номинальную скорость деформации от 10^3 до 10^4 с^{-1} . Для двух различных материалов (1100-0 алюминий и OFHC медь), они показали примерно линейную зависимость количества фрагментов от скорости деформации. При одинаковых нагрузках большее количество фрагментов наблюдается для меди, чем для алюминия. Алтынова и соавторы [18] использовали аналогичное устройство, и тонкие кольца из трех различных материалов были протестированы: Al-6061, Al 6061 Т6 и OFHC Cu. Скорость расширения в работе [22] варьировалась от 50 до 300 м/с и наблюдалось увеличение количества фрагментов с более высокой скоростью.

В своей работе Г.В. Степанов [23] отмечает, что при расширении кольцевых образцов из алюминиевых сплавов количество разрушений не проявляет зависимости от радиуса кольца и пропорционально скорости его расширения. С увеличением скорости радиального расширения равномерная деформация возрастает, за тем практически не изменяется. На это указывает увеличение показателей пластичности при повышении скорости деформации, связанное с более равномерным вовлечением микрообъемов материала в процесс деформирования.

В работе [24] проведены исследования прочности кольцевых образцов в зависимости от прикладываемых к ним электрических напряжений с длинным ($T = 7,4$ мкс) и коротким ($T = 1$ мкс) периодом синусоидального тока.

Экспериментальные результаты показывают, что при воздействии короткого периода тока требуется большая электромагнитная энергия тока разрушения, чем при длинных. Анализ осциллограмм показал, что при обоих рассматриваемых вариантах разрушение кольцевых образцов произошло в конце второго периода тока, протекающего через катушку. При испытании колец с длительностями импульсов $T = 7,4$ мкс и $T = 1$ мкс образцы имели единственный разрыв, но при более коротком импульсе наблюдались множественные шейки. При повышении энергии с длительностью импульса $T = 7,4$ мкс увеличивается количество фрагментов разрушения образца, а при нагружении образца из фольги более коротким импульсом $T = 1$ мкс помимо фрагментов образуются шейки.

Результаты фрактографического анализа показывают, что чем короче длительность импульса, тем меньше процент вязкой составляющей в изломе, т. е. образцы становятся более хрупкими. Данные показали, что при воздействии длинным импульсом кольцо расширяется на 68,5%, а при воздействии коротким импульсом всего на 1,4%, т. е. степень деформации образца в 1,5 раза больше при нагружении более длинным импульсом. При укорочении длительности импульса в образцах наблюдается двойникование.

Для сравнения приведены данные экспериментов по разрушению образцов из сплава Д16 на пневмогазовой пушке с промежуточной длительностью импульса 1,3 мкс. Фрактографический анализ поверхностей разрушения [25], показал, что образцы при большой длительности импульса разрушены более вязко, т. е. оказались более пластичными, чем при более коротких импульсах.

В работе [26], медные кольцевые образцы с соотношением сторон $\alpha = 0,5$ или $\alpha = 1$, были подвергнуты экспериментальному исследованию в условиях ударной нагрузки для оценки влияния размера поперечного сечения кольца на пластичность и фрагментацию. Внутренний диаметр всех колец был 31,2 мм, а площадь поперечного сечения кольца менялась следующим образом: 0,5 мм \times 1 мм (соотношение $\alpha = 0,5$); 1 мм \times 1 мм ($\alpha = 1$), 1 мм \times 2 мм ($\alpha = 0,5$), 1,5 мм \times 1,5 мм ($\alpha = 1$), 2 мм \times 2 мм ($\alpha = 1$).

Расширение кольцевых образцов проводилось в диапазоне скоростей от 128 до 147 м/с ($\sim 7,4 \times 10^3 \text{ с}^{-1}$) для всех кольцевых образцов, за исключением колец с поперечным сечением 1 мм \times 0,5 мм. Для этих колец усредненная максимальная скорость расширения была выше и равна 195 м/с ($\sim 1,2 \times 10^4 \text{ с}^{-1}$).

Результаты экспериментальных исследований показали незначительное влияние применяемых размеров сечения на пластичность медных колец, в то время как их фрагментация зависит от поперечного сечения.

Эксперименты по высокоскоростному расширению медных кольцевых образцов [9] проводились с целью получения данных для проектирования высокопроизводительных кумулятивных снарядов HEAT.

Экспериментальные исследования проводились на кольцах из трех сортов меди: холоднокатаной меди (Cu-ETP); отожженной меди при 500 °С в течение 1 часа (Cu-ETP) и высокой чистоты меди (OFHC). Кольца были изготовлены наружным диаметром 40 мм, исключение OFHC медь, которая изготовлена диаметром 60 мм, внутренним диаметром 31,2 мм, а площадь поперечного сечения кольца составляла 1 мм×1 мм. Для каждого вида меди проводились по пять экспериментов. Средние значения результатов проведенных испытаний представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Квасистатические механические свойства испытанных медных образцов [9]

| Металл | Предел прочности при растяжении, МПа | Предел текучести, МПа | Истинная деформация, e_f | Равномерная деформация, e_u | Твердость, HV1 | Размер зерна, мкм |
|----------------------------|--------------------------------------|-----------------------|----------------------------|-------------------------------|----------------|-------------------|
| Холоднокатаная медь Cu-ETP | 263 | 239 | 0,27 | 0,15 | 90 | 25-120 |
| Отожженная медь Cu-ETP | 221 | 77 | 0,49 | 0,36 | 65 | 20-80 |
| OFHC медь | 223 | 67 | 0,50 | 0,33 | 56 | 60-180 |

Расширение кольца проводилось при максимальной скорости растяжения в диапазоне от 171 м/с до 195 м/с, что соответствует средней скорости деформации порядка $8 \times 10^3 \text{ с}^{-1}$. Эксперименты проводились в условиях комнатной температуры 21 °С. Тем не менее, температура в течение электромагнитного расширения кольца поднималась в диапазоне от приблизительно 21 °С до 150 °С [26]. Энергия разряда составила 0,48 кДж. Тем не менее, достигнутые скорости расширения колец отличались для каждого вида меди (таблица 2).

Таблица 2 – Средние максимальные скорости расширения колец из различных видов меди [9]

| Материал кольца | Максимальная скорость расширения, м/с | Стандартное отклонение, м/с | Скорость деформации для $\varepsilon = 0,25$, с^{-1} |
|----------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|--|
| Холоднокатаная медь Cu-ETP | 171 | 1,9 | $7,6 \times 10^3$ |
| Отожженная медь Cu-ETP | 180 | 2,2 | $8,2 \times 10^3$ |
| Медь высокой чистоты OFHC | 195 | 4,6 | $9,0 \times 10^3$ |

Самые высокие максимальные скорости расширения были достигнуты для кольца из высокочистой OFHC меди. С другой стороны, кольца, изготовленные из холоднокатаной Cu-ETP меди были расширены на низкой скорости. Как следствие, скорость деформации также варьировалась в диапазоне от $7,6 \times 10^3$ до $9,0 \times 10^3$, которая была рассчитана для разгрузки, равной 0,25 (это значение, которое соответствует деформации при инерционной стадии расширения кольца).

Вышеуказанные различия в скорости расширения кольца происходят из-за различных механических реакций исследуемых видов меди, что подтверждают данные, представленные в таблице 3 (вторая колонка слева).

Таблица 3 – Динамические параметры свойств для различных видов меди [9]

| Материал кольца | Напряжение течения σ для $\varepsilon = 0,25$, МПа | Напряжение в переломе, ε_f | Однородная деформация, ε_u | Средняя длина (количество) фрагментов кольца, мм |
|----------------------------|--|--|--|--|
| Холоднокатаная медь Cu-ETP | 402 | 0,40 | 0,31 | 13,7 (11) |
| Отожженная медь Cu-ETP | 345 | 0,47 | 0,49 | 13,9 (11,5) |
| Медь высокой чистоты OFHC | 335 | 0,43 | 0,32 | 14,8 (10,5) |

Самая низкая скорость расширения была достигнута на меди, которая показала самое высокое значение напряжения течения (холоднокатаная Cu-ETP медь), в то время как самая высокая скорость расширения кольца была у меди с наименьшим значением напряжения течения (OFHC меди). Параметры, характеризующие пластичность и фрагментацию тестируемых материалов, собраны в таблице 3. Эти параметры позволяют сделать вывод, что пластичность всех образцов меди увеличивается в условиях электромагнитного расширения кольца по отношению к статическому. Удивительно, однако, что динамическая пластичность меди высокой чистоты OFHC оказывается почти на том же уровне пластичности, что и при квазистатическом растяжении. В свою очередь, наибольший рост пластичности наблюдался для холоднокатаной ETP меди (увеличение на 106%), тогда как для отожженной меди ETP показана самая высокая динамическая пластичность (самые высокие значения ε_f и ε_u) в сравнении с другими видами меди. Высокая пластичность отожженной меди ETP подтверждается формой восстановленного кольца, фрагменты которого были наиболее растянуты, и в них включены многие небольшие шейки. Для типа OFHC меди обнаружено самое низкое среднее число фрагментов на одно кольцо (10,5), несмотря на высокую скорость расширения, в то же время средние фрагменты кольца были самые длинные 14,8 мм [9].

Тонкие кольцевые образцы [27] подвергались высокоскоростному расширению под воздействием больших магнитных полей, для изучения влияния скорости деформации на деформацию до разрушения пластичных металлов. Классический электродинамический анализ, ранее разработанный Гординым, используется, для оценки поведения образцов. Исследование расширения образцов проводилось в диапазоне скоростей от 50 до 300 м/с. Результаты экспериментов показали, что пластичность алюминиевого сплава Al 6061 и меди OFHC Cu имеет тенденцию к увеличению с ростом скорости. Образец деформируется до разрушения почти в 2 раза больше при 300 м/с, чем при статическом нагружении. Сравнение с методом конечных элементов одномерной жесткой вязкопластической динамики показывает, что инерционные эффекты ответственны за повышенную пластичность в широком диапазоне скоростей. [26]

В работе [28] рассмотрено развитие подхода [24] исследования прочности кольцевых образцов из алюминиевых и медных фольг с помощью магнитно-импульсного метода. Эксперименты проводились при синусоидальных нагрузках с периодом тока $T = (7.5-5.5)$ мкс (модификация 1) и с периодом 1 мкс (модификация 2). Результаты измерения количества вязкой составляющей в изломе медных и алюминиевых кольцевых образцов показали, что чем короче длительность импульса, тем меньше процент вязкой составляющей в изломе алюминиевого образца, т. е. образцы становятся более хрупкими, в медных образцах отсутствует зависимость хрупкой составляющей в изломе от периода тока. Микротвердость как медных, так и алюминиевых образцов в исходном состоянии (до нагружения) оказалась выше, чем после нагружения, но в медных образцах уменьшение микротвердости более значительное (на 40–50%), чем в алюминиевых образцах (на 15–20%).

При нагружении образца коротким импульсом происходит динамическая рекристаллизация, т.е. образуются новые мелкие зерна, а наибольшая степень динамической рекристаллизации происходит в алюминиевых образцах с максимальным поперечным сечением (масштабным фактором) при нагружения с большей длительностью импульса. В образцах, как из алюминия, так и меди нагруженных с периодом $T = 5,5$ мкс при динамической рекристаллизации наблюдается наибольшее измельчение зерна. При увеличении периода нагружения, алюминиевые образцы проявили большую склонность к образованию пор, чем в исходном состоянии, а в образцах из меди порообразование ниже по сравнению с исходным. Кроме того, при увеличении длительности воздействия в алюминиевых образцах наблюдается зарождение множественных трещин.

Образец из меди до нагружения представлял собой монокристалл, а после нагружения появились мелкие зерна размером 0,7–2,5 мкм в результате динамической рекристаллизации, причем более развита динамическая рекристаллизация в образце с периодом $T = 5,5$ мкс, зерна

более мелкие. Количество пор в образце с периодом $T = 5,5$ мкс тоже больше, чем в образце с периодом $T = 1$ мкс, кроме того, в образце с надрезом большое количество полос сдвига.

Большая база данных, собранных Грейди и Бенсоном [12], показывает, что кольцо не может генерировать большое количество шеек, и количество трещин на шейке служит в качестве основного ориентира для аналитических и численных исследований. Две разные точки зрения преобладает в литературе, одна - основана на статистическом подходе по Мотту, а другая - основана на росте возмущений, которые локализуются в шейке (например, Guduru и Фройнд [16]). Оба подхода обеспечивают реалистичные прогнозы статистики фрагментации и ее зависимости от скорости нагружения, поэтому дополнительные экспериментальные исследования, которые позволяют идентифицировать соответствующие механизмы сужения и фрагментации при этих скоростях деформации, имеют важное значение.

Вывод к разделу 1.1: Проанализировав вышеуказанные работы, написанные за последние десять лет, можно сделать вывод, что существует необходимость дальнейших исследований материалов в условиях высокоскоростного нагружения, так как необходимо уделить внимание стандартизации подхода в оценке исследуемых материалов, а именно определённого набора параметров испытания, показателей качества (характеристик) образцов, которые могут быть получены по результатам испытаний.

В отличие от описанных в научной литературе исследований материалов в условиях высоких скоростей нагружения, в настоящей работе проводятся исследования поведения материалов в области более короткого времени нагружения, реализованные с помощью экспериментов по высокоскоростному расширению кольцевых образцов магнитно-импульсным методом, что является актуальным.

Для оценки материалов необходима разработка методики квалитметрической оценки, т.к. использованные в приведенных работах методы исследования качества материалов дают частную оценку, а не дифференциальную или комплексную.

1.2 Современное развитие концепций по управлению качеством в производстве

Развитие и рост экономической эффективности производства России зависит от повышения качества и конкурентной способности продукции, которая будет занимать более выгодное положение на внутреннем и мировом рынках. Управление качеством материалов и их квалитметрическая оценка занимают особое место в вопросах внедрения системы менеджмента качества. Повышение качества продукции, обеспечивает внедрение на предприятиях системы менеджмента качества и статистических методов. Правильно выбранный исходный материал в

зависимости от условий применения, соотношения цены и качества влияет на качество конечной продукции.

Проанализировав работы за последние 10-15 лет, посвященные разработке методики управления качеством в производстве выявлены ниже следующие тенденции.

В научной работе [29] рассмотрены проблемы выбора конструкции и разработки передовой технологии производства шипов противоскольжения. Автор указывает на необходимость разработки и реализации аддитивной квалиметрической модели оценки качества шипов противоскольжения, и проведения выбора рациональной схемы производства шипов исходя из расчетов комплексного показателя качества. В своей работе, автор попытался изменить "дерево свойств" обозначив три соединенных между собой блока и объединив их горизонтальными связями. Использование такого представления «дерева свойств» дало возможность вычислить отдельно групповые показатели качества входных параметров заготовки, технологического процесса и свойств конечного продукта. Анализ работы показал, что с использованием логики оценочных процедур задача управления качеством шипов противоскольжения и поиск рациональных схем технологии производства сводится к расчету комплексной оценки качества продукции и является его целевой функцией. Результаты экспериментов полученные в процессе производства опытной партии шипов позволили разработать целевую функцию для квалиметрической оценки процесса холодной объёмной штамповки (ХОШ) шипов противоскольжения. Полученную исходную информацию автор обрабатывал используя метод экспертных оценок и статистической обработки. Автор рассчитал единичный показатель качества по разработанному алгоритму с учетом различия интенсивности роста показателя качества и изменении их свойств. Использование этого алгоритма позволило вычислить, более точно оценить качество в широком диапазоне свойств. В конечном результате представлена аддитивная квалиметрическая модель оценки качества шипов противоскольжения, с использованием методики свертки единичных и групповых показателей эффективности технологии, на основе которой определены наиболее результативные технологические схемы ХОШ корпуса шипа противоскольжения [29].

В научной работе [30] рассматриваются проблемы усовершенствования методики оценки эффективности процесса системы менеджмента качества с применением комплексного показателя эффективности технологии волочения канатной проволоки и свивки стальных канатов. При решении данной проблемы автором получены следующие основные результаты:

- разработана методика комплексной оценки эффективности технологии волочения и свивки стальных канатов при этом показатели качества не разделяются на доминирующие и компенсируемые, коэффициентов и показателей дефектности канатной проволоки и канатов, за счёт чего повышается точность оценки;

- разработаны коэффициенты дефектности канатной проволоки и канатов, которые отражают наличие или отсутствие дефектов изделия;

- усовершенствована методика, оценки результативности процесса системы менеджмента качества, путём введения дополнительных показателей результативности: комплексного показателя действенности технологии волочения канатной проволоки и свивки канатов, степени выполнения программы по совершенствованию СМК, оценки результатов внутренних аудитов и удовлетворенности потребителей, что позволило повысить точность и объективность оценки.

В научной работе [31] рассмотрены проблемы, повышения эффективности процесса, производства арматурной стали класса А500С путём стабилизации показателей качества. При решении данной проблемы автором получены следующие основные результаты:

- автор адаптировал и применил для арматурного проката методологию формирования комплексного показателя качества, разработал иерархическую совокупность показателей качества, при этом им были учтены все требования, которые предъявляются к сортовому прокату в горячекатаной арматуре в соответствие с действующей нормативной документацией;

- по результатам экспериментов и их статистической обработки автор разработал новую регрессионную модель, которая позволила прогнозировать показатели качества арматур, учитывать химический состав стали и параметры технологии прокатки.

- определил численные значения комплексного показателя качества и его отдельных дифференциальных показателей в условиях производства арматурного проката. Выявил особенности учета отдельных дифференциальных показателей и связи расчетных показателей качества со статистическими уравнениями регрессии;

- применил в разработанной регрессионной модели уравнения для расчета изменения дисперсии прочности и пластичности готового проката при оценке дифференциальных показателей качества арматуры и с целью оценки стабильности по механическим свойствам;

- предложил концепцию объединения однородной продукции при отгрузке и разработал нормативный документ (технические условия), дающий возможность формировать Специальные (сборные) партии арматуры из различных плавок по критерию превышения статистически установленного приемочного уровня механических свойств, для повышения результативности производственного процесса на основе доказанной однородности механических свойств арматуры [31].

В научной работе [32] рассматриваются проблемы, разработки методологии комплексной количественной оценки качества метизов и технологий их производства.

При решении данной проблемы автором получены следующие основные результаты:

- автор разработал понятия и принципы функционально-целевого анализа, которые включают: определение понятия «функция изделия» на основе физического взаимодействия;

определение интервала жизненного цикла, на котором происходит оценивание изделий, названного потребительской фазой; выделил три стадий потребительской фазы – транспортная, монтажная и эксплуатационная;

- усовершенствовал системный подход к оценке качества объектов и процессов, и на его основе: определил комплекс требований к операции свёртки оценок качества; ввел понятие «акселерация оценок при свёртке», которое отражает свойство эмерджентности в системах свойств изделий и процессов, дал его математическое определение; предложил функции свёртки, которые удовлетворяют обоснованному в работе комплексу требований;

- предложил модель многооперационного технологического процесса, с помощью которой был разработан метод оценки требований к исходной заготовке, обеспечивающий получение заданных показателей качества готовой продукции;

- разработал метод факторного анализа качества изделий и процессов, позволяющий оценивать потенциальные возможности отдельных свойств, для повышения комплексного качества [32].

В научной работе [33] рассматриваются проблемы совершенствования процессов управления качеством и формирования потребительских свойств высокопрочных фланцевых болтов с фасонной головкой типа «TORX» для отечественного автомобилестроения. При решении данной проблемы автором получены следующие основные результаты:

- автор выдвинул концепцию, предложил и обосновал метод квалиметрической оценки качества фланцевых болтов с фасонной головкой типа «TORX» и технологических процессов их производства;

- произвел выбор и обосновал базовые значения единичных показателей качества и обеспечил сбор фактического материала по результатам реализации возможных вариантов технологии в производственных условиях.

- установил и подтвердил некоторые закономерности изменения свойств металла при различных вариантах деформирования, такие как: повышение относительных степеней деформации при редуцировании предварительно сжатых образцов (от 7 до 30%) приводит не к упрочнению, а к разупрочнению металла; разупрочнением стали проявляется в большей мере с увеличением относительной степени деформации при предварительной осадке; разупрочнение происходит до определённых критических относительных степеней деформации при осадке, после чего начинается упрочнение стали по кривой упрочнения при однородном напряженном состоянии; критические относительные степени деформации составляют 0,43...0,6 от относительных степеней деформации при последующем редуцировании стали [33].

В научной работе [34] рассматриваются проблемы повышения результативности технологических систем в условиях высокой вариабельности параметров и требований к продукции на базе процессного подхода и статистических методов управления.

При решении данной проблемы автором получены следующие основные результаты:

- автор разработал методику управления качеством технологических систем, которая обеспечивает повышение их результативности в рассматриваемых условиях;
- предложил новый подход к управлению качеством технологических систем, который отличается учетом физических возможностей технологических процессов и требований потребителя при реализации статистических методов управления их качеством;
- впервые разработал компоненты статистического управления качеством технологических систем в рассматриваемых условиях: модель и методические принципы статистического управления их качеством; алгоритм и методика статистического управления качеством высоковариабельного технологического процесса;
- предложил новый принцип формирования информационной базы, аккумулирующей данные о границах вариации параметров технологических процессов для повышения результативности управления качеством [34].

В научной работе [35] рассматриваются проблемы повышения качества продукции за счет выявления дестабилизирующих состояний различных факторов в производственно-технологическом процессе.

При решении данной проблемы автором получены следующие основные результаты:

- автор разработал методику статистического анализа производственно-технологического процесса, направленную на повышение качества продукции в результате выявления дестабилизирующих состояний разнородных факторов;
- разработал общий подход к обеспечению и повышению качества продукции, который направлен на выявление дестабилизирующих условий, созданных производственно-технологическими факторами;
- разработал иерархический классификатор параметров процесса и комплексный показатель качества продукции, который позволяет работать с разнородными данными в едином информационном пространстве;
- разработал алгоритм проведения статистического анализа данных и рекомендации по оценке дестабилизирующих факторов, направленные на проведение обоснованного выбора предупреждающих действий и улучшения качества продукции [35].

В научной работе [36] рассматриваются проблемы разработки механизма квалиметрической оценки и выбора материалов для изделий, работающих в области высокоскоростных воздействий.

При решении данной проблемы автором получены следующие основные результаты:

- на основе применения квалиметрических методов разработан механизм оценки качества и подбора материалов в условиях высокоскоростного нагружения;
- разработан подход к выбору квалиметрических методов для оценки качества материалов в рассматриваемых условиях, при этом определяющими критериями являются ударные характеристики;
- автор составил показатели качества для различных видов материалов и подобрал квалиметрические методы оценки качества для материалов в условиях высокоскоростного нагружения;
- модифицированы квалиметрические методы для оценки нагруженных материалов, а именно выделены показатели и приведены их базовые значения, разработаны таблицы градаций, определены коэффициенты весомости;
- разработаны алгоритм проведения оценки качества для каждого вида материалов и способа нагружения и методические рекомендации по порядку использования предложенных квалиметрических методов оценки [36].

Ниже приведён обзор научных публикаций в периодической литературе, в которых рассмотрены подходы, методы и методики по оценке и управлению качеством изделий.

В статье «Критерий динамической фрагментации, отражающий влияние состава, механических свойств материала и условий нагружения» [37] используя гистограммы распределений числа сегментов (N) кольцевого образца, свободных от шеек, от длины этих сегментов, т.е. расстояний между шейками (l) приведенных в работах [13-15], автор применила корреляционный анализ с построением кумулятивных кривых распределений числа шеек в координатах $\sum N - l$.

Анализ этих распределений при различных скоростях ударного нагружения показал, что для сплава Al1100-N14, хорошо описываются экспоненциальными соотношениями с коэффициентами корреляции $R^2 > 0,9$. Причем показатели в этих соотношениях возрастают с увеличением скорости деформации (рисунок 1).

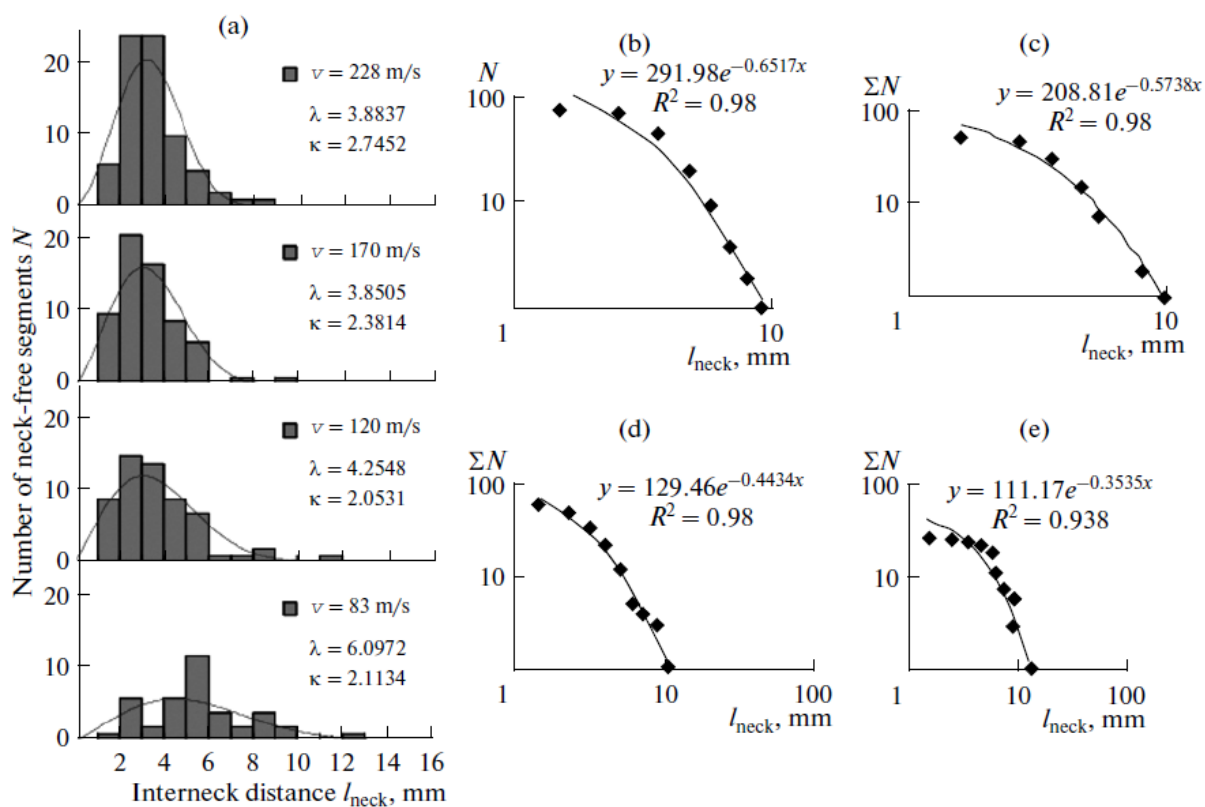


Рисунок 1 – Гистограммы распределения числа шеек образовавшихся в кольцах из сплава Al1100-H14 при различных скоростях нагружения, и функции расстояния между ними (а) и кумулятивные распределения числа сегментов, построенные по гистограммам при скоростях расширения колец [37]

Такой же результат был получен и при обработке данных, касающихся фрагментации колец из алюминиевого сплава Al6061-O и отожжённой меди Cu101. Высокие коэффициенты корреляции при описании процессов динамического разрушения, изначально предполагающих большой разброс данных, подтверждают возможность предложенного описания процесса фрагментации. Показано, что значения показателей в соотношениях, описывающих зависимость параметров фрагментации от скорости деформации, определяются коэффициентами деформационного упрочнения для перечисленных материалов [37].

В статье «Прогнозирование остаточного ресурса агрегатов ракетно-артиллерийского вооружения с использованием корреляционных зависимостей контролируемых эксплуатационных параметров износа» [38] предложена методика определения остаточного ресурса систем и агрегатов ракетных комплексов, основанная на учете изменений контролируемых эксплуатационных параметров, связанных с износом. Используются корреляционные зависимости групп эксплуатационных параметров, а также начальные, промежуточные и предельные их значения для определения остаточного ресурса по измеренным данным параметров через уравнение рег-

рессии. Полученные результаты моделирования позволяют получать прогнозные значения показателей ресурса в произвольные отрезки времени эксплуатации [38].

В статье «Квалиметрическая оценка производственных процессов изготовления металлоизделий» [39] рассмотрена квалиметрическая оценка технологической схемы производства металлоизделий по выбранному комплексному показателю «Результативность технологии» на примере технологической схемы листовой штамповки. Для полного представления комплексного показателя, его разбили на групповые: «показатели технологического процесса» и «показатели качества готового изделия». На основании критериев и требований к конкретному изделию, заложенных в конструкторской и технологической документации, выделены единичные показатели качества листоштампованного изделия. Единичные показатели, в зависимости от их статуса (доминирующий или компенсируемый) определены по предложенным формулам при выполнении условий ограничения. Предложена формула свертки комплексного показателя оценки. Предложенная квалиметрическая модель оценки процессов изготовления металлоизделий позволила выбрать наиболее подходящий вариант технологической схемы производства металлоизделий из ограниченного множества возможных вариантов для конкретных условий производства [39].

В статье «Квалиметрический подход к оценке качества шиповых соединений деревянных заготовок» [40] приведена методика оценки уровня качества шипового соединения. Разработана система показателей для оценки качества шипов. Приведена модель для расчета показателей и уровня качества шиповых соединений по дифференциальному методу. Для анализа результатов расчета уровня качества построена лепестковая диаграмма [40].

В статье «Оценка качества сталей горного оборудования по составу и механическим свойствам» [41] предложена методология количественной оценки качества материалов по единичным и обобщенным показателям, характеризующим состав и механические свойства. Построены зависимости комплексного показателя качества по составу и механическим характеристикам, характеризующих прочностные свойства для исследуемых марок сталей. Режимы термообработки улучшают прочностные характеристики сталей, одновременно снижая величину комплексного показателя качества. Поэтому оценка качества по комплексному показателю является недостаточной, и после оценки уровня качества по составу авторами была проведена методологически аналогичная оценка качества по механическим характеристикам. За критерий оценки прочности выбрана удельная работа или мощность разрушения, определенная по ударной вязкости. Построена номограмма для определения температуры отпуска, обеспечивающего самый высокий уровень качества по механическим свойствам. На основе полученных уровней качества по составу назначены температуры отпуска, обеспечивающие максимально возможный уровень качества по механическим свойствам и наивысшие эксплуатационные показатели.

Использование определенных режимов отпуска дало возможность сократить разброс в механических свойствах деталей и повысить качество детали [41].

В статье «Практические аспекты использования функции желательности в медико-биологическом эксперименте» [42] изучена возможность использования в качестве многофакторного анализа обобщенной функции желательности Харрингтона. Доказано, что данный метод позволяет объединить в односторонних, одномерных характеристиках разномерные качественные и количественные показатели, что позволяет осуществить многомерный анализ пакета значений или функций. Показано, что односторонние и двусторонние ограничения позволяют охватить все возможные варианты исходных показателей. Приведен клинический пример использования функции желательности для сравнения эффективности различных методов лечения по показателям функции суставов. Продемонстрирована возможность объективного сравнения результатов лечения при одинаковых субъективных характеристиках [42].

Вывод к разделу 1.2: Проанализировав вышеуказанные работы, написанные за последние годы, можно сделать вывод, что существует необходимость дальнейших исследований в области оценки материалов в условиях высокоскоростного нагружения. Для оценки материалов испытанных в области более короткого времени нагружения с помощью высокоскоростного расширения кольцевых образцов магнитно-импульсным методом, необходима разработка методики квалиметрической оценки, т.к. использованные в приведенных выше работах методы оценки качества применимы в большинстве случаев для тех объектов исследования, на примере которых и были представлены результаты проделанных работ. В то же время в некоторых работах уже рассмотрены такие квалиметрические инструменты как: функция желательности, диаграмма разброса, корреляционный анализ, паутина качества и дифференциальный метод, метод секторных диаграмм, ранжированный ряд. Но применение данных методов для квалиметрической оценки материалов испытанных в области более короткого времени нагружения с помощью высокоскоростного расширения кольцевых образцов магнитно-импульсным методом нигде еще не было рассмотрено и предложено для практического применения.

Проанализировав вышеуказанные научные публикации в периодической литературе, можно сделать вывод, что методики квалиметрической оценки материалов, испытанных в условиях высокоскоростного нагружения магнитно-импульсным методом, до сих пор не разработано. В своей совокупности, рассмотренные выше научные публикации, представляют методический материал по управлению характеристиками объектов исследований, на примере которых они и были представлены.

Также, необходимо отметить, что за последние годы некоторая часть работ посвящена аналитическим методам управления качеством «Прогнозирование остаточного ресурса агрега-

тов ракетно-артиллерийского вооружения с использованием корреляционных зависимостей контролируемых эксплуатационных параметров износа» [38] и др. но, к сожалению, эти работы не имеют отношения к данной теме диссертации. В нормативно-технической, и научной литературе [13-15, 37-42], посвященной исследованиям материалов в области управления качеством, также наглядно не представлено комплексной методики квалитетической оценки материалов, испытанных в области более короткого времени нагружения с помощью высокоскоростного расширения кольцевых образцов магнитно-импульсным методом, что в свою очередь подтверждает необходимость научной разработки в этом направлении.

1.3 Обзор стандартов по управлению деловой деятельностью в области качества и общего управления

Краткий обзор назначения и использования стандартов по управлению деловой деятельностью в области качества и общего управления приведён ниже.

ГОСТ ISO 9001-2011 «Системы менеджмента качества. Требования» устанавливает требования к СМК, которые могут использоваться для внутреннего применения организациями в целях сертификации или заключения контрактов. Основной идеей стандарта является внедрение «процессного подхода» при разработке, внедрении и улучшении результативности СМК с целью повышения удовлетворенности потребителей путем выполнения их требований. ГОСТ направлен на результативность СМК при выполнении требований потребителей, в то же время в стандарте отсутствуют конкретные методы оценки качества и принципы их применения [43].

ГОСТ Р ИСО/МЭК 15 288-2005 «Информационная технология. Системная инженерия. Процессы жизненного цикла систем» устанавливает общие основы для описания жизненного цикла систем, созданных людьми, определяет детально структурированные процессы и соответствующую терминологию. Системы состоят из следующих элементов: технические средства, программные средства, люди, процессы (например, процесс оценки); процедуры (например, инструкции оператора); основные средства и природные ресурсы (например, вода, объекты живой природы, минералы). Процессы, представленные в стандарте, могут быть использованы как основа для формирования деловой среды, например методов, технических приемов и способов, инструментальных средств и обученного персонала. В стандарте не детализируются процессы жизненного цикла в терминах методов и процедур, необходимых для удовлетворения требований и достижения результатов процесса. Стандарт не устанавливает требований к документации в части ее наименований, форматов, явно определенного содержания и среды для записи [44].

ГОСТ Р ИСО/МЭК 31000 - 2010 «Менеджмент риска. Принципы и руководство» может применяться в течение всего жизненного цикла организации и для широкого спектра деятельности, включая стратегии и решения, операции, процессы, функции, проекты, продукцию, услуги и активы. Несмотря на то, что стандарт предоставляет обобщенное руководство, он не предназначен для обеспечения единообразия риск-менеджмента во всех организациях. При создании и применении планов, касающихся инфраструктуры риск-менеджмента, необходимо учитывать различные потребности конкретной организации: ее частные цели, ситуацию, структуру, операции, процессы, функции, проекты, продукты, услуги и активы, а также конкретную практику, принятую в организации. Стандарт устанавливает общий подход для поддержки стандартов, распространяющихся на конкретные риски и/или отрасли, и не заменяет эти стандарты [45].

При обзоре установлено отсутствие в нормативной базе регламентов и стандартов [43-45], содержащих принципы и методологию проведения квалитетрической оценки материалов испытанных с помощью высокоскоростного нагружения кольцевых образцов магнитно-импульсным методом, что в свою очередь подтверждает необходимость научной разработки в этом направлении.

1.4 Квалитетрические показатели качества продукции (материалов)

Область науки, объединяющая количественные методы оценки качества, используемые для обоснования решений, принимаемых при управлении качеством продукции и стандартизации, называется *квалитетрией*. Основные задачи квалитетрии – определить номенклатуру необходимых показателей качества изделий и их оптимальные значения, а также разработать методы количественной оценки качества, создать методики учета изменения качества во времени [46].

Авторы в работе [47] обозначают следующие актуальные аспекты развития квалитетрии:

- расширение сферы применения (по отраслям народного хозяйства);
- углубление анализа (по степени охвата решаемых в отрасли задач);
- совершенствование технологии оценивания качества [47].

Автор в работе [48] даёт определение понятиям:

- «*Оценка уровня качества объектов* - совокупность операций, включающая выбор номенклатуры показателей качества, определение их численных значений, а также значений базовых, относительных и комплексных показателей с целью принятия решений в области управле-

ния качеством». Данное определение включает в себя ряд новых понятий, требующих пояснения.

- «Уровень качества объектов – это мера соответствия качества оцениваемого объекта качеству какого-то другого объекта, выбранного за эталон сравнения. Таким образом, в квалиметрии уровень качества является относительной мерой, результатом оценивания, системой значений мер качества объекта, определенной на основе соотнесения с базовыми (эталонными) значениями мер» [48].

«Качество – степень соответствия совокупности присущих характеристик требованиям». Термин «присущий» являющийся противоположным термину «присвоенный», означает имеющийся в чем-то, особенно если это относится к постоянным характеристикам.

«Требованием принято называть документально изложенный критерий, который должен быть выполнен, если требуется соответствие документу, и по которому не разрешены отклонения».

«Характеристикой качества называют присущую продукции, процессу или системе характеристику, относящуюся к требованию». Понятие «присущая» обозначает свойственность чему-либо, особенно, если это относится к постоянной характеристике. Присвоенные характеристики продукции, процесса или системы (например, цена продукции, владелец продукции) не являются характеристиками качества этой продукции, процесса или системы [49].

Под *свойством продукции* понимается «объективная особенность продукции, которая может проявляться при ее создании, эксплуатации или потреблении» [46, 48, 50]. Совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением, называется *качеством продукции* [51-54]. Количественная характеристика свойств продукции, обуславливающих ее качество, рассматриваемая применительно к определенным условиям ее создания, эксплуатации или потребления, называется *показателем качества продукции (ПКП)* [46, 54, 55].

1.4.1 Классификация и состав показателей качества продукции

Прежде чем рассматривать классификацию показателей качества продукции, в первую очередь необходимо ознакомиться с классификацией продукции. Используя, например, классификационный признак «вид использования» продукцию подразделяют на потребляемую и эксплуатируемую. Тем не менее, для оценки продукции более целесообразно использовать признак, связанный с последствиями от ее отказа, снижения или низкого численного значения какого-либо показателя качества (рисунок 2).

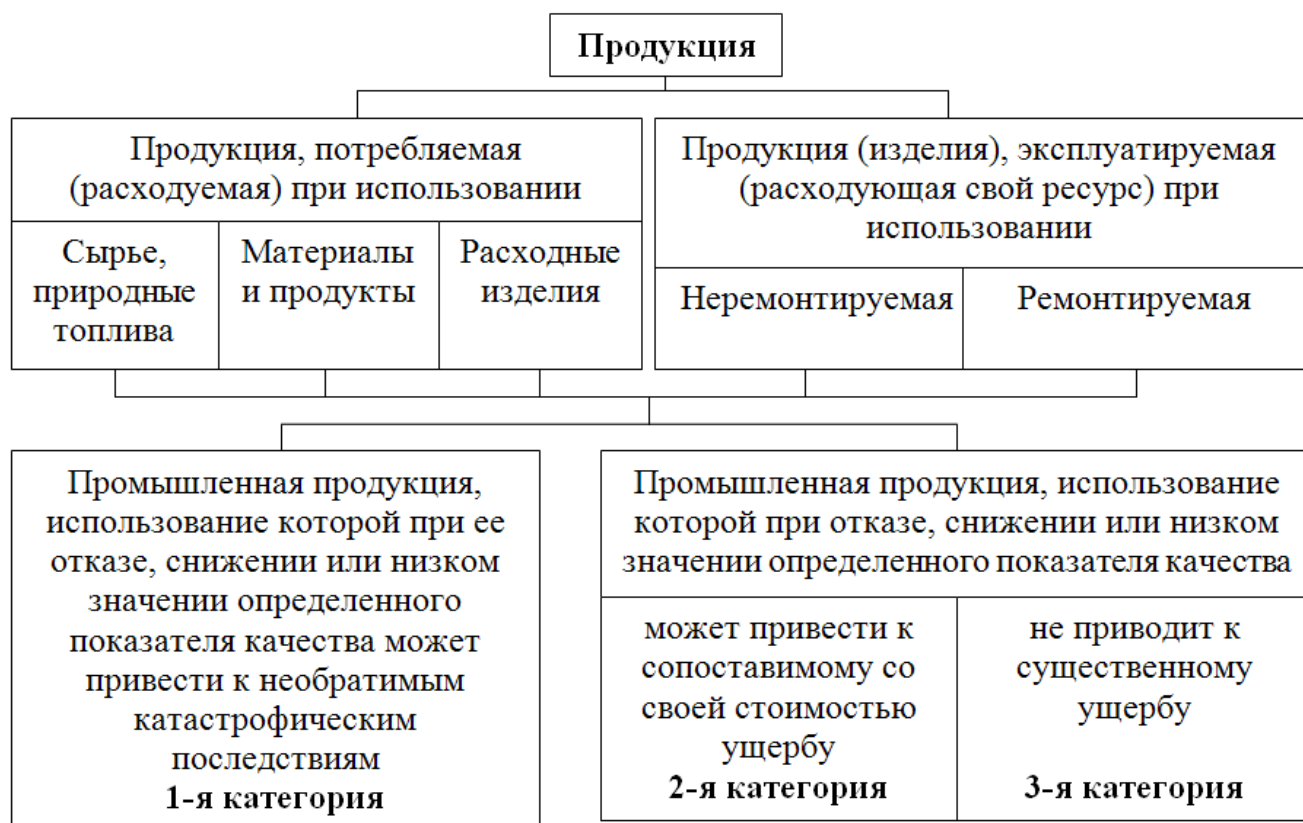


Рисунок 2 – Классификация промышленной продукции по признакам ее использования и последствиям от отказа, снижения или низкого значения определенного показателя качества [46]

Необходимо отметить, что в данной работе рассматривается поведение материалов в условиях высокоскоростного нагружения магнитно-импульсным методом, относящихся к промышленной продукции входящей в 1-ю категорию (рисунок 2).

Мишин В.М. в учебнике [55], предлагает классифицировать все показатели качества продукции, услуг и других объектов по различным признакам (рисунок 3).

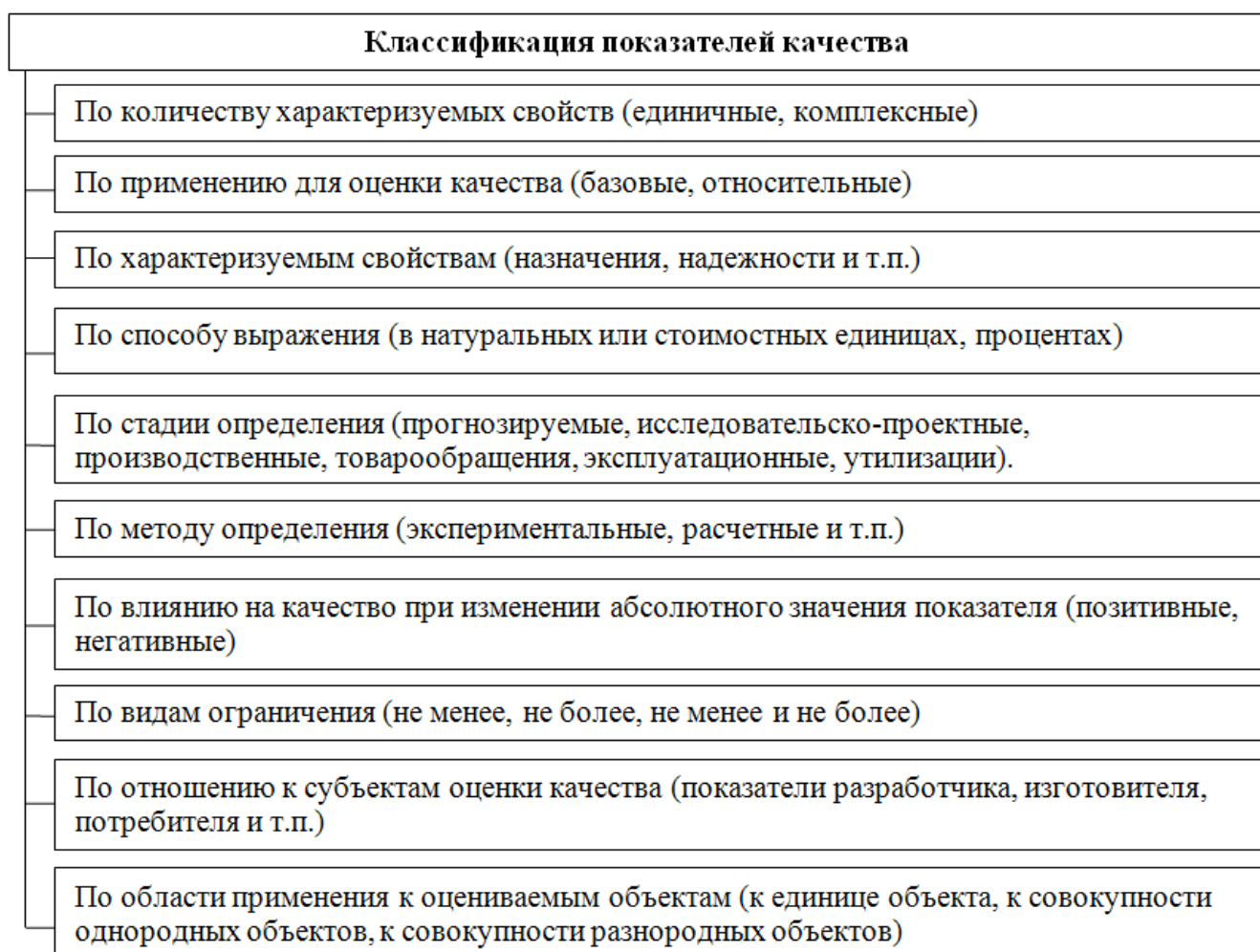


Рисунок 3 – Классификация показателей качества [55]

Однако группа авторов Минько Э.В., Минько А.Э., Смирнов В.П. [56], Федюкин В.К., [57] опираясь на РД 50-149-79 [58] представляют классификацию показателей качества продукции (ПКП) в таблице 4.

Таблица 4 – Классификация показателей качества продукции [56]

| № п/п | Признак классификации | Группы показателей качества продукции |
|-------|--|--|
| 1 | По характеризующим свойствам | Показатели назначения. Показатели экономного использования ресурсов (ресурсосбережения). Показатели надежности. Эргономические показатели. Эстетические показатели. Показатели технологичности. Показатели транспортабельности. Показатели стандартизации и унификации. Патентно-правовые показатели. Экологические показатели. Показатели безопасности. Экономические показатели. |
| 2 | По способу выражения | Показатели, выраженные в натуральных единицах. Показатели, выраженные в обобщенных единицах. |
| 3 | По количеству характеризующих свойств | Единичные показатели. Комплексные показатели (групповые, обобщенные, интегральные). |
| 4 | По применению для оценки | Абсолютные, относительные и базовые значения показателей. |
| 5 | По стадии определения значений показателей | Прогнозируемые, проектные, производственные, эксплуатационные показатели. |
| 6 | По размерности отражаемых свойств | Функциональные, долевыe, балльные, приведенные показатели. |
| 7 | По значимости при оценке качества | Основные и дополнительные показатели. |
| 8 | По характеру установления показателя | Регламентированное значение показателя. Номинальное значение показателя. Предельное значение показателя. Оптимальное значение показателя. |

Ниже более подробно уделено внимание признакам классификации показателей качества, относящимся к данной работе.

Первый признак классификации ПКП характеризует свойства продукции, который входит в состав ее качества и необходимый для обоснования, выбора номенклатуры ПКП, отвечающей потребностям населения, народного хозяйства, национальной безопасности страны и экспорта. Группы ПКП по этому признаку классификации применяются для включения в нормативно-техническую документацию (НТД), в технические задания (ТЗ) на разработку продукции, в планы научно-исследовательских работ (НИР) и опытно-конструкторские работы (ОКР), при контроле качества и испытаниях продукции, ее сертификации, для оценки качества продукции на всех этапах ее жизненного цикла. Система показателей качества продукции, характеризующих ее различные свойства, показана на рисунке 4 [46]. Здесь показаны группы показателей и наиболее характерные представители этих групп. Рассмотрим основные особенности этих показателей.

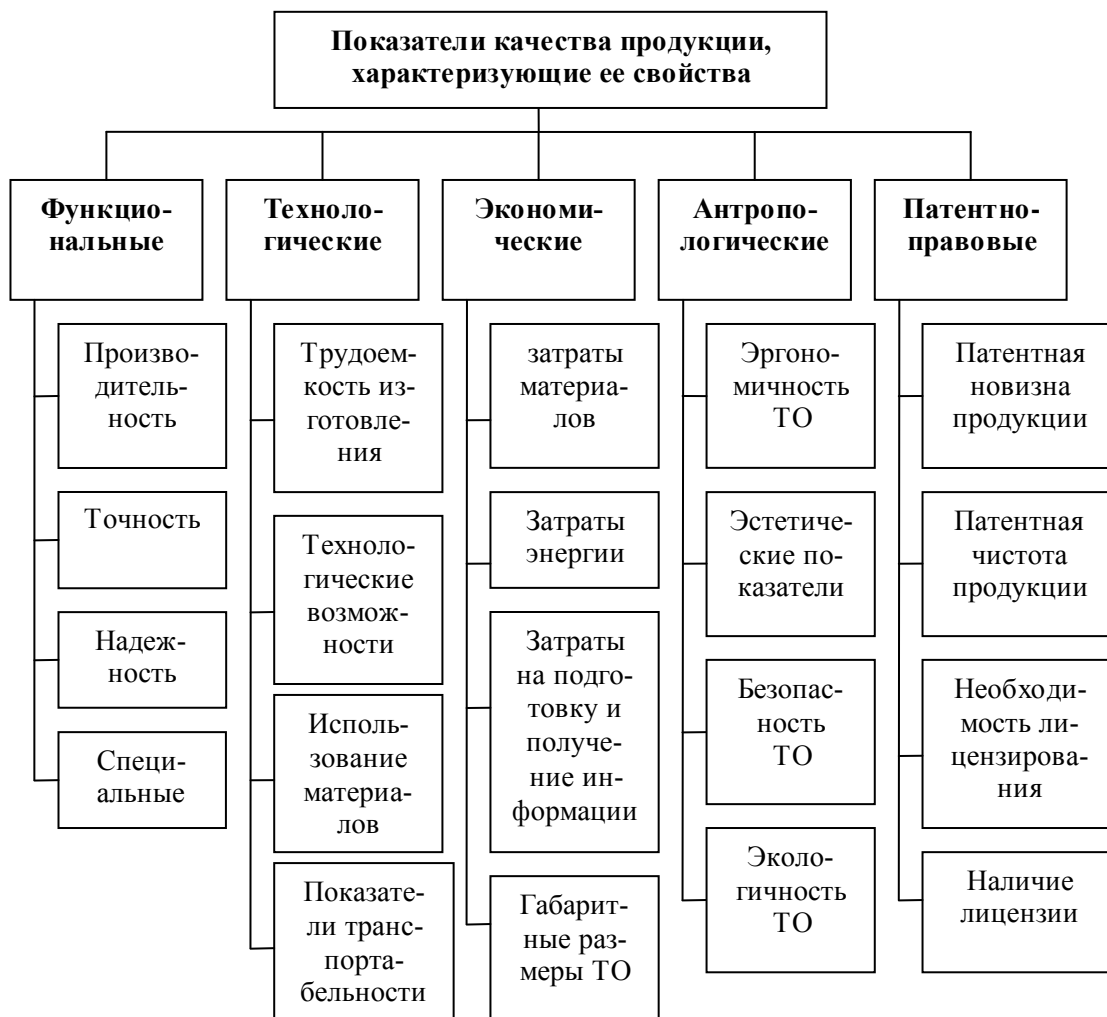


Рисунок 4 – Система показателей качества продукции, характеризующих ее различные свойства [46]

Функциональные показатели качества продукции. Для каждого технического объекта (ТО) функциональные показатели представляют собой характеристики основных потребительских свойств ТО. Эти показатели выявляют на основе описания функций ТО. Поскольку функции ТО характеризуются самыми различными показателями, то практически невозможно дать исчерпывающий перечень функциональных показателей качества. В связи с этим рассмотрим только некоторые наиболее часто действующие функциональные показатели. Среди них выделим показатель надежности. Под *надежность* понимается свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования. Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать: безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или определенные сочетания этих свойств [56, 59].

- *Безотказность* характеризуется свойством объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки.

- *Долговечность* - свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

- *Ремонтопригодность* понимается как свойство объекта, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта.

- *Сохраняемость* – это свойство объекта сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способности объекта выполнять требуемые функции, в течение и после хранения и (или) транспортирования.

Технологические показатели качества продукции конструкции изделия (ТКИ) являются важной составной частью оценки качества изделий, поскольку в комплексе характеризуют эффективность конструктивно-технологических решений с точки зрения приспособленности (адаптивности) изделия для его производства и использования в определенных условиях. *Технологичностью конструкции изделия* называется совокупность свойств конструкции изделия, определяющих ее приспособленность к достижению оптимальных затрат при производстве, техническом обслуживании и ремонте для заданных показателей качества, объема выпуска и условий выполнения работ [56, 60].

Экономические показатели качества продукции характеризуют затраты на разработку и изготовление продукции, связанные с обеспечением и повышением ее качества. Они характеризуют также экономическую эффективность использования продукции. Эти показатели позволяют дать экономическую оценку изделия путем учета затрат на всех стадиях его жизненного цикла [46, 56].

Второй признак классификации ПКП (Таблица 16) используется для технико-экономического анализа качества продукции, при котором необходимо знать эффективность каждого рассматриваемого свойства, выраженную в натуральных (м, вольт, байт, кг, ампер, и др.), или в обобщенных единицах (единицах стоимости, материалоемкости, трудоемкости и т. д.).

Третий признак классификации ПКП (Таблица 16) используется в различных методах оценки качества и характеризует охват свойств продукции [56].

Мишин В.М. [55] приводит показатели, чаще всего применяемые во время выполнения работ по оценке уровня качества, рисунок 5.



Рисунок 5 – Показатели, наиболее часто используемые при проведении оценки уровня качества [55]

Единичный показатель качества относится только к одному из свойств объекта. К примеру, средний срок хранения (сохраняемость); вероятность безотказной работы (безотказность).

В любом виде оценивания необходим эталон сравнения (при измерении веса используют килограмм, при измерении длины - метр и т.д.). В квалиметрии применяют *базовый показатель качества* - показатель качества объекта, принятый за эталон при сравнительных оценках качества. Базовые показатели подразделяют на единичные и комплексные.

Одно из свойств объекта может характеризовать и *относительный показатель качества* - отношение показателя качества оцениваемого объекта к базовому показателю качества, выраженное в относительных единицах.

Комплексный показатель качества - показатель качества объекта, относящийся к нескольким его свойствам. Данный показатель дает возможность, в общем, охарактеризовать качество объекта либо группу его свойств.

Из числа показателей качества выделяют *интегральный показатель* качества продукции для потребителя, в упрощенном варианте показывающий соотношение полезного эффекта от эксплуатации и затрат на приобретение и эксплуатацию продукции (количество эффекта/ед. затрат, в руб.) или в зависимости от физической сущности суммарного эффекта (объем затрат в руб./ед. эффекта).

Обобщенным (определяющим) показателем называют показатель качества, относящийся к такой совокупности свойств объекта, по которой принято решение оценивать его качество в целом [50].

Четвертый признак классификации ПКП (Таблица 16) предназначен для подбора базовых образцов продукции, с целью оформления карт технического уровня и качества продукции, в которых сравниваются значения показателей качества оцениваемой продукции и базового образца.

Пятый признак классификации ПКП (Таблица 16) предназначен для учета особенностей оценки качества продукции на различных стадиях ее жизненного цикла.

Шестой признак классификации ПКП (Таблица 16) характеризует размерность отражаемых свойств в зависимости от их природы и в зависимости от применяемого метода определения этого показателя.

Седьмой признак классификации ПКП (Таблица 16) отражает важность при оценке качества продукции каждого показателя или их совокупности. При этом основные показатели используются в качестве приоритета при выборе определенного варианта продукции из нескольких сравниваемых, а дополнительные – при уточнении принимаемого решения при близости значений основных ПКП.

Восьмой признак классификации ПКП (Таблица 16) ориентирован на характер и метод установления ПКП. При этом в соответствии с [54]:

- *регламентированное значение* ПКП – значение показателя качества продукции, установленное нормативной документацией;
- *номинальное значение* ПКП – регламентированное значение ПКП, от которого отсчитывается допускаемое отклонение (отклонение фактического значения ПКП от номинального значения, находящееся в пределах, установленных нормативной документацией);
- *предельное значение* ПКП – наибольшее или наименьшее регламентированное значение ПКП;
- *оптимальное значение* ПКП – значение ПКП, при котором достигается либо наибольший эффект от эксплуатации или потребления продукции при заданных затратах на ее создание и эксплуатацию или потребление, либо заданный эффект при наименьших затратах, либо наибольшее отношение эффекта к затратам.

В книге Мишина В.М. [55] приведена классификация показателей качества *по видам ограничений* НТД их численных значений (рисунок 6), которые имеют важное значение в квалиметрии для объективной оценки уровня качества продукции. В некоторых случаях значения допустимых ограничений определяются специалистами на основании условий использования и соответствующим требованиям потребителей.

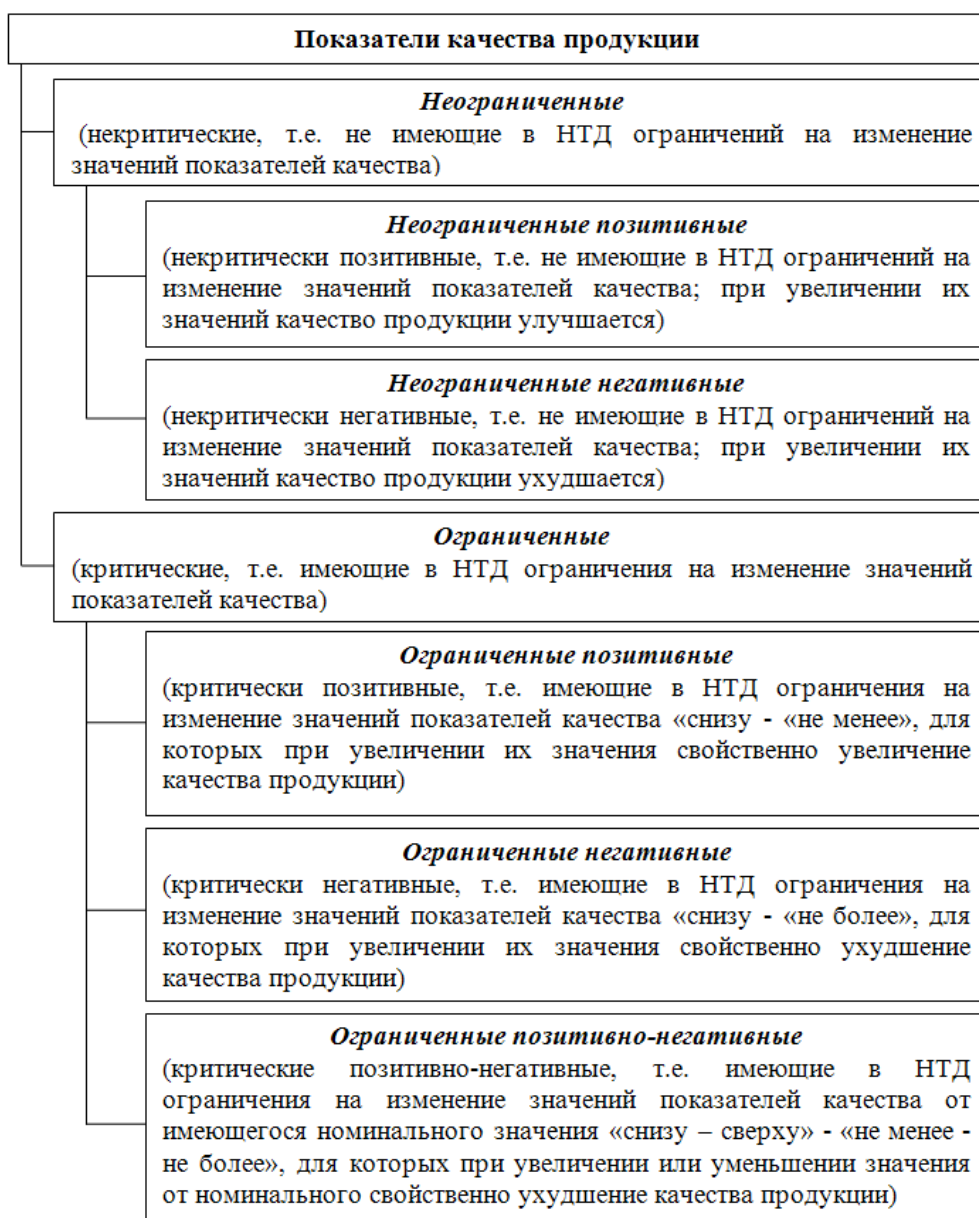


Рисунок 6 – Показатели качества продукции, классифицированные по видам ограничений их численных значений [55]

Благодаря классификации значительно упрощается математическое обоснование, как в оценке уровня качества, так и в расчете оптимизации отдельных показателей качества. Кроме того, показатели качества, классифицированные в соответствии с ограничениями, позволяют определить категорию продукции, подразделяемую по признаку последствий при отказе, снижении или низком значении одного или совокупности показателей [55].

1.4.2 Методы определения показателей качества продукции

От выбранного метода определения значений показателей качества в значительной степени зависит результат оценки качества продукции. Неудачно выбранный метод определения

значений ПКП может снизить точность и достоверность оценки качества продукции [56]. Классификация методов определения количественных показателей качества приведена на рисунке 7 [55].

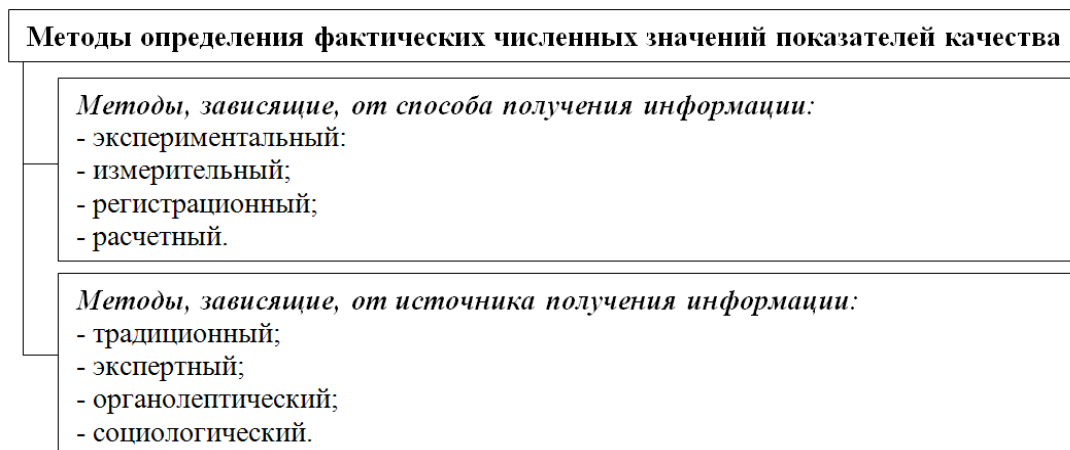


Рисунок 7 – Классификация методов определения фактических численных значений показателей качества [55]

Экспериментальный метод основан на получении информации о показателях в результате проведения эксперимента. Показатели измеряются приборами, регистрируются, рассчитываются, определяются экспертным или иным способом.

Измерительный метод применяют, когда есть возможность использовать средства измерений. Их применяют для проведения измерений: физических, электрических, физико-химических, и других, характеризующих, технический уровень изделия и условия жизнедеятельности персонала. Точность и объективность измеренных показателей зависят от метрологического обеспечения.

Регистрационный метод основан на непосредственной регистрации значений показателей, обнаружении и подсчете различных явлений, событий, объектов, затрат, документов и т.п., например, определяется численность в шгуках, сертификатов, поставщиков, объемы продаж, и т.п.

Расчётный метод основан на использовании различного рода данных, теоретических и эмпирических зависимостей, получаемых другими методами (регистрационным, измерительным и др.). С помощью этого способа, возможно, определить показатели технологичности, эффективности, надежности, стандартизации и унификации и т.п.

При традиционном методе фактические данные получают с помощью технических источников информации в лабораториях, испытательных станциях, ОТК, а также из документации, опросов, анкетирования, и т.п.

Экспертный метод применяется в тех случаях, когда трудно или практически невозможно использовать экспериментальный или расчетный методы. Его используют при опреде-

лении коэффициентов весомости показателей, численных значений показателей, которые не могут определяться какими-либо другими объективными методами; эстетические свойства, взаимоотношения, приоритеты и т.д.

Органолептический метод основан на использовании органов чувств, применяя способы: визуальный, обонятельный, тактильный, вкусовой и аудио метод при определении показателей.

Социологический метод предполагает сбор, анализ и обобщение мнений потребителей и используется, когда нет возможности другими способами определить какие-либо показатели, например удобство пользования, потребности и требования потребителей и т.п.

В большинстве случаев при определении показателей качества одновременно используют несколько из выше перечисленных методов (последовательно, параллельно или последовательно-параллельно) [55].

1.4.3 Выбор вида представления показателей

Выбор вида представления показателей качества зависит от того, сравниваются ли машины одного типоразмера, одного типа разных типоразмеров или машины разных типов и типоразмеров одного функционального назначения.

При оценке качества машин одного типоразмера целесообразно использовать *абсолютные (натуральные) значения* показателей качества (P_{ij}), т.е. $q_{ij} = P_{ij}$.

При оценке качества машин одного типа, но разных типоразмеров целесообразно использовать *относительные значения* показателей качества (q_{ij}), (формула 1), т. е.

$$q_{ij} = \frac{P_{ij}}{\tilde{A}_i} \quad (1)$$

где \tilde{A}_i – главный параметр машины. Например, для ленточного конвейера – ширина ленты.

При оценке качества изделий разных типов и типоразмеров целесообразно использовать *удельные значения* показателей качества (q_{ij}), (формула 2), т. е.

$$q_{ij} = \frac{P_{ij}}{\lambda_i} \quad (2)$$

где λ – функциональный критерий машины.

С физической точки зрения удельная величина характеризует затраты ресурсов, представленных показателями (P_{ij}), на достижение единицы конечного результата функционирования λ_i .

При оценке качества все показатели должны быть одного вида: либо абсолютными, либо относительными, либо удельными.

Использование удельных значений, при правильно выбранном функциональном критерии, обеспечивает однородность исходных данных и способствует объективности полученных результатов оценки [50].

1.4.4 Систематизация и классификация методик оценки качества промышленной продукции

Обзор существующих методик оценки качества даёт возможность сделать вывод, что общим для всех методик является процесс оценки уровня качества, состоящий из следующих основных этапов, приведённых на рисунке 8:

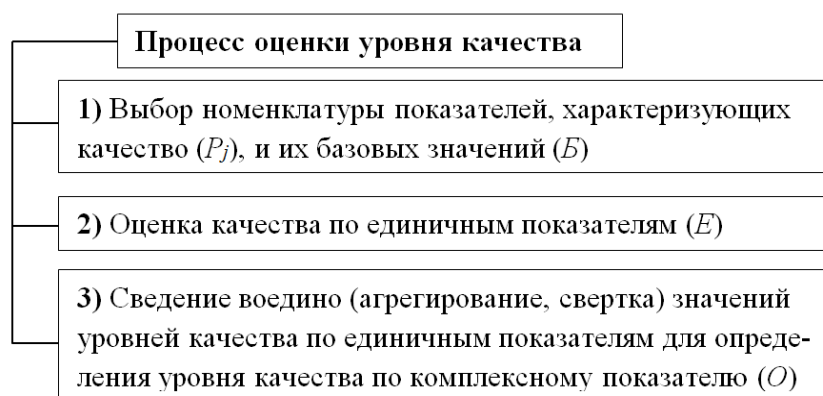


Рисунок 8 - Процесс оценки уровня качества

Этапы *B*, *E* и *O* – обозначают функциональные структурные элементы (составные части) методик оценки качества, которые связаны между собой по значениям показателей качества (абсолютные (*a*), относительные (*o*), удельные (*y*)).

Ниже представлена базовая структурная формула (3) процесса (*K*) оценки качества промышленной продукции, в которой показатели, характеризующие уровень качества, выражены в абсолютных (натуральных) величинах.

$$K = BaYaO \quad (3)$$

В процесс оценки уровня качества не всегда включены все три структурных элемента *B*, *E* и *O*, входящих в структурную формулу (3). Радкевич Я.М. [50] приводит классификацию процессов оценки качества промышленной продукции (таблица 5), составленную на основании метода структурной систематизации, разработанного проф. Солодом Г.И..

Таблица 5 - Классификация процессов оценки качества промышленной продукции [50]

| Принцип построения структурных формул | Согласование элементов | | | | | | Базовая формула | Сочленение элементов | | | | | | Совмещение элементов | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|------------------------------|---|---|-------------------------------|-----|-----|-----------------|------------------------------|------------------------|-----|-----------------|---|-------|-------------------------|---------------|------------------------|-----|-----------------|---|-------|---------------|--|-------|------|--------|
| | С вырождением двух элементов | | | С вырождением одного элемента | | | | С вырождением | | | С согласованием | | | Всех | С вырождением | | | С согласованием | | | С сочленением | | | Всех | |
| ФОРМУЛЫ | Б | Е | О | БаЕ | БаО | ЕаО | БаЕаО | БоЕ | БоО | ЕоО | БоЕоО | БоОаЕ | БаЕоО | | БоЕоО | БуЕ | БуО | БуО | БуЕоО | БуОаЕ | БаЕуО | БуЕоО | БуОоЕ | | БоЕуО |
| № ФОРМУЛ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | |
| Группа формул | I | | | II | | | | III | | | IV | | | V | | | VI | | | VII | | | | | |
| Методики оценки уровня качества | По абстрактным показателям | | | По абсолютным показателям | | | | По относительным показателям | | | | | | По удельным показателям | | | | | | | | | | | |
| Особенности методик оценки качества | Обособленные оценки | | | Функционально-неполные | | | | Полные | Функционально-неполные | | | С элементами оценки по абсолютным показателям | | | Полные | Функционально-неполные | | | С элементами оценки по абсолютным показателям | | | С элементами оценки по относительным показателям | | | Полные |

Примечание: Структурные элементы: *Б* – выбор базовых показателей; *Е* – оценка качества по единичным показателям; *О* – определение уровня качества по комплексному показателю. Связи структурных элементов: *а* – по абсолютным; *о* – относительным; *у* – удельным значениям показателей.

Рассмотрев все возможные комбинации структурных элементов при их отсутствии и замене рода связей a , o или y , между, этими элементами выведены 24 структурные формулы методик оценки качества, которые разделены на 7 групп (рисунок 9).

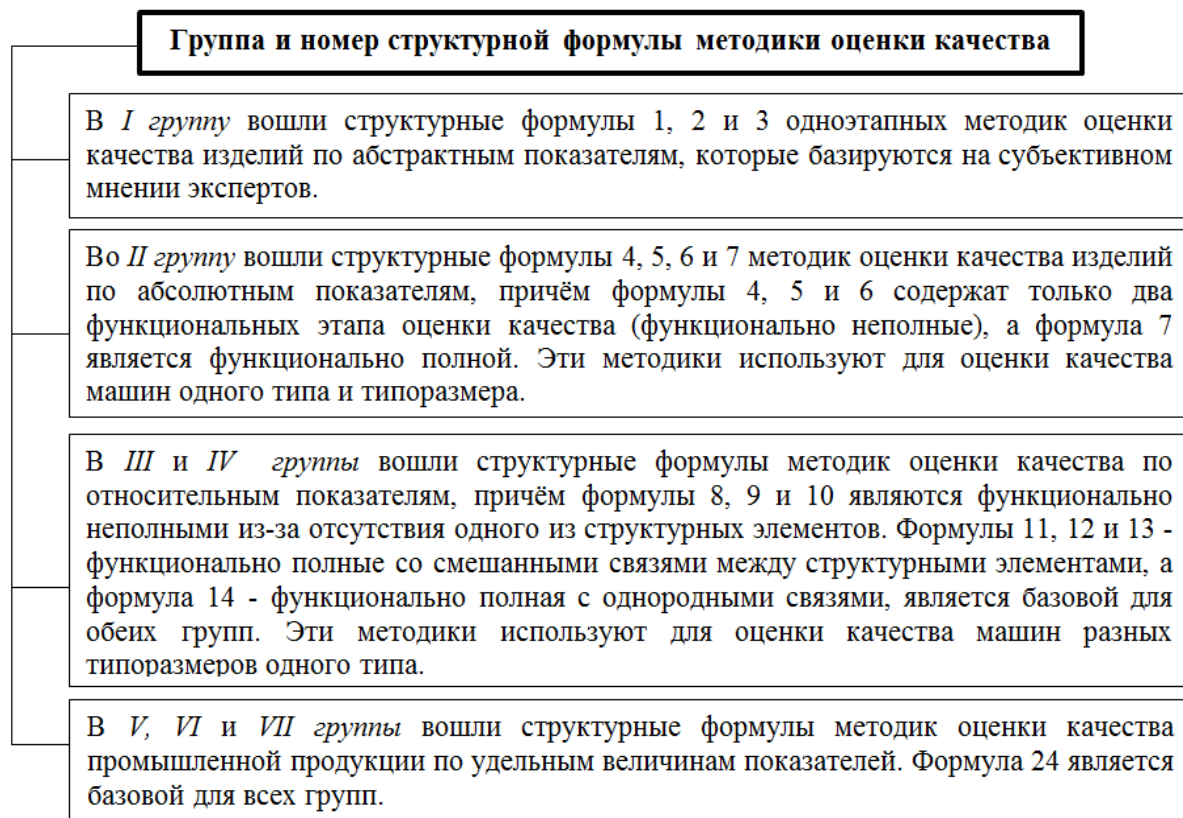


Рисунок 9 - Группы структурных формул методик оценки качества [50]

Перечисленные методики оценки уровня качества не дают возможность сравнивать между собой машины разных типов и типоразмеров одного функционального назначения, что в свою очередь затрудняет использование результатов оценки для прогнозирования уровня качества, для установления параметров, которые обеспечивают необходимый уровень качества продукции, ее конкурентоспособность на рынке [50].

1.4.5 Методы оценки качества продукции

Под *методом оценки качества продукции* (МОКП) понимается совокупность логических и математических операций по использованию отдельных ПКП или их определенного сочетания для определения качества изделия в целом на основе их сравнения с аналогичными вариантами изделий для принятия решения о выборе предпочтительного (лучшего) по качеству для потребителя варианта.

Аристов О.В. [48] приводит классификацию методов оценки уровня качества на рисунке 10, из которой, видно, что все методы могут быть разделены на два вида: методы прямого счета и параметрические методы.

Методы прямого счета обеспечивают получение конечного экономического результата, позволяющего принять экономически обоснованное решение.

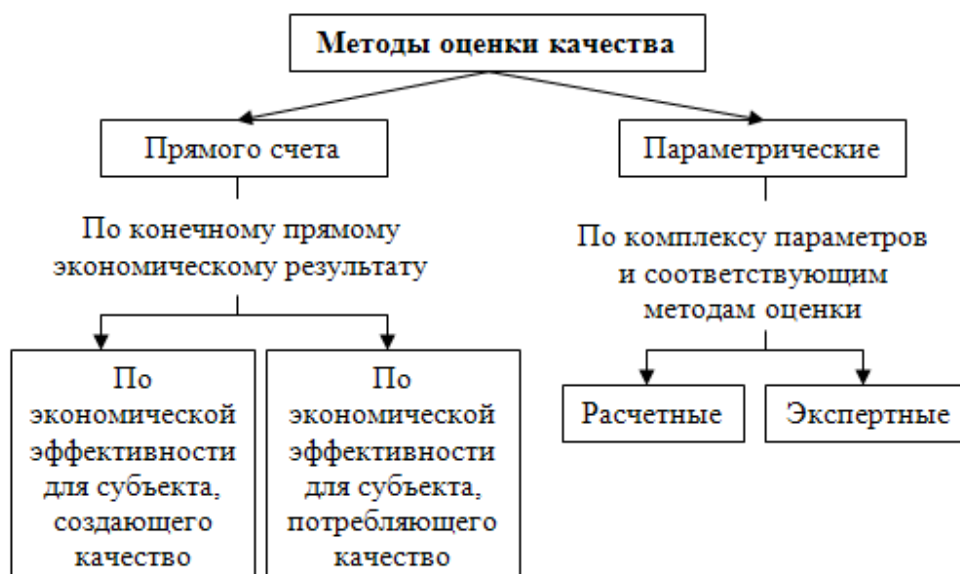


Рисунок 10 – Классификация методов оценки качества [48]

Параметрические методы с учетом специфики оцениваемых параметров подразделяются на:

- *расчетные методы* позволяют более точно оценивать уровень качества объектов, однако они могут быть применены для оценки так называемых жестких параметров (которые измеряются приборами и рассчитываются по формулам, отражающим объективные закономерности).

- *экспертные методы* оценки уровня качества применяются для оценки «мягких» параметров качества (которые нельзя измерить приборами и рассчитать по формулам, отражающим объективные закономерности, например, эстетические параметры, характеризующие внешний вид объекта).

В соответствии с [54] предусматривают следующие МОКП: дифференциальный, комплексный, смешанный и статистический методы.

По дифференциальному МОКП рассчитывают единичные показатели ее качества, в результате чего определяют: достигнут ли уровень базового образца в целом, по каким показателям он достигнут, какие из них наиболее сильно отличаются от базовых [57].

С помощью *комплексного метода* определяют уровень качества, характеризующийся одним обобщенным показателем, который служит для сравнения качества продукции на определен-

ный период времени с совокупностью показателей качества лучшего образца аналога. Обобщенный показатель представляет собой функцию от единичных показателей качества продукции.

Этот показатель может быть выражен:

- главным показателем, который отражает основное назначение продукции (при его определении устанавливают его функциональную зависимость от исходных показателей, отражающих физическую сущность процесса).

- интегральным показателем, который применяют, если, установлен суммарный полезный эффект от эксплуатации продукции и суммарные затраты на её создание и эксплуатацию.

- средним взвешенным показателем качества продукции.

Оценка уровня качества сложного оборудования производится смешанным методом, который основан на совместном применении единичных и комплексных показателей [56].

Аристов О.В. [48] в своей книге, приводит схему, определяющую логическую последовательность операций при комплексной оценке уровня качества объекта (рисунок 11).

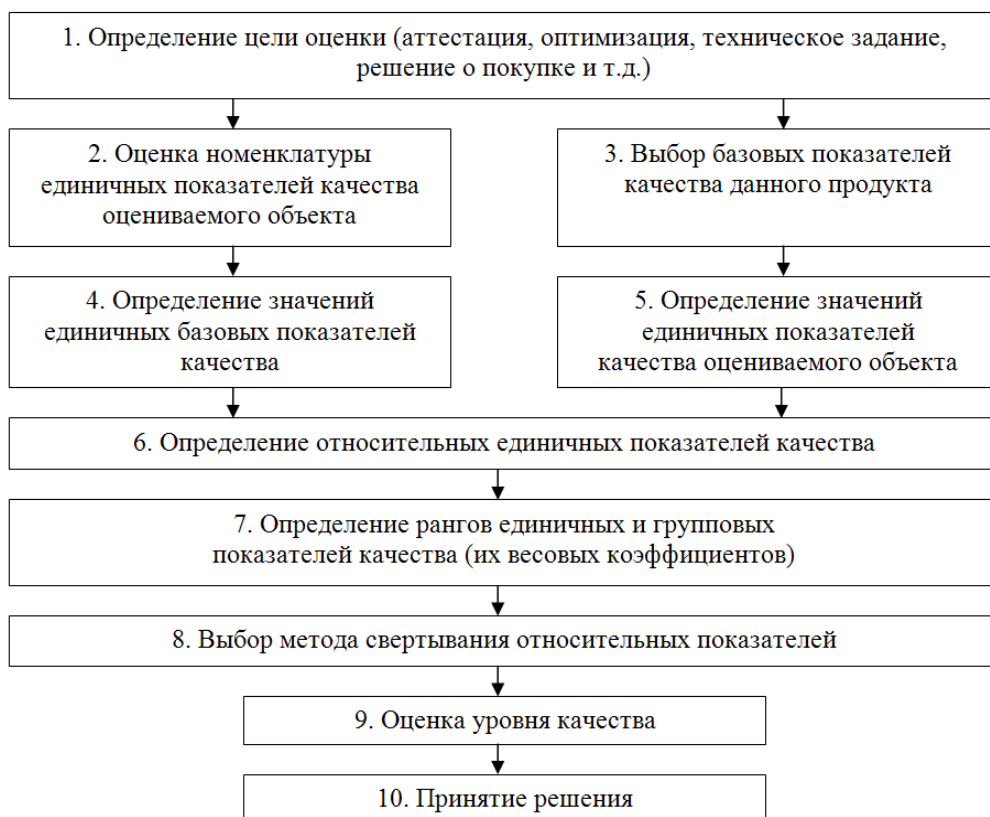


Рисунок 11 – Алгоритм комплексной оценки уровня качества объекта [48]

Рассмотренные выше методы оценки уровня качества применяться как в отдельности, так и в различных сочетаниях. Комплексная оценка уровня качества является наиболее универсальной и широко применяемой.

1.4.6 Статистические методы оценки показателей качества продукции

Под *статистический метод* понимается метод оценки качества продукции, при котором значения показателей качества продукции определяют с использованием правил математической статистики [54].

Точечное и интервальное оценивание параметров закона распределения случайных величин ПКП производят, например, при определении прочности на пробой изоляционных материалов, наработки до отказа неремонтируемых технических устройств, прочностных характеристик материалов при различных способах приложения нагрузки и т. п.

Статистическая точечная и интервальная оценка указанных ПКП зависит от выбора вида его закона распределения, который определяется характером физико-химических процессов в структуре материалов. Для выявления и обоснования закона распределения ПКП необходимо проведение статистических исследований, в которых чаще всего применяют метод максимума правдоподобия, метод моментов, байесовское оценивание и др.

Методы интервального оценивания устанавливают интервал, в котором с заданной доверительной вероятностью находятся значения исследуемых параметров распределения ПКП, что играет важную роль для обоснования предъявляемых к ПКП требований и норм.

Проверка гипотез состоит в проверке справедливости выдвинутой гипотезы по результатам наблюдений случайной величины ПКП с заданной доверительной вероятностью, например оценка доли дефектности, совокупности единиц продукции в результате выборочного контроля ее качества, и др.

Дисперсионный анализ основан на сравнении дисперсий двух выборок, которое позволяет с заданной доверительной вероятностью относить их принадлежность к одной и той же совокупности или считать такую принадлежность маловероятной. Данный метод применяется, если необходимо оценить влияние определенного фактора на изменение рассматриваемого ПКП.

Корреляционный анализ представляет собой совокупность основанных на математической теории корреляции методов выявления корреляционной зависимости между двумя случайными признаками или факторами. Если математическое ожидание одной из случайных величин меняется в зависимости от изменения другой, то они считаются корреляционно связанными. Данный анализ часто используется для оценки зависимости качества конечной продукции от определенных свойств сырья или исходных материалов.

Регрессионный анализ заключается в исследовании распределения коэффициентов регрессии, определяющих случайную величину как функцию от нескольких других [56]. Задачами регрессионного анализа являются установление формы зависимости между переменными, оценка функции регрессии, оценка неизвестных значений (прогноз значений) зависимой переменной [61].

Регрессионный анализ используется для изучения поведения коэффициентов весомости при комплексной оценке качества продукции [61-63].

1.5 Выводы по главе 1

На основе проведённого анализа работ известных авторов, можно сделать следующие выводы:

1. При обзоре установлено отсутствие в нормативной базе регламентов и стандартов, содержащих принципы и методологию проведения квалиметрической оценки материалов для труб, испытанных с помощью высокоскоростного нагружения кольцевых образцов магнитно-импульсным методом, что в свою очередь подтверждает необходимость научной разработки в этом направлении.

2. Выявлено отсутствие в настоящее время комплексных методик квалиметрической оценки материалов для труб, испытанных в области более короткого времени нагружения с помощью высокоскоростного расширения кольцевых образцов магнитно-импульсным методом.

3. Установлено, что в приведенных выше работах методы оценки качества применимы в большинстве случаев для тех объектов исследования, на примере которых и были представлены результаты проделанных работ. В то же время в некоторых работах уже рассмотрены такие квалиметрические инструменты как: функция желательности, диаграмма разброса, корреляционный анализ, паутина качества и дифференциальный метод, метод секторных диаграмм, ранжированный ряд. Но применение данных методов для квалиметрической оценки материалов, испытанных в области более короткого времени нагружения с помощью высокоскоростного расширения кольцевых образцов магнитно-импульсным методом нигде еще не было рассмотрено и предложено для практического применения.

4. Показана необходимость внедрения современных инструментов оценки качества и разработки методики квалиметрической оценки материалов для труб, испытанных в области более короткого времени нагружения с помощью высокоскоростного расширения кольцевых образцов магнитно-импульсным методом.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКОГО АППАРАТА ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО НАГРУЖЕНИЯ

2.1 Материалы исследований

В экспериментах по высокоскоростному расширению образцов магнитно-импульсным методом в качестве материалов использовались образцы в виде колец из алюминиевого сплава Д16 с внутренним диаметром 28 мм. Для испытаний с длинным периодом тока ($T = 7,4$ мкс) образцы имели толщину 0,11 – 0,40 мм и ширину 0,5 – 1,0 мм. В случае короткого периода ($T = 1$ мкс) – толщину 0,11 мм, ширину 1,0 мм. Также были испытаны образцы из алюминиевых и медных фольг толщиной 0,015 мм и шириной 1,0 – 5,0 мм. Последние испытывали с коротким периодом тока с надрезом и без надреза [24, 28, 64].

Было проведено комплексное исследование медных и алюминиевых образцов, условия испытаний и характеристики качества, которых приведены в таблицах 6 и 7.

Таблица 6 – Характеристики исследованных образцов из меди М1 [24, 28, 64]

| № п/п | Условия испытаний и наименование показателей качества | Значения показателей | | | | | |
|-------|--|----------------------|-------|----------------|-------|-------|----------------|
| | | Базовые №1 | №2 | №3 с надр. | №4 | №5 | №6 |
| 1. | Длительность импульса T , мкс | 38 | 1 | 1 | 5,5 | 0,1 | 0,08 |
| 2. | Размер зерна D_z , мкм | 4,6 | 2,5 | 0,8 | 0,72 | 0,57 | 0,84 |
| 3. | Твердость по Виккерсу HV , МПа | 722,4 | 405,4 | 705,8 | 283,9 | 734,7 | 1070,5 |
| 4. | Растягивающее напряжение σ , МПа | Не меньше 290 | 610 | 376 | 460 | | |
| 5. | Количество вязкой составляющей в изломе B , % | Не меньше 80 | 86 | 86 | 83 | 87,15 | |
| 6. | Количество пор на площади 400 мкм ² n , шт. | 282 | 96 | 380 | 117 | | 111 |
| 7 | Толщина кольца h , мм | - | 0,015 | 0,015 | 0,015 | 0,027 | 0,015 |
| 8 | Ширина кольца c , мм | - | 1,0 | 1,55 надр. 0,9 | 1,6 | 0,988 | 0,75 надр. 0,3 |
| 9 | Напряжение заряда конденсатора U , кВ | - | 28 | 20 | 20 | | |

| № п/п | Условия испытаний и наименование показателей качества | Значения показателей | | | | | |
|-------|---|----------------------|-------|------------|-------|-------|-------------|
| | | Базовые №1 | №2 | №3 с надр. | №4 | №5 | №6 |
| 10 | Энергия заряженного конденсатора W , Дж | - | 196 | 100 | 100 | | |
| 11 | Время до разрушения t , мкс | - | 4,7 | 6,6 | 3,7 | 2,0 | 0,150-0,200 |
| 12 | Амплитуда тока через катушку I , А | | 5800 | 8400 | | | |
| 13 | Площадь поперечного сечения S , мм ² | | 0,015 | 0,023 | 0,024 | 0,027 | 0,011 |

Таблица 7 – Характеристики исследованных образцов из алюминиевого сплава Д16 [24, 28, 64]

| № п/п | Условия испытаний и наименование показателей качества | Базовые №1 | Значения показателей | | | | | | | |
|-------|---|------------|----------------------|-------|------|-------|-------|-------|-------|------------------|
| | | | №2 | №3 | №4 | №5 | №6 | №7 | №8 | №9 |
| 1. | Длительность импульса T , мкс | 38 | 7,5 | 5,5 | 7,5 | 1 | 1 | 1 | 0,1 | 0,08 |
| 2. | Размер зерна D_z , мкм | 4,6 | 8,2 | 0,45 | 1,2 | 3 | 1,2 | 1,95 | 0,72 | 1,05 |
| 3. | Количество пор на площади 400 мкм ² n , шт | 53 | 91 | 64 | 121 | 70 | | | 56 | 36 |
| 4. | Твердость по Виккерсу HV , МПа | 1175 | 1461 | 992 | 1098 | 1202 | 288,9 | 240,6 | 2745 | 303,3 |
| 5. | Растягивающее напряжение σ , МПа | 100 | 104 | 150 | | 142 | 162 | | | |
| 6. | Количество вязкой составляющей в изломе B , % | 80 | 98,2 | 92,3 | 96,5 | 91,5 | 91,1 | 88 | 92,62 | |
| 7. | Время до разрушения t , мкс | 13,4 | 13,4 | 4,5 | 13,4 | 2,65 | 4,17 | | 0,3 | |
| 8 | Толщина кольца h , мм | - | 0,12 | 0,015 | 0,1 | 0,015 | 0,015 | 0,015 | 0,024 | 0,015 |
| 9 | Ширина кольца c , мм | - | 1,0 | 2,0 | 1,5 | 2,8 | 1,5 | 2,0 | 1,7 | 1,6 с надр. 0,75 |
| 10 | Напряжение заряда конденсатора U , кВ | - | 20 | 14 | | 26 | 20 | | | |
| 11 | Энергия заряженного конденсатора W , Дж | - | 100 | 49 | | 169 | 100 | | | |
| 12 | Амплитуда тока через катушку I , А | | 5700 | | | 4000 | 4200 | | | |
| 13 | Площадь поперечного сечения S , мм ² | - | 0,12 | 0,03 | 0,15 | 0,042 | 0,023 | 0,03 | 0,041 | 0,024 |

Перечень используемых в работе методов и оборудования приведен в таблице 8.

Таблица 8 – Методы и оборудование, используемые при исследовании

| Исследования | Методики | Оборудование | Условия испытаний |
|---------------------------------|--|---|--|
| Механические свойства | Измерение твердости по методу восстановленного отпечатка (метод Виккерса), (ГОСТ 9450-76 (СТ СЭВ 1195-78)) [65]. | Прибор ПМТ-3, микротвердомер SHIMADZU серии HMV-G | Нагрузка 20 г, выдержка 30 сек. Погрешность измерения ± 20 МПа. |
| | Испытания на расширение колец. | Две установки на базе генератора коротких высоковольтных импульсов ГКВИ-300 | Периоды синусоидального тока (T) 7,4 мкс и 1 мкс. Погрешность измерения $\pm 0,1$ мкс. Растягивающее напряжение ± 1 МПа. |
| Металлографические исследования | Определение количества вязкой составляющей в изломе (B , %) на поверхности разрушения образцов (ГОСТ 30456-97) [66]. Определение среднего размера зерна (ГОСТ 21073.1-75) [67]. Определение количества пор на площади 400 мкм^2 . | Оптический микроскоп Neophot-32, оптический микроскоп Axio-Observer-Z1-M. | Светлое и темное поля. Процент волокна в изломе $\pm 1\%$. Средний размер зерна $\pm 0,5$ мкм. Количество пор ± 1 . |

2.2 Магнитно-импульсный метод нагружения металлических материалов

В настоящей работе исследуются результаты испытаний образцов магнитно-импульсного методом при более коротком времени нагружения, полученные на базе лаборатории кафедры физической механики СПбГУ. Испытания проводились на двух установках реализованных на базе генератора коротких высоковольтных импульсов ГКВИ-300, обеспечивающего формирование электрических напряжений с амплитудами 30 – 300 кВ.

Схема нагружения представлена на рисунке 12. Ток, проходящий по катушке, на которой коаксиально располагается кольцевой образец, наводит в нем индукционный ток, а взаимодействие этих токов порождает силу отталкивания между соленоидом и кольцом [24, 28].

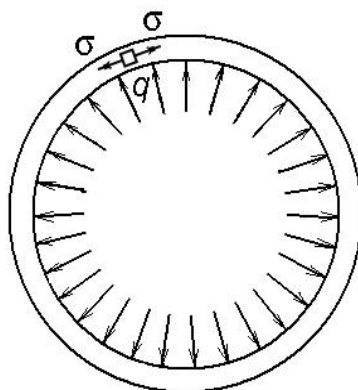


Рисунок 12 – Схема нагружения образца (q - нагрузка, σ - растягивающее напряжение) [24, 28]

Электрические блок-схемы установки при реализации синусоидальной нагрузки с периодом $T = 7,5 - 5,5$ мкс (модификация 1) и с периодом 1 мкс (модификация 2) приведены на рисунках 13 и 16 соответственно.

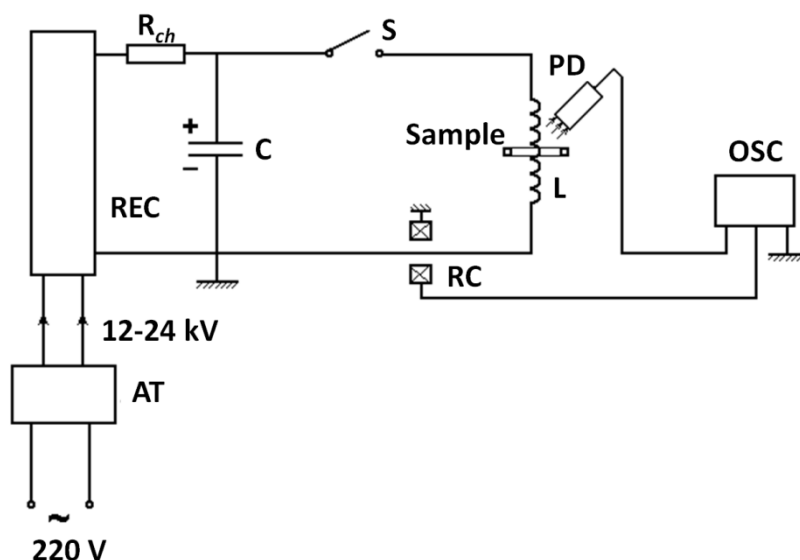


Рисунок 13 – Блок-схема установки при воздействии синусоидальной электромагнитной нагрузки с периодом $T = 7,4$ мкс: AT – автотрансформатор; REC – выпрямитель; R_{ch} – зарядное сопротивление; C – конденсатор; S – разрядник; RC – пояс Роговского; L – катушка (соленоид без сердечника); $Sample$ - образец (металлическое кольцо); D – фотодиод; OSC - осциллограф [24, 28]

При испытании кольцевых образцов с периодом синусоидального тока $T = 7,4$ мкс (рисунок 13) заряд конденсатора (C) осуществлялся от выпрямительного устройства (REC) с регулируемым напряжением от 12 до 24 кВ. Далее производился разряд конденсатора (C) через катушку (L) с помощью высоковольтного разрядника (S).

Катушка изготовлена из медного провода диаметром 1мм, имеет 5 витков, диаметр катушки 25 мм. Ток, проходящий через катушку, измерялся поясом Роговского (RC) и отображался на цифровом осциллографе (OSC), информация с которого записывалась на электронном носителе. При разрыве кольца (*Sample*), коаксиально закрепленного на середине катушки (L), возникала искра, которая позволяла с помощью фотодиода (PD) фиксировать момент разрушения образца. На рисунке 14, а показано устройство для испытания образцов, а на рисунке 25, б – фотография вспышки при разрыве кольца.

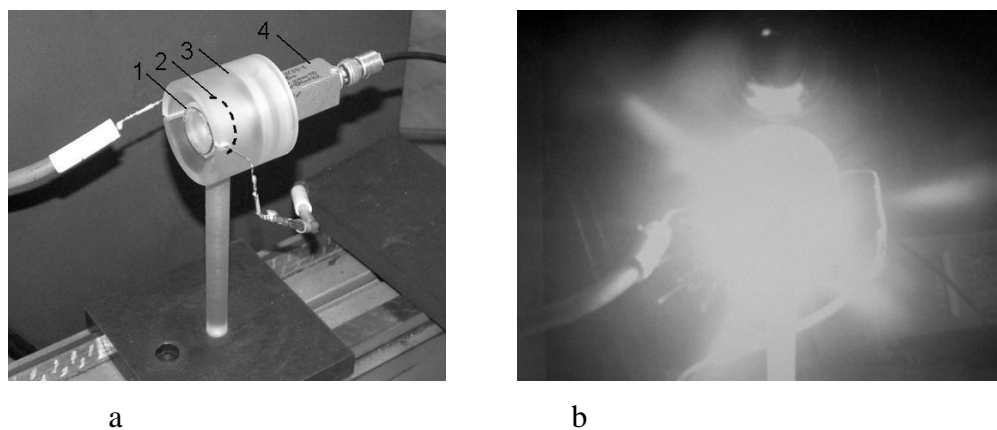


Рисунок 14 – Испытание образцов: а – при $T = 7,4 \mu\text{s}$ (1 – соленоид; 2 – образец; 3 – корпус, позволяющий улавливать фрагменты разрушенного образца; 4 – фотодиод); б – вспышка при разрушении образца [24, 28]

Более сложная установка применялась при испытании образцов, когда через катушку пропусклся ток с периодом затухающих колебаний $T = 1\text{мкс}$. Внешний вид установки приведен на рисунке 15.

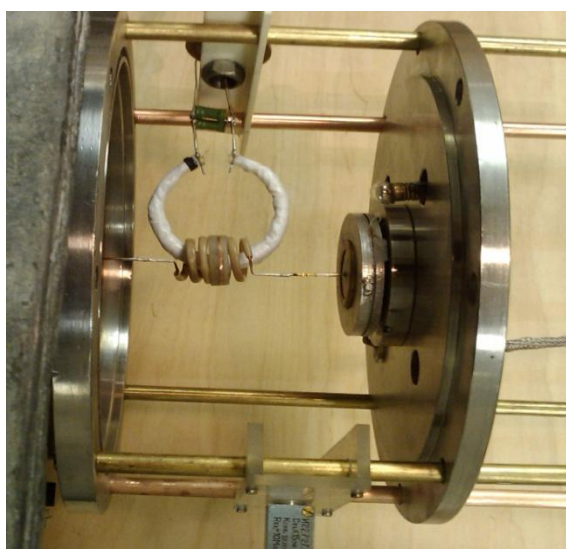


Рисунок 15 – Внешний вид установки, 1 – соленоид; 2 – образец; 3 – пояс Роговского, измеряющий ток в катушке; 4 – пояс Роговского, измеряющий ток в кольце; 5 – фотодиод; 6 – выходное устройство [24, 28, 64].

Ее блок-схема приведена на рисунок 16.

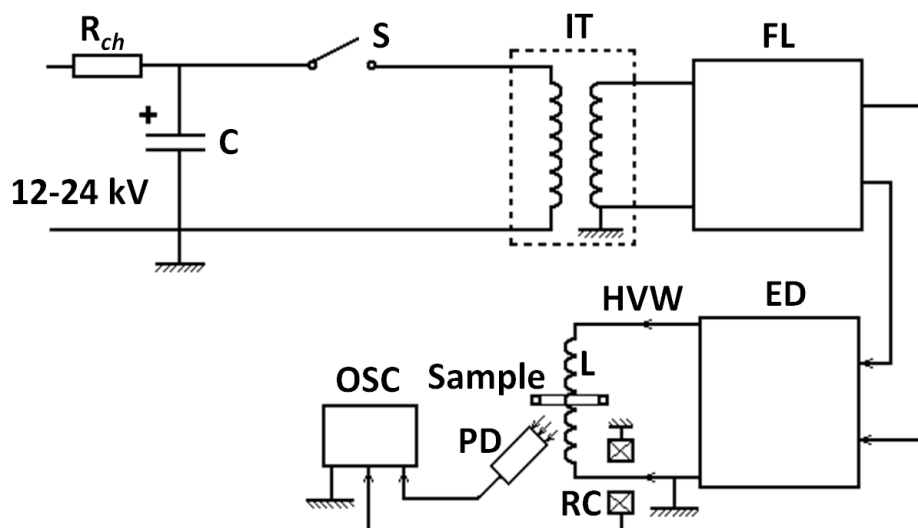


Рисунок 16 – Блок-схема установки при воздействии синусоидальной электромагнитной нагрузки с периодом $T = 1$ мкс: *IT* – импульсный трансформатор; *FL* – формирующая линия; *ED* – выходное устройство; *HVW* – высоковольтный электрод. *PD* – фотодиод; *RC* – пояс Роговского; *OSC* - осциллограф [24, 28, 64].

С помощью импульсного трансформатора (IT), системы двух связанных электрических контуров и формирующей линии (FL) напряжение синусоидального сигнала повышалось в 10 раз по сравнению с вышеописанным случаем (рисунок 13). Оно подавалось на эту же катушку через выходное устройство (ED). Однако, период колебаний тока здесь уже был $T = 1$ мкс [68].

2.3 Микроструктурные исследования

Поверхности разрушения алюминиевых и медных образцов после испытаний исследовались на оптическом микроскопе Axio-Observer-Z1-M в темном поле. Количество вязкой составляющей в изломе (В, %) определялось по формуле 4, приведённой в ГОСТ 30456-97 [66].

$$B = 100 - X \quad (4)$$

где X – доля хрупкой составляющей в рассматриваемой площади излома.

Площадь хрупкой составляющей определялась измерением площади хрупкого излома по фотографии.

Микрошлифы подготавливались с целью создания поверхности требуемого качества [70].

Подготовка микрошлифов проводилась в следующей последовательности:

1. Вырезка образца;
2. Закрепление;
3. Шлифовка;
4. Полировка;
5. Травление.

Площадь поверхности микрошлифа обычно составляет около 1 см^2 , высота образца для удобства обращения с ним должна быть не менее 10 мм. Для изготовления микрошлифов из образцов меньших размеров (лента, фольга, проволока и т.д.) после вырезки образцы помещены в цилиндрические формы и залиты сплавом Вуда.

Микрошлифы алюминиевых сплавов изготавливались с использованием шлифования, механического полирования и химического травления [71]. Время травления 10-20 с. После травления шлиф промывали под струей воды, быстро высушивали фильтровальной бумагой и протирали спиртовым тампоном. Поверхность каждого шлифа после окончания полирования и проведения травления изучали под оптическим микроскопом Axio-Observer-Z1-M, просмотрев образец в нескольких полях зрения при различных увеличениях.

Микроструктуру поперечных шлифов из алюминиевых и медных образцов исследовали на оптическом микроскопе Axio-Observer-Z1-M в светлом поле или поляризованном свете. Определялись размеры зерен и структурных составляющих. Для определения влияния обработки проводилось сравнение структуры поверхностных и центральных зон образцов, подвергнутых этой обработке.

Микротвердость определялась на микротвердомере SHIMADZU серии HNV-G по методу восстановленного отпечатка четырехгранной алмазной пирамиды с углом 136° между гранями и квадратным основанием (по методу Виккерса) [65].

2.4 Методика построения причинно-следственной диаграммы Исикавы

Диаграмма Исикавы позволяет выявить факторы, влияющие на качество труб из сплава Д16 и сосредоточиться на их причинах. При этом анализируются пять основных причинных факторов: человек, машина, материал, метод работ и измерения.

Для анализа данных факторов и построения диаграммы необходимо определить максимальное число причин, которые могут иметь отношение к проблеме.

Сначала формулируется проблема или дефект качества. В данном случае – качество труб из сплава Д16. Это «голова рыбы». Пять основных факторов анализа – человек (персонал), машина

(оборудование), материал, метод работ (технология) и измерения – это «большие кости скелета». Для каждого фактора на диаграмму наносят вероятностные причины возникновения проблемы получения ожидаемого качества – это «ребра», т.е. «средние» и «мелкие кости рыбьего скелета» [55].

2.5 Методика построения диаграммы Парето

Для построения диаграммы Парето необходимо определить значимость факторов качества, определенных в диаграмме Исикавы.

Если причины и признаки определенной проблемы выявлены и записаны, то можно определить важность каждого из них, и таким образом узнать наиболее существенные элементы, которым нужно уделять особое внимание.

Метод Парето позволяет выявлять основные факторы возникновения проблемы и расставлять приоритеты в их решении.

При использовании диаграммы Парето составляющие, по которым производится анализ, объединяются в три группы: А, В, С.

Первая группа объединяет три фактора, которые по своей величине превосходят все остальные. Их располагают в порядке убывания.

Во вторую группу входят три последующих фактора, в третью группу заносят остальные факторы, выделяя в качестве последней группу «прочие факторы». Считается, что на группу А обычно приходится 70-80%, на группу В – 10-25%, на группу С – 5-10%.

Располагают факторы в порядке убывания их значимости на качество материала, чтобы в конце стояли факторы, соответствующие меньшей значимости, и факторы, входящие в рубрику «прочие»;

Строят график, где каждому фактору соответствует свой прямоугольник, вертикальная сторона которого соответствует величине значимости фактора для получения желаемого качества материала, и вычерчивается кривая кумулятивной суммы, так называемая кривая Лоренца; на правой стороне графика откладывают значение кумулятивного процента.

По оси абсцисс откладывают факторы, влияющие на качество материала, по оси ординат – сумму общей значимости.

Подсчитывается общая накопленная сумма, принимаемая за 100% [55].

2.6 Инструмент квалиметрической оценки – диаграмма сравнения показателей качества

Дифференциальным методом оценки качества материалов определяется, соответствует ли качество оцениваемого образца качеству базового образца в целом, и какие показатели свойств оцениваемого образца превосходят или не соответствуют показателям базового образца, а также, на сколько отличаются аналогичные показатели свойств. При этом учитываются наиболее значимые свойства объекта и условно считаются как равнозначимые.

В соответствии с методом оценки [57, 71], рассчитаны отдельные относительные показатели уровня качества оцениваемой продукции q_i по прямой формуле (5) и обратной (6):

$$q_i = \frac{P_{i\text{баз}}}{P_{i\text{оц}}}, \quad (5)$$

$$q_i = \frac{P_{i\text{оц}}}{P_{i\text{баз}}} \quad (6)$$

где q_i – относительный показатель качества, оцениваемый по i -му свойству;

$P_{i\text{баз}}$ – значение i -го показателя базового образца;

$P_{i\text{оц}}$ – значение i -го единичного показателя свойства оцениваемой продукции.

Прямая формула (5) применялась для расчета относительных показателей качества, когда повышение качества образца характеризуется уменьшением показателей - длительность импульса, размер зерна, количество пор. Обратная формула (6) применялась для расчета относительных показателей, когда повышение качества характеризуется увеличением показателей - твердость, растягивающее напряжение, количество вязкой составляющей в изломе.

Количественно величины итоговых показателей качества образцов, т.е. уровень качества (Y_k) рассчитаны как средние арифметические значения всех уровней учитываемых свойств (q_i), сопоставляемых (оцениваемого и базового) образцов по формуле (7):

$$Y_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i. \quad (7)$$

Для более точной и более информативной оценки технического уровня, характеризующего качество изделия, строят диаграмму сравнения показателей качества, на которой наглядно видно, по какому показателю следует принимать управленческие и технические решения [72].

2.7 Инструмент квалиметрической оценки – функция желательности Харрингтона

Показатели желательности – безразмерные недискретные характеристики качества, изменяющиеся в пределах от нуля до единицы при любом диапазоне изменения размерных показателей качества x_i [73-75]. В основе построения обобщенной функции лежит идея преобразования натуральных значений частных параметров в безразмерную шкалу желательности. Вычисляют показатели желательности по следующей формуле (8):

$$d = \exp\left(-\frac{1}{y}\right) = \frac{1}{e^{1/y}} \quad (8)$$

где y – вспомогательный показатель (частный параметр оптимизации), $0 < y < \infty$.

Размерные значения x_i натуральных показателей качества пересчитывают в безразмерные вспомогательные показатели y по формуле (9):

$$y = a_0 + a_1 x_i \quad (9)$$

Чтобы найти коэффициенты a_0 , a_1 , необходимо иметь нормативные значения показателей желательности d , значения безразмерных показателей y , а также значения размерных показателей x_i для двух уровней градаций качества.

В таблице 9 приведена градация качества в зависимости от значений показателей желательности.

Значения частного параметра оптимизации переводятся в безразмерную шкалу желательности следующим образом. Нижнее или достигнутое значение частного параметра оптимизации ставится в соответствие с начальным значением желательности. Второй точкой может явиться значение частного параметра, которое соответствует наивысшей желательности с точки зрения технической возможности достижения максимального (минимального) результата.

Таблица 9 – Значения показателей желательности и соответствующих безразмерных вспомогательных показателей [73-75]

| Градация качества | Показатель желательности, d | Вспомогательный показатель, y |
|---------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| «Отлично» | $\geq 0,80$ | $\geq 4,50$ |
| «Хорошо» | $\geq 0,63$ | $\geq 2,18$ |
| «Удовлетворительно» | $\geq 0,37$ | $\geq 1,00$ |
| «Плохо» | $< 0,37$ | $< 1,00$ |

Промежуточные значения частных желательностей можно установить, используя линейное преобразование представлений частных параметров оптимизации в условном масштабе. Для определения коэффициентов a, a_1 используются две ранее установленные точки. Подставив в уравнение (9) соответствующие значения y и x , получим систему из двух уравнений, совместное решение которых позволит определить величину коэффициентов a, a_1 . После подстановки найденных коэффициентов в уравнение (9) можно определить любое значение y и значение функции желательности по величине именованного параметра оптимизации.

После перевода натуральных значений единичных показателей качества в безразмерные находят значение комплексного показателя качества в виде обобщенной функции желательности, которая определяется по следующей формуле (10):

$$D = \sqrt[m]{d_1 d_2 \dots d_m} = \sqrt[m]{\prod_{i=1}^m d_i} \quad (10)$$

где m – число частных желательностей;

d – частная желательность.

По данным таблицы 10 намечают зоны установленных качественных градаций и строят график функции желательности.

Таблица 10 - Значения функции желательности в основных и промежуточных точках [73-75]

| | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Числовые значения | y | 0,00 | 0,50 | 0,77 | 1,00 | 1,50 | 2,00 | 2,50 | 3,00 | 3,50 | 4,00 | 4,50 | 5,00 |
| | d | 0,00 | 0,14 | 0,28 | 0,37 | 0,51 | 0,61 | 0,67 | 0,72 | 0,75 | 0,78 | 0,80 | 0,82 |

Для построения функции y используют базовые точки функции желательности и граничные значения натурального показателя, определяемые стандартом или другим нормативно-техническим документом.

2.8 Инструмент квалиметрической оценки – планирование эксперимента

Планирование эксперимента представляет собой процедуру выбора числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для эффективного решения поставленной задачи с требуемой точностью.

При планировании в соответствии с методикой [76], был реализован полный двухфакторный эксперимент. Параметром оптимизации являлось время до разрушения алюминиевого образца, факторами оптимизации были выбраны длительность импульса и площадь поперечного сечения образца.

В выбранной линейной модели, для построения аппроксимирующей функции (11):

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (11)$$

где y – критерий оптимизации, величина которого контролируется в ходе эксперимента;

x_1, x_2, \dots, x_k – факторы, которые решено варьировать при проведении эксперимента.

которая строится в виде полинома (12):

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 \quad (12)$$

где b_0, b_1, b_2 - коэффициенты регрессии функции отклика.

определены основной уровень x_0 по формуле (13) и интервал варьирования I по формуле (14) управляющего параметра x_i .

$$x_0 = \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2} \quad (13)$$

где x_{\max} – нижний уровень фактора;

x_{\min} – верхний уровень фактора;

$$I = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2} \quad (14)$$

Для упрощения планирования эксперимента, кодирование реальных (натуральных) уровней x_i значений факторов проведено с помощью следующего преобразования (15):

$$x_j = \frac{x_i - x_0}{I_j}, \quad (15)$$

где x_i – натуральное значение фактора;

I_j – интервал варьирования;

x_0 – основной уровень;

x_j – кодированное значение.

В результате x_j принимает значения на границах $x_j = \pm 1$, на основном уровне $x_j = 0$.

По значениям факторов оптимизации (основной уровень (x_0), интервал варьирования (I_j), верхний уровень (x_{max}), нижний уровень (x_{min})) для проведенных экспериментов строится матрица планирования экспериментов.

Коэффициенты регрессии функции отклика рассчитаны по формуле (16).

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_j y_u}{N}, \quad (16)$$

где y_u – параметр состояния в u -том опыте;

N – общее число опытов.

Величина коэффициентов регрессии дает возможность проанализировать основные или линейные эффекты и эффекты взаимодействий – степени влияния соответствующих факторов и их взаимодействий. Статистическая значимость коэффициентов свидетельствует о значимости соответствующих эффектов.

2.9 Инструмент квалиметрической оценки – секторные диаграммы

Секторные диаграммы строятся по относительным показателям качества [77] и их коэффициентам весомости. Каждый показатель изображается на диаграмме в виде кругового сектора, радиус которого равен значению показателя относительно выбранного аналога, а центральный угол – коэффициенту весомости, выраженному условной величиной в градусах или радианах. Базовые значения для всех показателей изображаются окружностью, имеющей радиус, равный единице. Центральный угол для i -го показателя с коэффициентом весомости α_i определяется по формуле (17):

$$\varphi = 2\pi\alpha_i \text{ рад } (\varphi_i = 360^\circ\alpha_i, \text{ град}) \quad (17)$$

Уровень качества образца определяется на основе комплексного среднего взвешенного показателя Y_k , именуемого здесь средним взвешенным круговым показателем. Он равен радиусу круга, площадь которого равна сумме площадей секторов диаграммы. Его расчет осуществляется по формуле (18):

$$Y_k = \sqrt{\sum_{i=1}^n \alpha_i r_i^2} \quad (18)$$

где n – число относительных показателей качества; α_i – коэффициент весомости; r_i – значение i -го показателя.

Коэффициенты весомости показателей определялись экспертным методом ранжирования. Для этого привлекались 5 экспертов, которые составляли ранжированные ряды для характеристик образцов по возрастающей шкале порядка. Далее определяются суммы рангов каждого из объектов экспертной оценки и определяются коэффициенты весомости по формуле (19):

$$\alpha_i = \frac{\sum_{j=1}^m Q_{i,j}}{\sum_{i=1, j=1}^{n,m} Q_{i,j}} \quad (19)$$

где n – количество экспертов;

m – число оцениваемых показателей;

$Q_{i,j}$ – коэффициент весомости j -го показателя в рангах (баллах), который дал i -ый эксперт.

Точность экспертных оценок определяется по согласованности мнений экспертов. Степень совпадения оценок характеризует качество экспертизы и выражается коэффициентом конкордации (20):

$$W = \frac{12 \cdot S}{n^2(m^3 - m)}, \quad (20)$$

где S – сумма квадратов отклонений рангов или баллов каждого объекта от среднего арифметического значения; n – количество экспертов; m – число оцениваемых объектов.

При $W = 0$ – абсолютная несогласованность, а при $W = 1$ – полное совпадение мнений (оценок). Следовательно, $0 \leq W \leq 1$.

Использование секторных диаграмм может быть наглядным способом представления уровня качества при оценке материалов. Данным инструментом квалиметрической оценки, возможно, сравнить несколько образцов, определенных дифференциальным методом.

2.10 Инструмент квалиметрической оценки – Горизонтальные гистограммы

Горизонтальные гистограммы - это оперативный метод визуального анализа качества и конкурентоспособности материалов [78].

Суть метода заключается в представлении вариантов изделий в виде гистограмм. Определяются критерии выбора. Далее устанавливают значимость каждого критерия в процентах, откладывают их по вертикальной оси и через полученные точки восстанавливают перпендикуляры. В результате получены несколько (по числу критериев) горизонтально расположенных полей, ширина которого соответствует значимости каждого критерия. По горизонтальной оси откладывают значения самих критериев (следует предусмотреть градуировку для каждого критерия). Значения критериев откладывают вправо и влево от вертикальной оси.

Через полученные точки проводят вертикальные линии (каждая в пределах своего поля значимости критериев). Получаются два многоугольника, соответствующие вариантам изделий. Тот, чья площадь больше, соответствует лучшему варианту. Необходимо заметить, что выбор масштаба изображения гистограмм не оказывает влияния на соотношение площадей, так как они будут изменяться пропорционально.

2.11 Инструмент квалиметрической оценки – корреляционный анализ по диаграмме разброса

Диаграмма разброса представляет собой точечную диаграмму в виде графика, получаемого путем нанесения в определенном масштабе экспериментальных точек. Координаты точек на графике соответствуют значениям рассматриваемой величины и влияющего на него фактора. Расположение точек показывает наличие и характер связи между двумя переменными. По полученным экспериментальным точкам определяют числовые характеристики связи между рассматриваемыми случайными величинами: коэффициент корреляции и коэффициенты регрессии [79, 80].

Степень взаимосвязи коррелируемых пар признаков оценивалась с помощью коэффициента корреляции Пирсона, вычисляемого по формуле (21):

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (21)$$

где x_i и y_i - значение первого и второго параметра соответственно;

\bar{x} и \bar{y} - среднее значение первого и второго параметра соответственно.

Если $r = 1$ или $r = -1$, то между случайными величинами X и Y существует линейная функциональная зависимость ($Y = c + dX$), это указывает на полную корреляцию. При $r = 1$ значения x_i, y_i определяют точки, лежащие на прямой линии, имеющей положительный наклон (с увеличением x_i значения y_i также увеличиваются), при $r = -1$ прямая имеет отрицательный наклон.

В промежуточных случаях ($-1 < r < 1$) точки, соответствующие значениям x_i, y_i , попадают в область, ограниченную некоторым эллипсом. При $r > 0$ корреляция положительная (с увеличением x_i значения y_i имеют тенденцию к возрастанию), при $r < 0$ корреляция отрицательная. Чем ближе r к ± 1 , тем уже эллипс и тем теснее экспериментальные значения группируются около прямой линии.

Линия, вдоль которой группируются точки, может быть в форме параболы, гиперболы и т. д. В этих случаях необходимо рассматривать нелинейную (или криволинейную) корреляцию.

Таким образом, визуальный анализ корреляционного поля помогает выявить не только наличие статистической зависимости (линейную или нелинейную) между исследуемыми признаками, но и ее тесноту и форму.

В практической деятельности, когда число коррелируемых пар признаков X и Y не велико (n меньше 30), то при оценке зависимости между показателями используют следующую градацию:

- 1) *высокая степень взаимосвязи* – значения коэффициента корреляции находятся в пределах от 0,7 до 0,99;
- 2) *средняя степень взаимосвязи* – значения коэффициента корреляции находятся в пределах от 0,5 до 0,69;
- 3) *слабая степень взаимосвязи* – значения коэффициента корреляции находятся от 0,2 до 0,49.

Для оценки линейной связи между показателями применяют коэффициент корреляции Пирсона, вычисляемый по формуле (21). При малом объеме выборки ($n < 100$) значение коэффициента необходимо корректировать по формуле 22:

$$r^l = r \left[1 + \frac{1-r^2}{2(n-3)} \right] \quad (22)$$

Полученные значения коэффициентов корреляции r^l необходимо проверить на значимость по t -критерию Стьюдента. При этом выдвигается и проверяется нулевая гипотеза об отсутствии связи между x и y в генеральной совокупности. Для этого определяется расчетное значение критерия по формуле (23) [81] и сопоставляется с табличным значением t -критерия Стьюдента $t_{табл}$.

$$t_{расч} = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (23)$$

где n – число измерений.

2.12 Инструмент квалиметрической оценки – регрессионный анализ

Регрессионный анализ - инструмент квалиметрической оценки для исследования формы связи корреляционных пар данных. Для этого по статистическим данным получают уравнения зависимостей характеристик качества (линейная (24), логарифмическая (25), полиномиальная (26), степенная (27), экспоненциальная (28)), построены линии тренда и рассчитаны коэффициенты детерминации с использованием программы Microsoft Excel.

$$\bar{y}_x = a_0 + a_1 x \quad (24)$$

$$\bar{y}_x = a_0 + a_1 \lg x \quad (25)$$

$$\bar{y}_x = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 \quad (26)$$

$$\bar{y}_x = a_0 + a_1 x^x \quad (27)$$

$$\bar{y}_x = a_0 \exp(a_1 x) \quad (28)$$

где x – факторный показатель;

\bar{y} – результативный показатель;

a_0, a_1, a_2 – параметры уравнения регрессии, подлежащие определению.

Для уравнения зависимости (параболы 2-го порядка) (26) параметры a_0, a_1, a_2 рассчитаны по методу наименьших квадратов. Суть метода сводится к нахождению параметров такого уравнения регрессии, при котором обеспечивается минимальная сумма квадратов отклонений эмпирических (фактических) значений результативного показателя (y) от теоретических (\bar{y}_x), рас-

считанных по уравнению регрессии. Так, если $\bar{y}_x = a_0 + a_1x + a_2x^2$ должно соблюдаться следующее требование (29):

$$S = \sum (y - a_0 + a_1x + a_2x^2)^2 \longrightarrow \min \quad (29)$$

Найдя частные производные данной функции по a_0, a_1, a_2 и приравняв их к нулю, после несложных алгебраических преобразований получена система нормальных уравнений (30):

$$\begin{cases} na_0 + a_1 \sum x + a_2 \sum x^2 = \sum y, \\ a_0 \sum xa_2 + a_1 \sum x^2 + a_2 \sum x^3 = \sum xy, \\ a_0 \sum x^2 + a_1 \sum x^3 + a_2 \sum x^4 = \sum x^2 y. \end{cases} \quad (30)$$

после решения, которой найдены параметры исходного уравнения параболы 2-го порядка.

Определяется модель регрессии, которая наилучшим образом описывает зависимость пар данных, а коэффициенты детерминации принимают наибольшие значения.

Для измерения тесноты связи при криволинейной зависимости между результативным и факторным признаком определено теоретическое корреляционное отношение (индекс корреляции), $\eta_{теор}$ по формуле (31):

$$\eta_{теор} = \sqrt{\frac{\delta_{фактор}^2}{\sigma_y^2}} \quad (31)$$

где $\delta_{фактор}^2$ (32) - факторная дисперсия (дисперсия ряда теоретических значений результативного признака);

σ_y^2 (33) – общая дисперсия (дисперсия ряда эмпирических значений результативного признака).

$$\delta_{фактор}^2 = \frac{\sum (\bar{y}_x - \bar{y})^2}{n} \quad (32)$$

где \bar{y}_x – теоретические расчетные значения результативного признака, полученные по уравнению регрессии.

$$\sigma_y^2 = \frac{\sum (y - \bar{y})^2}{n} \quad (33)$$

Чем ближе значение η к 1, тем теснее связь между вариацией x и y . И наоборот, чем ближе η к 0, тем зависимость слабее. Обычно при $\eta < 0,3$ говорят о малой зависимости между коррелируемыми величинами, при $0,3 < \eta < 0,6$ – о средней, при $0,6 < \eta < 0,8$ – о зависимости выше средней и при $\eta > 0,8$ – о большой, сильной зависимости.

Качество составленных уравнений регрессии оценено с помощью величины достоверности аппроксимации (коэффициента детерминации), который равен квадрату коэффициента корреляции (R^2). Он показывает, в какой мере изменчивость y (результативного признака) объясняется поведением x (факторного признака), т. е. какая часть общей изменчивости y вызвана собственно влиянием x . Этот показатель вычисляется путём простого возведения в квадрат коэффициента корреляции. Тем самым доля изменчивости y , определяемая выражением $1 - R^2$, оказывается необъяснённой.

После нахождения по эмпирическим данным параметров уравнения регрессии, осуществлена проверка значимости уравнения регрессии (проверка адекватности модели).

Эта задача решалась путем расчета F -критерия Фишера (34) и сопоставления его с табличным (критическим) [81].

$$F = \frac{r^2}{1 - r^2} \frac{n - m}{m - 1} \quad (34)$$

где m – число параметров в уравнении регрессии;

$(m-1)$ – число степеней свободы для факторной дисперсии (теоретических значений y);

n – число наблюдений;

$(n-m)$ – число степеней свободы для остаточной дисперсии.

Расчётные F -критерии сопоставлены с табличным (критическим), определенным для числа степеней свободы $\nu_1 = m-1$ и $\nu_2 = n-m$ и заданного уровня значимости $\alpha = 0,05$. Если выполняется условие $F_{расч} > F_{табл}$, то рассматриваемые уравнения регрессии являются значимыми.

2.13 Построение причинно-следственной диаграммы Исикавы

Причинно-следственная диаграмма Исикавы – инструмент, который позволяет выявить наиболее существенные факторы (причины), влияющие на конечный результат (следствие).

Диаграмма Исикавы строится по методике, описанной в п. 2.4.

Построенная диаграмма приведена на рисунке 17.

Выводы: в результате анализа диаграммы Исикавы видно, что наиболее значимыми факторами, влияющими на качество труб из сплава Д16, являются (выделены на диаграмме с помощью символа «☆» чем менее значителен фактор, тем большим количеством символов он выделен):

- химический состав ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆
- опыт персонала ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆
- точность приборов ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆
- построение электрической цепи ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆
- сила воздействия ☆ ☆ ☆ ☆ ☆
- размеры, форма образцов ☆ ☆ ☆ ☆
- механические свойства ☆ ☆ ☆
- время воздействия ☆ ☆
- магнитно–импульсный метод ☆

Необходимо направить усилия на изучение и улучшение вышеперечисленных факторов.

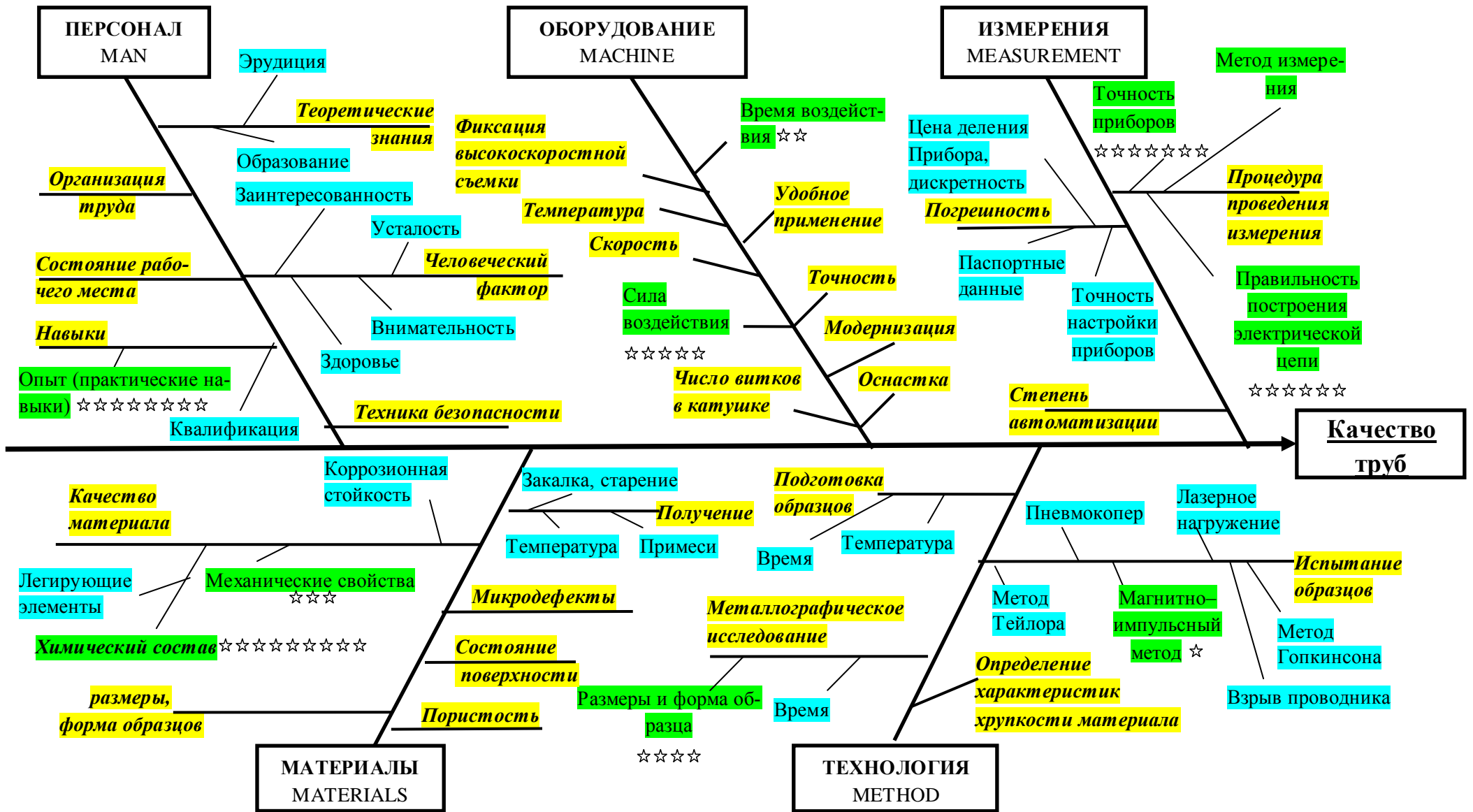


Рисунок 17 – Диаграмма Исикавы

2.14 Построение Диаграммы Парето

На основании данных, полученных из диаграммы Исикавы, построена диаграмма Парето для выявления наиболее значимых факторов, влияющих на качество испытаний труб из сплава Д16. Методика построения диаграммы Парето изложена в п. 2.5.

В таблице 11 представлены относительные значения факторов, получившиеся на основании экспериментальных исследований параметров, влияющих на качество испытаний труб из сплава Д16.

Таблица 11 – Определение значимости факторов, влияющих на качество испытаний труб из сплава Д16

| № | Фактор качества | Значимость | % от общей значимости |
|---|-------------------------------|------------|-----------------------|
| 1 | Магнитно–импульсный метод | 35 | 35 |
| 2 | Время воздействия | 23 | 23 |
| 3 | Механические свойства | 12 | 12 |
| 4 | Размеры, форма образцов | 9 | 9 |
| 5 | Сила воздействия | 7 | 7 |
| 6 | Построение электрической цепи | 5 | 5 |
| 7 | Точность приборов | 4 | 4 |
| 8 | Опыт персонала | 3 | 3 |
| 9 | Химический состав | 2 | 2 |
| | Итого: | 100 | 100 |

На основании данных таблицы 11 построена диаграмма Парето, кумулятивная кривая Лоренца (Рисунок 18, а) и проведён ABC-анализ.

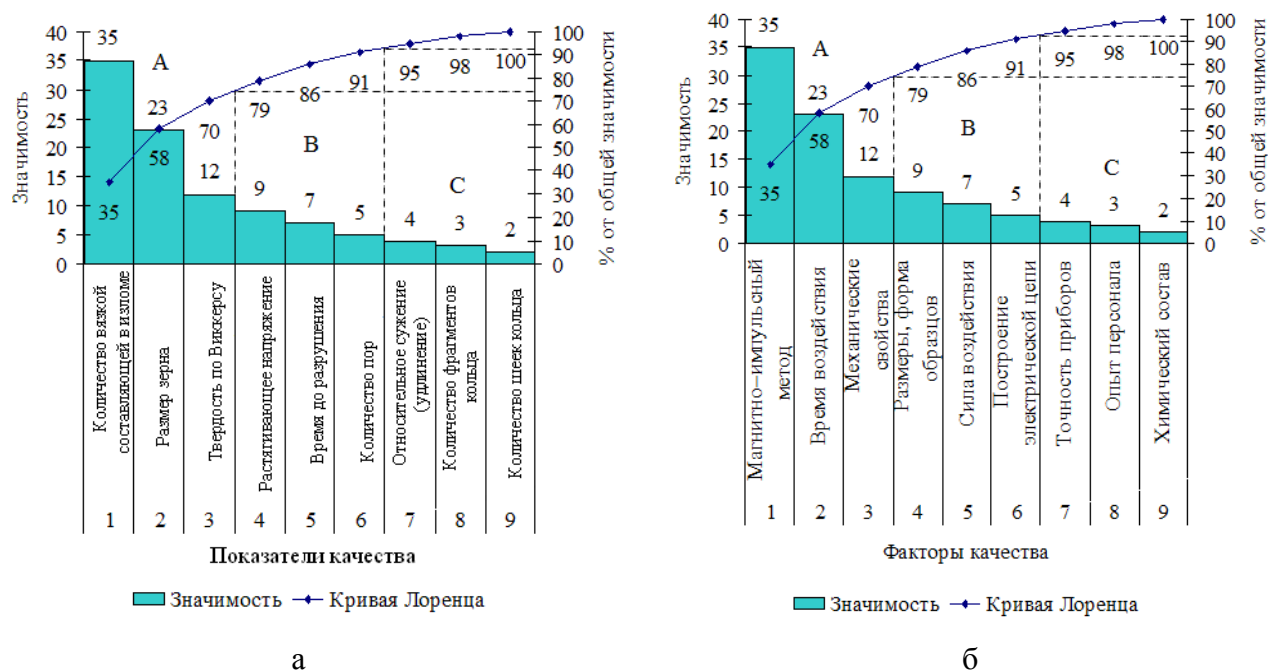


Рисунок 18 – Диаграмма Парето

Из построенной диаграммы Парето и проведенного ABC- анализа можно сделать следующие выводы:

- факторы А - части – магнитно–импульсный метод, время воздействия и механические свойства – являются наиболее значимыми факторами, влияющими на качество испытаний труб из сплава Д16;

- факторы В - части – размеры, форма образцов, сила воздействия, построение электрической цепи – являются менее значимыми для качества испытаний труб факторами;

- факторы С - части – точность приборов, опыт персонала, химический состав – являются малозначимыми факторами, влияние которых на качество испытаний труб незначительно.

В связи с наибольшей значимостью метода воздействия магнитно–импульсного нагружения в последующем все исследования проводятся с использованием этого метода на кольцевых образцах.

В СНиП 2.05.06-85 [82] существуют нормы на прочность и устойчивость магистральных трубопроводов и изделий в условиях ударного воздействия, но до настоящего времени не представлено методики и нормативной документации, которые регламентировали бы параметры трубопроводов в условиях ударного воздействия при скоростях около 300 м/с, действующей нагрузке 10^4 с^{-1} и длительности импульса микросекундного диапазона, поэтому, возникает необходимость, уточнить основные и ввести дополнительные показатели качества трубопроводов и изделий в приведенных условиях ударного нагружения.

На основе экспериментальных исследований параметров при ударном воздействии, влияющих на сопротивление разрушению труб из сплава Д16 и норм СНиП 2.05.06-85 представленных в таблице 12 построена диаграмма Парето, кумулятивная кривая Лоренца (Рисунок 18, б) и проведен ABC-анализ.

Таблица 12 – Определение значимости показателей качества, влияющих на сопротивление разрушению при ударном воздействии труб из сплава Д16

| № | Показатель качества | Значимость | % от общей значимости |
|---|---|------------|-----------------------|
| 1 | Количество вязкой составляющей в изломе, <i>B</i> | 35 | 35 |
| 2 | Размер зерна, <i>D₃</i> | 23 | 23 |
| 3 | Твердость по Виккерсу, <i>HV</i> | 12 | 12 |
| 4 | Растягивающее напряжение, <i>σ</i> | 9 | 9 |
| 5 | Время до разрушения, <i>t</i> | 7 | 7 |
| 6 | Количество пор на площади 400 мкм ² , <i>n</i> | 5 | 5 |
| 7 | Относительное удлинение, <i>δ</i> | 4 | 4 |
| 8 | Количество фрагментов кольца, <i>n_φ</i> | 3 | 3 |
| 9 | Количество шеек, <i>n_ш</i> | 2 | 2 |
| | Итого: | 100 | 100 |

Из построенной диаграммы Парето и проведенного ABC- анализа можно сделать следующие выводы:

– факторы А - части – количество вязкой составляющей в изломе, размер зерна, твердость по Виккерсу – являются наиболее значимыми факторами, влияющими на сопротивление разрушению при ударном воздействии труб из сплава Д16;

– факторы В - части – растягивающее напряжение, время до разрушения, количество пор – являются менее значимыми для качества труб факторами;

– факторы С - части – относительное удлинение, количество фрагментов кольца, количество шеек кольца – являются малозначимыми факторами, влияние которых на качество труб незначительно, поэтому в дальнейшем не рассматриваются.

Таким образом, с помощью диаграммы Парето уточнены основные и введены дополнительные показатели качества: твердость, растягивающее напряжение, количество вязкой составляющей в изломе, время до разрушения, размер зерна, количество пор.

2.15 Разработка рабочей инструкции «Разработка и правила оформления документированных процедур, рабочих инструкций, форм»

При описании любой деятельности в системе менеджмента качества (СМК) предприятия и для определения единого порядка оформления документированных процедур (ДП), рабочих инструкций (РИ) и форм (Ф), разработана рабочая инструкция «Разработка и правила оформления документированных процедур, рабочих инструкций, форм», содержание которой приведено ниже.

1 Цель

Определить единый порядок оформления документированных процедур (ДП), рабочих инструкций (РИ) и форм (Ф), используемый при описании любой деятельности в системе менеджмента качества (СМК) по ГОСТ ISO 9001-2011.

2 Область применения

Обязательно для всех разработчиков ДП, РИ, Ф.

3 Термины и определения

ДП – установленный и документально оформленный способ осуществления деятельности в СМК.

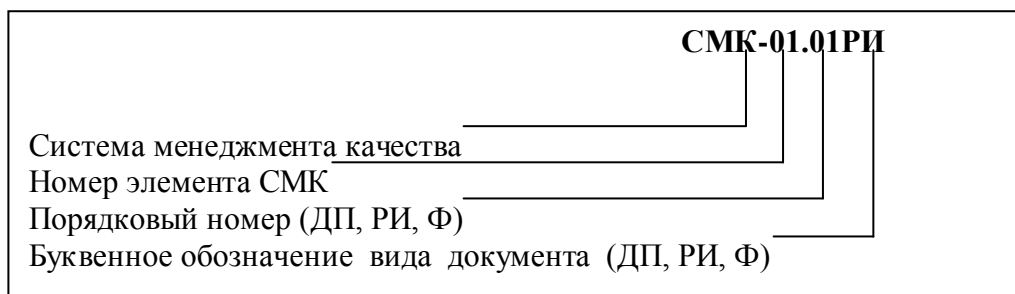
РИ – документ, содержащий требования к действиям, которые необходимо выполнить в СМК.

Ф – отчеты и документы, в которых отражают различные аспекты контроля качества.

4 Описание

4.1 Идентификация документированных процедур, рабочих инструкций, форм

Для обозначения ДП, РИ, Ф используется следующий принцип идентификации:



4.2 Разработка и оформление документированных процедур и рабочих инструкций

Форма представления ДП и РИ и правила заполнения их разделов приведены в Приложении А.

Разработка ДП (РИ) предполагает:

- заполнение верхнего колонтитула для первой и последующих страниц;
- заполнение нижнего колонтитула на первой странице;
- описание ДП (РИ) (данного вида деятельности) по разделам;
- составление (при необходимости) графического представления описания ДП (РИ) с использованием символьных обозначений, приведенных в Приложении Б.

4.3 Разработка и оформление форм

Форма (Ф) разрабатывается и оформляется на листах формата А4 с обязательным указанием в правом верхнем углу идентификации документа (см. п. 4.1) и указанием его версии.

4.4 Правила графического представления документированных процедур (рабочих инструкций)

4.4.1 ДП (РИ), как способ описания деятельности, состоит из последовательности взаимосвязанных работ, изображаемых элементом «Работа» - п.2 Приложения Б.

4.4.2 Выполненная работа, в зависимости от ее вида и содержания, отображается символом • - см. п.2 Приложения Б.

4.4.3 Каждый результат предыдущей работы инициирует переход к следующей работе, который показывается элементом «Стрелка» – п. 1 Приложения Б.

4.4.4 Документ (несколько документов), которым руководствуются при выполнении работы, отображается элементом «Ссылка» – п.3 Приложения Б.

4.4.5 Документ (несколько документов), который создается или заполняется при выполнении данной работы, отображается элементом «Ссылка» – п. 4 Приложения Б.

4.4.6 В п.п. 5 и 6 Приложения Б также показаны другие символьные обозначения, используемые при составлении графического представления процедур.

4.5 Правила определения работы

4.5.1 Содержание работы, которая является этапом выполнения ДП (РИ), определяется набором правил, инструкций, предписаний и других документов, включённых в систему качества предприятия в качестве внутренних или внешних документов.

4.5.2 Если при выполнении работы происходит изменение ответственного лица или смена объекта, над которым выполняется работа, то такая работа должна быть разбита на две работы.

4.5.3 Каждой работе присваивается номер, указываемый в левом верхнем углу графического элемента «Работа» и наименование. В наименовании работы, по возможности, должны отражаться содержание и цель её выполнения.

4.6 Приложения

Приложение А – «Заполнение полей и содержание разделов ДП (РИ)».

Приложение Б – «Символьные обозначения графического представления ДП (РИ)».

Приложение В – «Лист регистрации изменений»

Приложение Г – «Лист ознакомления с СМК-01.01РИ и изменениями к ней»

5 Документы

ГОСТ ISO 9001-2011 Системы менеджмента качества. Требования.

2.16 Разработка документированной процедуры «Процесс менеджмента ресурсов»

На основе разработанной рабочей инструкции предложена документированная процедура «Процесс менеджмента ресурсов», содержание которой приведено ниже.

Цель

Описать порядок действий при внедрении и использовании инструментов качества для анализа и контроля качества продукции и процессов в системе менеджмента качества предприятия.

Область применения

Применяется во всех подразделениях предприятия, где вводятся инструменты качества, анализа и контроля качества продукции и процессов.

Термины и определения

В данном документе используются термины и определения, данные в ГОСТ ISO 9000-2011.

Описание

Процесс принятия решения об использовании инструментов качества представлен в Приложении Д.

Потребность в применении инструментов качества определяется руководителями подразделений и служб по результатам анализа деятельности предприятия.

Предложения и обоснования потребности в применении инструментов качества представляются в службу качества (СлК) в письменном виде в произвольной форме.

В случае решения СлК о нецелесообразности применения инструментов качества заключение рассматривается Уполномоченным по качеству. При разрешении разногласий в заключении СлК уполномоченный по качеству дает указание на выполнение работы.

При выборе наиболее подходящего для конечной цели инструмента качества рассматриваются возможность применения следующих инструментов качества:

- | | |
|--|---|
| - причинно-следственная диаграмма Исикавы; | - диаграмма сравнения показателей качества; |
| - диаграмма Парето; | - функция желательности; |
| - диаграмма рассеяния (разброса); | - планирование эксперимента; |
| - корреляционный анализ по диаграмме разброса; | - секторные диаграммы; |
| - регрессионный анализ. | - горизонтальные гистограммы; |

Для выбранного инструмента качества разрабатываются формы регистрации и представления данных, процедуры их обработки.

Проверка эффективности применения инструмента качества проводится на фактических данных, получаемых на месте его введения. Отчет о проверке эффективности передается в СлК.

Ответственность и полномочия

Разделение ответственности и полномочий подразделений и должностных лиц предприятия при выполнении работ и мероприятий по виду деятельности данного элемента приведено в матрице ответственности (Таблица 13).

Таблица 13 - Матрица ответственности

| Наименование работ, мероприятий | Подразделение, должностное лицо | | | | |
|---|---------------------------------|---------------|---------------|--------------|----------------------|
| | Ответственный | Реализующий | Соисполнитель | Согласующий | Информирующий (емый) |
| Определение потребности применения инструментов качества | Рук. проекта | Подразделения | СлК | | Нач. СлК |
| Заключение о целесообразности применения инструментов качества | Рук. проекта | Подразделения | | | Нач. СлК |
| Разрешение на разработку инструмента качества и форм регистрации данных | Нач. СлК | | СлК | | Подразделения |
| Выбор инструмента качества и форм регистрации данных | Рук. проекта | Подразделения | СлК | Рук. проекта | Нач. СлК |
| Проверка эффективности применения выбранного инструмента качества | Рук. проекта | Подразделения | СлК | | Рук. проекта |
| Разрешение на применение инструмента качества | Нач. СлК | | | Рук. проекта | Подразделения |

Приложения

Приложение Д – «Процесс принятия решения об использовании инструмента качества».

Приложение Е – «Лист регистрации изменений»

Приложение Ж – «Лист ознакомления с СМК-10.01ДП и изменениями к ней»

2.17 Разработка методики оценки качества металлических материалов испытанных магнитно-импульсным методом

Высокие требования надежности и долговечности предъявляют к материалам элементов конструкций в виде труб, работающих в условиях возникновения ударных нагрузок. Надежность - это комплексное свойство, которое включает в себя такие составляющие, как живучесть, долговечность и дефектность. Для конструкционных материалов такие качественные характеристики, как живучесть и долговечность оцениваются на основе лабораторных испытаний до изготовления из них изделий. Однако перечисленные параметры надежности, определенные на небольших лабораторных образцах без учета условий эксплуатации конкретной детали, достаточно показательны лишь для мягких малопрочных материалов. Необходимо также учитывать

стремление к уменьшению металлоемкости конструкций, которое ведет к более широкому применению высокопрочных и, как правило, менее пластичных материалов с повышенной склонностью к хрупкому разрушению, а также факторы, действующие в условиях эксплуатации, дополнительно снижающие их пластичность, вязкость и увеличивающие опасность хрупкого разрушения. Возникающие в связи с этим задачи определения и оценки истинных параметров разрушения, а также изучение закономерностей изменения механических свойств и структуры материалов в данных условиях, возможно, решить с помощью проведения исследований кольцевых образцов металлических материалов в условиях высокоскоростного нагружения магнитно-импульсным методом в сочетании с инструментами квалиметрической оценки. Это позволяет смоделировать дорогостоящие натурные испытания, сократить до необходимого минимума число экспериментов, финансовые и временные затраты, что является актуальным.

Как известно из научно-технической литературы, ключевыми характеристиками металлических материалов, испытанных магнитно-импульсным методом являются механические и микроструктурные характеристики - твердость, растягивающее напряжение, количество вязкой составляющей в изломе, время до разрушения, размер зерна, количество пор.

Изучение выше указанных свойств проводилось за счет исследования влияния длительности импульса при нагружении образца, изменения поперечного сечения кольцевого образца которое в свою очередь заключалось в варьировании толщины и ширины образца. Исследование влияния длительности импульса при нагружении образца и изменения поперечного сечения кольцевого образца на механические и микроструктурные характеристики (твердость, растягивающее напряжение, количество вязкой составляющей в изломе, время до разрушения, размер зерна, количество пор.) металлических материалов проводилось путем лабораторных испытаний. Вследствие проведения, которых, были получены результаты эквивалентные результатам квалиметрической оценки. Что еще раз подчеркнуло эффективность проведенного исследования качества металлических материалов, испытанных магнитно-импульсным методом.

Исходя из ключевых механических и микроструктурных характеристик качества металлических материалов, испытанных магнитно-импульсным методом, выбранных инструментов оценки качества и в соответствии с предложенной документированной процедурой «Процесс менеджмента ресурсов» разработана методика проведения квалиметрической оценки металлических материалов, испытанных магнитно-импульсным методом.

Разработанная методика реализована трехуровневым алгоритмом проведения оценки качества металлических материалов с применением процессного подхода (рисунок 19).

Процессный подход в менеджменте организации – это рассмотрение любой её деятельности как процесса, в котором используемые ресурсы входа преобразуются в выход (результат деятельности или процесса).

При анализе процесса организации оценки качественных характеристик кольцевых образцов получено следующее разделение её на процессы и подпроцессы:

Процесс I. Выбор марки металлического материала (вход (ВХ) - требования нормативных документов и заказчика, выход (В) - фактические характеристики металлического материала);

Подпроцесс:

а) подготовка кольцевых образцов к испытаниям (ВХ - нормы по технологическому процессу изделия, В - условия испытаний магнитно-импульсным методом (длительность импульса действующей нагрузки на образец, поперечное сечение кольцевого образца));

б) проведение испытаний кольцевых образцов металлических материалов магнитно-импульсным методом;

в) формирование совокупности показателей качества, по которым будет произведена квалитметрическая оценка (твёрдость, растягивающее напряжение, количество вязкой составляющей в изломе, время до разрушения, размер зерна, количество пор);

г) проведение исследований кольцевых образцов металлических материалов и определение значений показателей качества.

Поверхности разрушения алюминиевых образцов в виде колец после испытаний исследовались на оптическом микроскопе Axio-Observer-Z1-M в темном поле. Количество вязкой составляющей в изломе (В, %) определялось по формуле, приведённой в ГОСТ 30456-97. Площадь хрупкой составляющей определялась измерением площади хрупкого излома по фотографии.

Микротвёрдость определялась на микротвердомере SHIMADZU серии HNV-G по методу восстановленного отпечатка четырехгранной алмазной пирамиды с углом 136° между гранями и квадратным основанием (по методу Виккерса);

Процесс II. Определение квалитметрических инструментов оценки (ВХ – в зависимости от цели оценки качества изделий предложены следующие основные инструменты квалитметрической оценки – функция желательности, планирование эксперимента, диаграмма сравнения показателей качества. В случае необходимости проведения более детальной оценки, предложены дополнительные инструменты оценки с учетом весовых коэффициентов – секторные диаграммы, горизонтальные гистограммы, а также дополнительные инструменты детальной оцен-

ки с учетом связей свойств металлических материалов – корреляционный анализ по диаграмме разброса и регрессионный анализ, В – инструмент квалиметрической оценки);

Процесс III. Оценка качества и анализ металлических материалов (ВХ – значения показателей качества металлических материалов, В – наиболее подходящий металлический материал для изделия, эксплуатация которого предполагается в условиях возникновения ударного воздействия).



Рисунок 19 – Методика проведения оценки качества металлических материалов, испытанных магнитно-импульсным методом

Использование разработанной методики можно внедрить в деятельность производственного предприятия путем включения в существующие стандарты системы менеджмента качества (СМК), созданием новых стандартов организации (СТО). При более крупных потребностях, возможно создание стандартов ГОСТ, международных стандартов и регламентов.

2.18 Выводы по главе 2

1. Показаны, исследованы и адаптированы возможности современных квалитетических инструментов по оценке качества металлических материалов, испытанных магнитно-импульсным методом, а именно: диаграмма сравнения показателей качества, функция желательности, планирование эксперимента, секторные диаграммы, горизонтальные гистограммы, корреляционный анализ по диаграмме разброса, регрессионный анализ.

2. Уточнены основные показатели качества для испытания труб на ударное воздействие с коротким временем нагружения ($T = 1$ мкс): твердость, растягивающее напряжение, количество вязкой составляющей в изломе, время до разрушения, размер зерна, количество пор.

3. Разработана рабочая инструкция «Разработка и правила оформления документированных процедур, рабочих инструкций, форм» определяющая единый порядок оформления ДП, РИ, Ф, используемый при описании любой деятельности в СМК предприятия.

4. Предложена документированная процедура «Процесс менеджмента ресурсов» описывающая порядок действий при внедрении и использовании инструментов качества для анализа и контроля качества продукции и процессов в системе менеджмента качества предприятия.

5. Представлен алгоритм и описана методика проведения квалитетической оценки металлических материалов для труб, испытанных магнитно-импульсным методом.

6. Приведено оборудование, приборы, инструменты, нормативно-технические документы для обработки результатов исследований металлических материалов, испытанных магнитно-импульсным методом.

ГЛАВА 3 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ОЦЕНКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ИСПЫТАННЫХ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНЫМ МЕТОДОМ

3.1 Анализ экспериментальных данных из литературных источников

Занг О., Рави-Чандар К. и др. в своих работах [13-15, 83] привели результаты экспериментальных исследований динамического разрушения кольцевых образцов из алюминиевых сплавов Al6061-O и Al1100-H14, а также меди Cu101 при различных скоростях деформирования.

В настоящей работе ниже автором проведён анализ экспериментальных результатов, приведённых в работах [13-15, 83].

Количественные данные испытаний А, В, С, D образования шеек при различных скоростях растяжения колец показаны в таблице 14.

Таблица 14 – Количественные данные испытаний образования шеек в кольцевых образцах из Al 6061–O [13]

| Шейка | Скорость V , м/с | | | |
|----------|-------------------------------|----------|----------|----------|
| | 80 | 120 | 150 | 200 |
| | Испытание | | | |
| | А | В | С | Д |
| | Время образования T_n , мкс | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | 63,72 | 47,4 | 36 | 47,32 |
| 2 | 63,72 | 47,4 | 47 | 36,32 |
| 3 | 52,72 | 47,4 | 47 | 36,32 |
| 4 | 52,72 | 47,4 | 47 | 36,32 |
| 5 | 52,72 | 36,4 | 47 | 36,32 |
| 6 | 63,72 | 36,4 | 47 | 36,32 |
| 7 | 63,72 | 47,4 | 47 | 36,32 |
| 8 | 52,72 | 47,4 | 47 | 36,32 |
| 9 | 63,72 | 47,4 | 47 | 36,32 |
| 10 | 63,72 | 58,4 | 47 | 36,32 |
| 11 | 63,72 | 69,4 | 47 | 36,32 |
| 12 | 63,72 | 58,4 | 47 | 36,32 |
| 13 | 63,72 | 58,4 | 47 | 36,32 |
| 14 | 63,72 | 58,4 | 47 | 36,32 |
| 15 | 63,72 | 79,4 | 47 | 36,32 |
| 16 | 63,72 | 58,4 | 47 | 36,32 |
| 17 | 63,72 | 58,4 | 47 | 36,32 |

| Шейка | Скорость V , м/с | | | |
|-------------------------------|--------------------|------|-----|-------|
| | 80 | 120 | 150 | 200 |
| | Испытание | | | |
| | A | B | C | D |
| Время образования T_n , мкс | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 18 | 63,72 | 47,4 | 47 | 47,32 |
| 19 | 63,72 | 47,4 | 47 | 58,32 |
| 20 | 63,72 | 47,4 | 36 | 47,32 |
| 21 | | 47,4 | 36 | 47,32 |
| 22 | | | 47 | 47,32 |
| 23 | | | 47 | 47,32 |
| 24 | | | 47 | 47,32 |
| 25 | | | 47 | 36,32 |
| 26 | | | 36 | 47,32 |
| 27 | | | 36 | 47,32 |
| 28 | | | 47 | 47,32 |
| 29 | | | 47 | 58,32 |
| 30 | | | 47 | 47,32 |
| 31 | | | 47 | 47,32 |
| 32 | | | 47 | 47,32 |
| 33 | | | 47 | 47,32 |
| 34 | | | 36 | 47,32 |
| 35 | | | | 36,32 |
| 36 | | | | 47,32 |
| 37 | | | | 47,32 |
| 38 | | | | 58,32 |

По данным таблицы 14 построен график сравнительной динамики образования шеек при различных скоростях растяжения колец (Рисунок 20).

Анализируя график сравнительной динамики образования шеек при различных скоростях растяжения колец (Рисунок 20), можно сделать следующие выводы:

- при увеличении скорости растяжения колец возрастает количество образования шеек;
- основной массив шеек образуется за время в пределах 36 – 64 мкс вне зависимости от скорости растяжения;
- наблюдается более вязкое разрушение материала, при скоростях 80 м/с и 120 м/с. При скоростях растяжения колец 150 м/с и 200 м/с разрушение материала более хрупкое, о чем свидетельствует наибольшее количество образовавшихся шеек за более короткое время, в пределах 36 – 48 мкс.

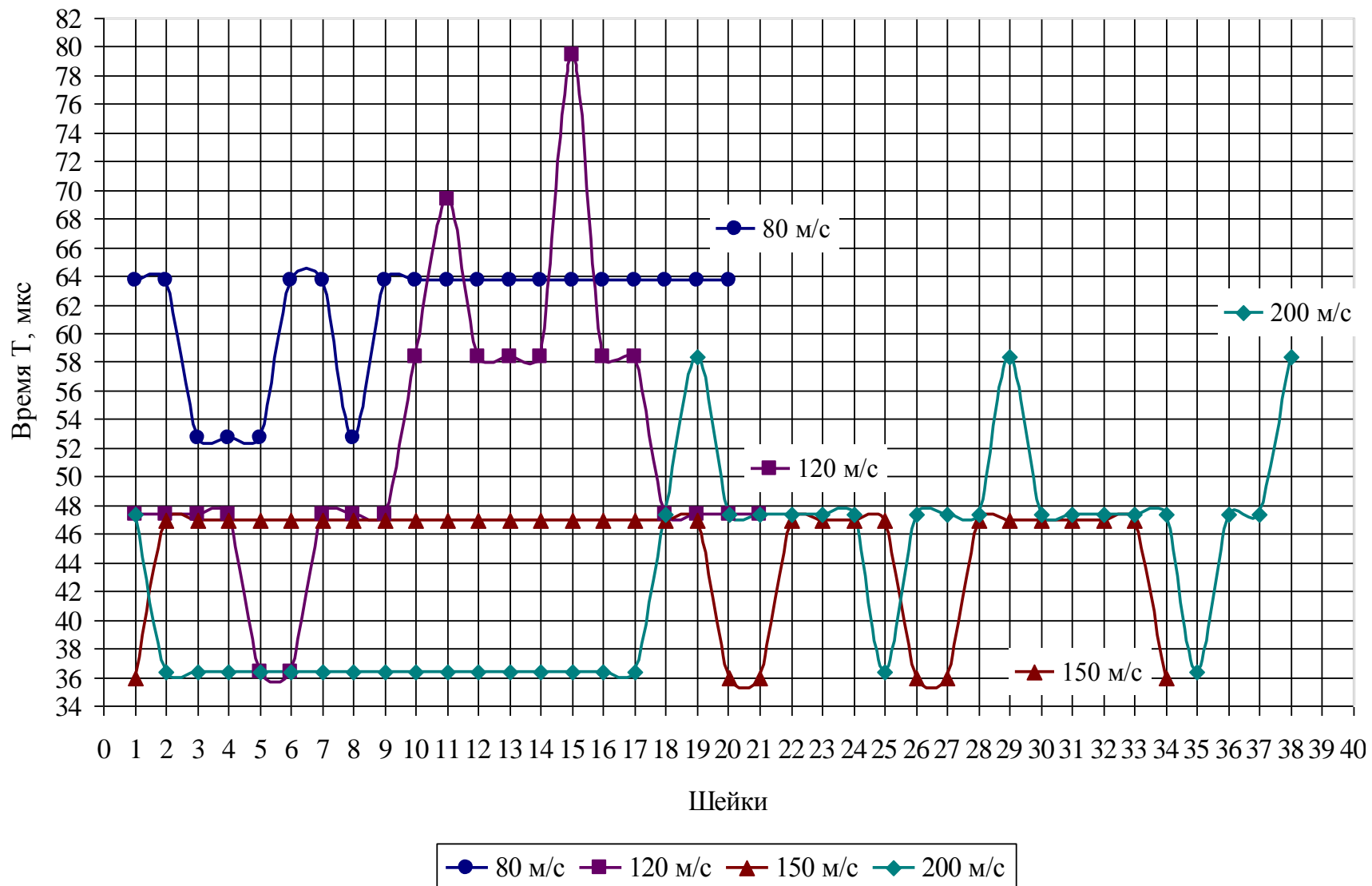


Рисунок 20 – Сравнительная динамика образования шеек при различных скоростях растяжения колец из Al 6061–O [13, автор]

Количественные данные испытаний А, В, С, D образования фрагментов из Al 6061–O при различных скоростях растяжения колец показаны в таблице 15.

Таблица 15 – Количественные данные образования фрагментов в кольцевых образцах из Al 6061–O [13].

| Фрагменты | Скорость V , м/с | | | |
|-----------|-------------------------------|----------|----------|----------|
| | 80 | 120 | 150 | 200 |
| | Испытание | | | |
| | А | В | С | D |
| | Время образования T_f , мкс | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | – | 51,26 | – | – |
| 2 | – | – | – | 45,84 |
| 3 | 57,07 | – | – | 46,19 |
| 4 | – | 58,12 | – | – |
| 5 | – | – | 51,67 | – |
| 6 | – | – | – | – |
| 7 | – | – | – | 40,55 |
| 8 | – | 47,99 | – | – |
| 9 | – | – | 58 | – |
| 10 | 75,82 | – | – | – |
| 11 | – | – | 52 | – |
| 12 | – | 72,14 | 55,43 | 41,29 |
| 13 | – | – | – | – |
| 14 | – | 61,68 | – | – |
| 15 | – | – | – | – |
| 16 | – | 70,03 | – | – |
| 17 | – | 64,07 | – | 49,39 |
| 18 | – | – | – | – |
| 19 | – | – | 52,5 | – |
| 20 | 74,53 | 53,9 | 45,5 | 54,24 |
| 21 | – | – | – | – |
| 22 | – | – | – | – |
| 23 | – | – | – | – |
| 24 | – | – | – | 56,84 |
| 25 | – | – | – | 50,28 |
| 26 | – | – | 41,47 | – |
| 27 | – | – | 38,7 | – |
| 28 | – | – | – | 46,54 |
| 29 | – | – | – | – |
| 30 | – | – | 58 | 51,31 |
| 31 | – | – | – | – |
| 32 | – | – | – | 50,18 |

| Фрагменты | Скорость V , м/с | | | |
|-----------|-------------------------------|-----|-----|-------|
| | 80 | 120 | 150 | 200 |
| | Испытание | | | |
| | A | B | C | D |
| | Время образования T_f , мкс | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 33 | | | – | 63,42 |
| 34 | | | 45 | – |
| 35 | | | | 41,85 |
| 36 | | | | – |
| 37 | | | | – |
| 38 | | | | 58,19 |

По данным таблицы 15 построен график сравнительной динамики образования фрагментов при различных скоростях растяжения колец (Рисунок 21).

Анализируя график сравнительной динамики образования фрагментов при различных скоростях растяжения колец (Рисунок 21), можно сделать следующие выводы:

- при увеличении скорости растяжения колец, возрастает количество образования фрагментов;
- основной массив фрагментов образуется за время в пределах 39 – 59 мкс, вне зависимости от скорости растяжения;
- при скорости 80 м/с образец разрушается более вязко и выдерживает наибольшее время нагружения. При скоростях растяжения колец 150 м/с и 200 м/с, разрушение материала более хрупкое, чему свидетельствует наибольшее количество образовавшихся фрагментов, за более короткое время, в пределах 39 – 63 мкс.

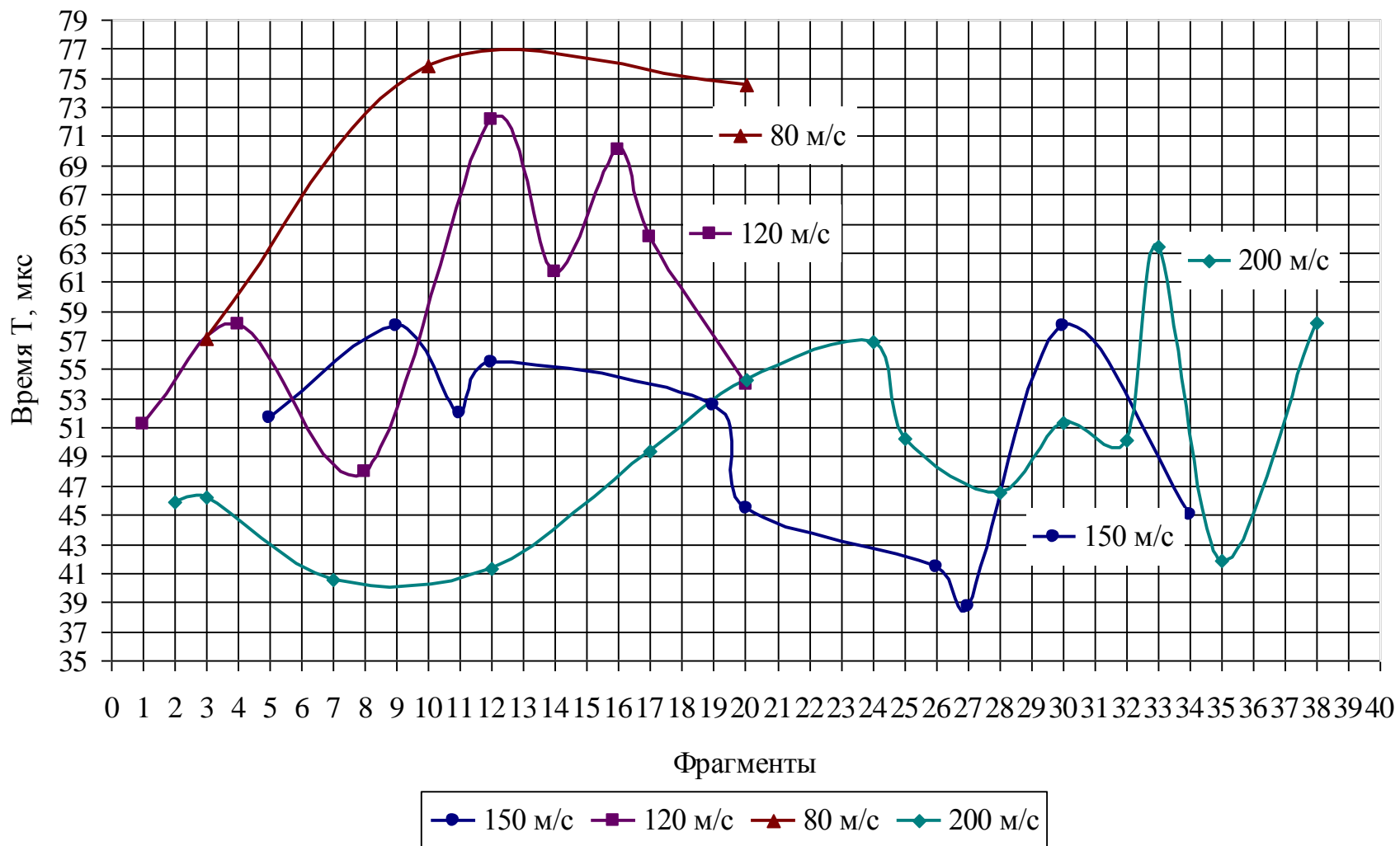


Рисунок 21 – Сравнительная динамика образования фрагментов при различных скоростях растяжения колец из Al 6061–O [13, автор]

Сравнительные количественные данные испытаний А, В, С, D образования шеек и фрагментов при различных скоростях растяжения колец из Al 6061-O представлены в таблице 16.

Таблица 16 – Сравнительные данные испытаний [13, автор]

| Параметры | Испытание | | | |
|------------------------------|-----------------|-----|-----|-----|
| | A | B | C | D |
| | Скорость V, м/с | | | |
| | 80 | 120 | 150 | 200 |
| количество шеек, n_n | 20 | 21 | 34 | 38 |
| количество фрагментов, n_f | 3 | 8 | 10 | 14 |

По данным таблиц 14, 15 построена диаграмма сравнительной динамики образования шеек и фрагментов при различных скоростях растяжения колец (Рисунок 22).

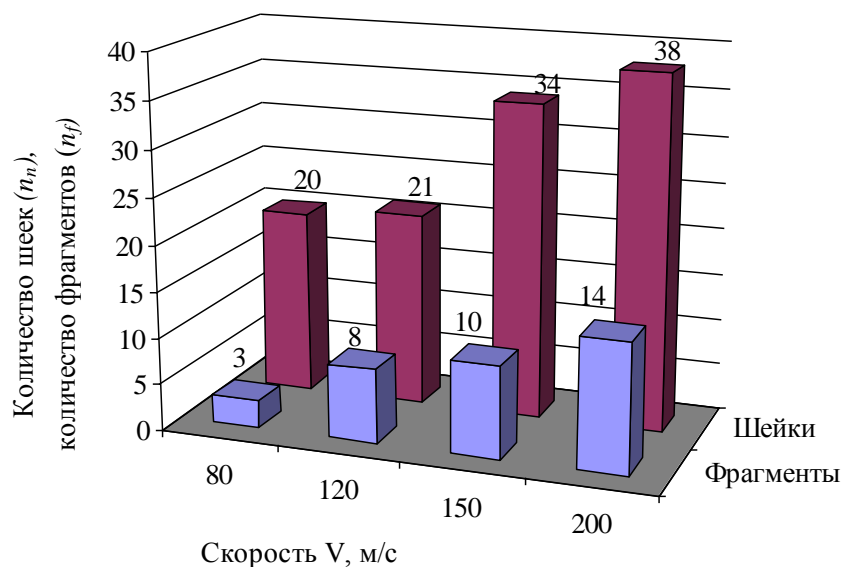


Рисунок 22 – Сравнительная динамика образования шеек и фрагментов при различных скоростях растяжения колец из Al 6061-O [13, автор]

Проанализировав диаграмму сравнительной динамики образования шеек и фрагментов при различных скоростях растяжения колец (Рисунок 22), можно сделать следующие выводы:

- при увеличении скорости растяжения колец, возрастает количество шеек и фрагментов;
- при увеличении скорости растяжения колец, в интервале скоростей 80 - 120 м/с количество фрагментов увеличилось в 2,7 раза, а шеек - практически осталось на том же уровне;
- при скоростях 120 – 150 м/с – картина обратная – количество шеек возросло в 1,6 раза, в то время как количество фрагментов – всего на 25 %;

– в интервале скоростей 150 – 200 м/с интенсивность образования шеек замедляется – рост всего на 10 %, в то время, как рост хрупкого разрушения более значительный на 40 %;

– в целом локализация деформации при увеличении скорости до 200 м/с возросла в 1,9 раза, а хрупкое разрушение – в 4,7 раза.

Сравнительные количественные данные испытаний А, В, С, D средней пластической деформации при различных скоростях растяжения колец из Al 6061-O представлены в таблице 17.

Таблица 17 – Данные средней пластической деформации [13, автор]

| Испытание № | Скорость V , м/с | Средняя пластическая деформация $\bar{\varepsilon}$, % |
|-------------|--------------------|---|
| А | 80 | 0,2872 |
| В | 121 | 0,3408 |
| С | 149 | 0,3996 |
| Д | 196 | 0,4321 |

По данным таблицы 17 построен график зависимости пластической деформации от скорости расширения кольца (Рисунок 23).

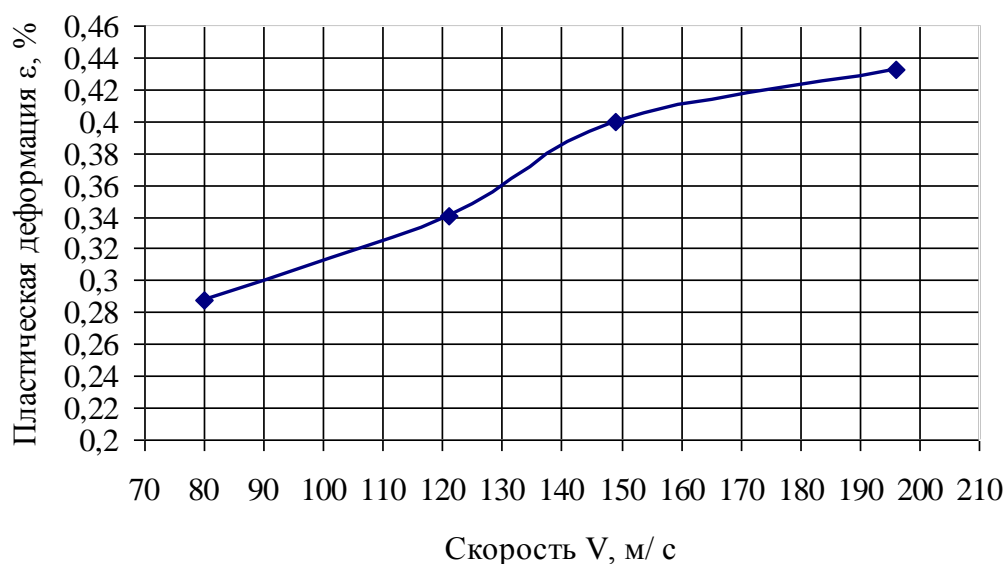


Рисунок 23 – Зависимость пластической деформации от скорости расширения кольца из Al 6061-O [13, автор]

Анализ графика зависимости пластической деформации от скорости расширения кольца (Рисунок 23) показал, что при увеличении скорости расширения кольца возрастает пластическая деформация.

Результаты экспериментов по динамическому расширению колец из алюминия и меди при разном соотношении сторон приведено в таблицах 18 – 21 и на рисунках 24 – 26.

Толщина кольца составляет 0,5 мм, но изменяя длину (вдоль оси), а именно, используя длины 2, 3 и 5 мм, получаем в поперечном сечении отношение 4, 6 и 10 соответственно.

Таблица 18 – Эксперименты по высокоскоростному расширению колец из Al 1100-H14, $a = 2$ [14].

| Испытание № | Напряжение разряда, кВт | Скорость V, м/с | Количество шеек, n_n | Количество фрагментов, n_f | Пластическая деформация ε , % |
|-------------|-------------------------|-----------------|------------------------|------------------------------|---|
| 1 | 5 | 83 | 20 | 5 | 0,0645 |
| 2 | 6 | 122 | 29 | 8 | 0,0604 |
| 3 | 7 | 171 | 32 | 12 | 0,0561 |
| 4 | 8 | 226 | 39 | 13 | 0,069 |

Таблица 19 – Эксперименты по высокоскоростному расширению колец из Cu 101, $a = 2$ [14].

| Испытание № | Напряжение разряда, кВт | Скорость V, м/с | Количество шеек, n_n | Количество фрагментов, n_f | Пластическая деформация ε , % |
|-------------|-------------------------|-----------------|------------------------|------------------------------|---|
| 1 | 5 | 66 | 3 | 1 | 0,2706 |
| 2 | 6 | 94 | 13 | 3 | 0,3045 |
| 3 | 7 | 121 | 23 | 8 | 0,3024 |
| 4 | 8 | 144 | 31 | 10 | 0,3114 |
| 5 | 9 | 172 | 28 | 11 | 0,3297 |

Таблица 20 – Эксперименты по высокоскоростному расширению колец из Cu 101, $a = 6$ [14].

| Испытание № | Напряжение разряда, кВт | Скорость V, м/с | Количество шеек, n_n | Количество фрагментов, n_f | Пластическая деформация ε , % |
|-------------|-------------------------|-----------------|------------------------|------------------------------|---|
| 1 | 7 | 82 | 10 | 1 | 0,2706 |
| 2 | 8 | 102 | 13 | 5 | 0,3045 |
| 3 | 9 | 130 | 17 | 7 | 0,3024 |
| 4 | 10 | 149 | 19 | 10 | 0,3114 |

Таблица 21 – Эксперименты по высокоскоростному расширению колец из Al 6061–O, $a = 10$ [14].

| Испытание № | Напряжение разряда, кВт | Скорость V, м/с | Количество шеек, n_n | Количество фрагментов, n_f | Пластическая деформация ε , % |
|-------------|-------------------------|-----------------|------------------------|------------------------------|---|
| 1 | 7 | 86 | 3 | 1 | 0,3561 |
| 2 | 7 | 120 | 8 | 2 | 0,4623 |
| 3 | 9 | 160 | 13 | 6 | 0,5652 |

Из представленных данных (Рисунок 24) видно, что наиболее интенсивно шейкообразование происходит в наименее прочном алюминиевом сплаве Al-1100-N14. Количество шеек увеличивается монотонно с ростом скорости деформации. Образование шеек в меди при том же соотношении сторон $a = 2$ имеет максимум при скорости 140 м/с. С увеличением соотношения сторон до $a = 6$ (увеличение размеров образца) количество шеек в меди в 2 раза меньше и с ростом скорости возрастает монотонно. Наименьшее количество шеек образовалось в самом прочном из рассматриваемых сплаве Al 6061-O и количество также растет с ростом скорости нагружения.

Наибольшую способность к фрагментации (Рисунок 25) проявил наименее прочный сплав Al 1100-N14.

Отношение сторон в меди (размеры образца) практически не оказывает влияния на фрагментацию. Фрагментация в наиболее прочном сплаве Al 6061-O – минимальная среди всех исследованных металлов.

Что касается пластической деформации, то она практически не изменяется (Рисунок 26) от скорости деформации для Cu 101 и Al 1100-N14. Самую высокую способность к пластической деформации проявил самый прочный сплав Al 6061-O и она растет с увеличением скорости деформации. Влияние отношения сторон (размера образца) в меди на пластическую деформацию отсутствует.

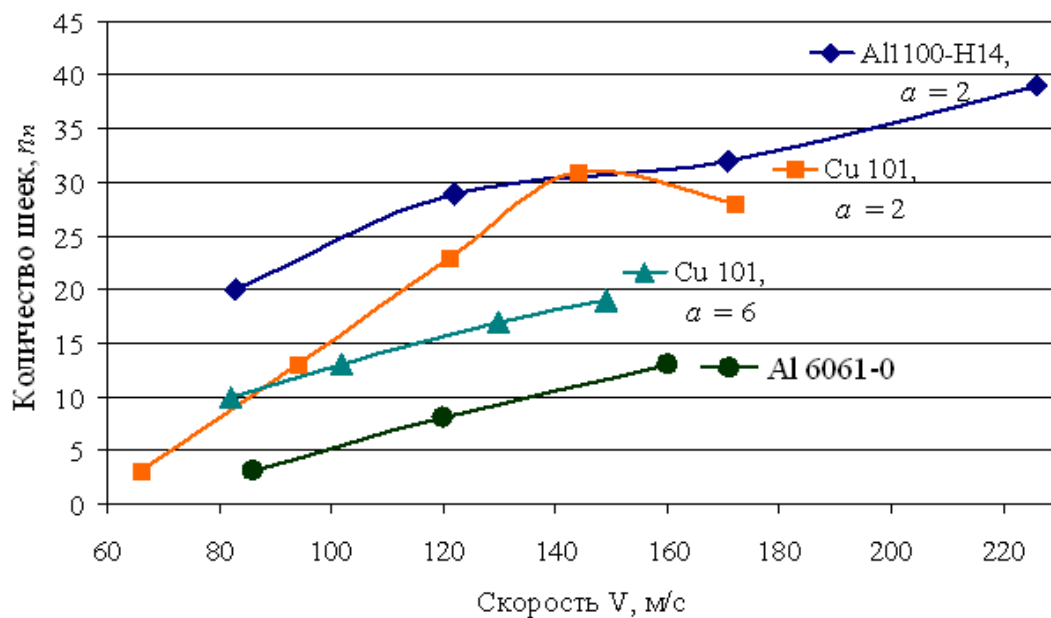


Рисунок 24 – Сравнительная динамика образования шеек при различных скоростях растяжения колец [14, автор]

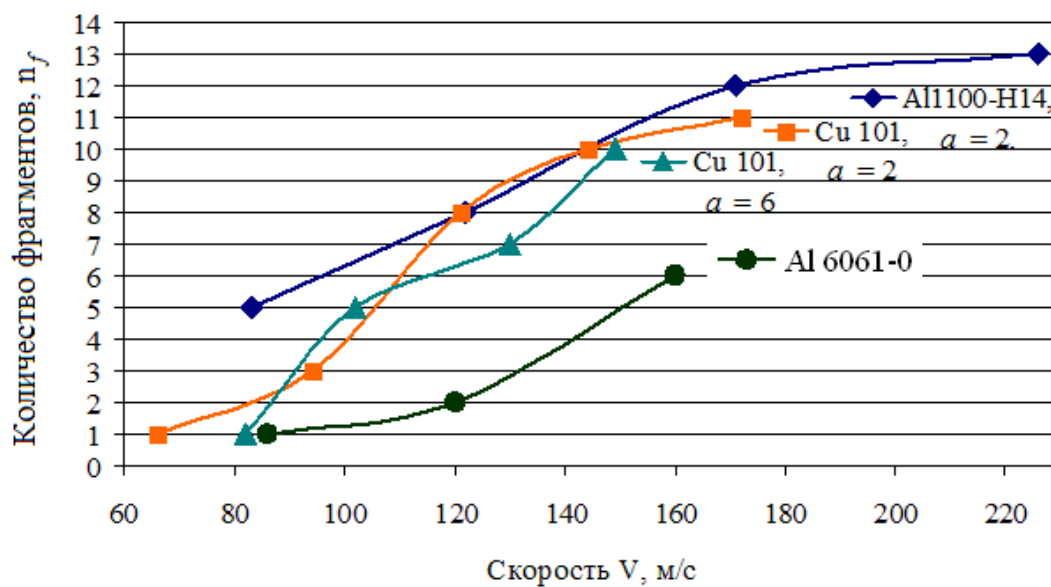


Рисунок 25 – Сравнительная динамика образования фрагментов при различных скоростях растяжения колец [14, автор]

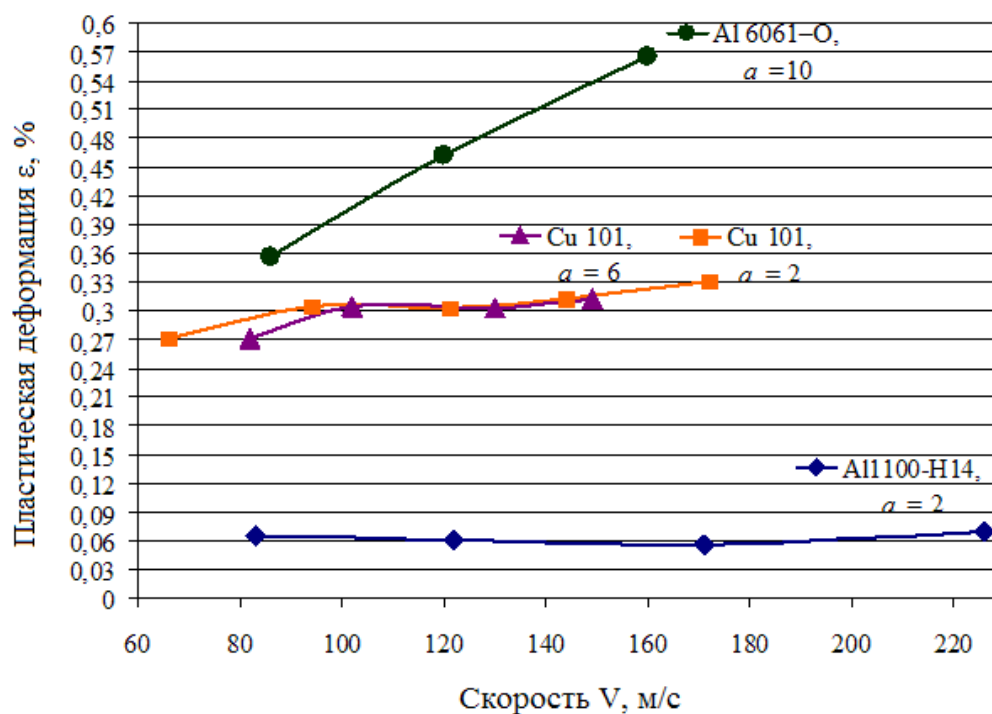
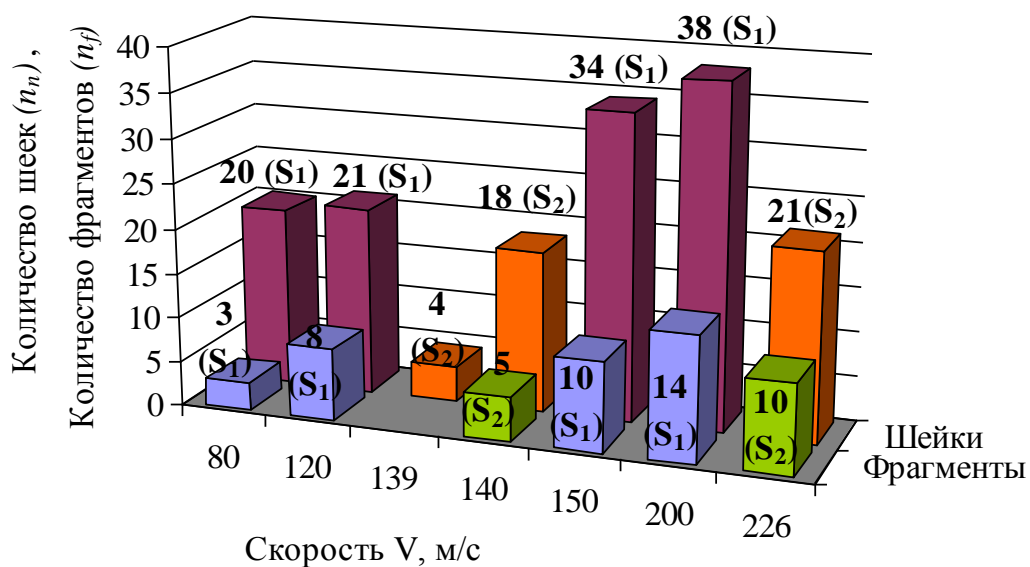


Рисунок 26 – Зависимость пластической деформации от скорости расширения кольца [14, автор]

Влияние поперечного сечения образца (S) приведено в таблице 22 и на гистограмме (Рисунок 27).

Таблица 22 – Эксперименты по высокоскоростному расширению колец из Al 6061-O, сечение 2×2 мм [14].

| Испытание № | Напряжение разряда, кВт | Скорость V , м/с | Количество шеек, n_n | Количество фрагментов, n_f | Пластическая деформация ε , % |
|-------------|-------------------------|--------------------|------------------------|------------------------------|---|
| 1 | 12 | 139 | 4 | – | 0,3531 |
| 2 | 12 | 140 | 18 | 5 | 0,4104 |
| 3 | 15 | 226 | 21 | 10 | 0,4498 |



Площадь поперечного сечения S_1 - 0,5 мм²

Площадь поперечного сечения S_2 - 4 мм²

Рисунок 27 – Сравнительная динамика образования шеек и фрагментов при различных скоростях растяжения и площади поперечного сечения колец из Al 6061-O [14, автор]

Проанализировав диаграмму сравнительной динамики образования шеек и фрагментов при различных скоростях растяжения и площади поперечного сечения колец (Рисунок 27), можно сделать следующие выводы:

- при увеличении скорости растяжения колец, возрастает количество шеек и фрагментов;

- при увеличении скорости растяжения колец с площадью поперечного сечения $S_1 = 0,5$ мм², в интервале скоростей 80 - 120 м/с количество фрагментов увеличилось в 2,7 раза, а шеек - практически осталось на том же уровне;

- в интервале скоростей 139 - 140 м/с с $S_2 = 4$ мм² количество фрагментов увеличилось в 5 раз, а шеек в 4,5 раза;

- при скоростях 120 – 150 м/с с $S_1 = 0,5$ мм² – картина обратная – количество шеек возросло в 1,6 раза, в то время как количество фрагментов – всего на 25 %;

- в интервале скоростей 150 – 200 м/с с $S_1 = 0,5$ мм² интенсивность образования шеек замедляется – рост всего на 10 %, в то время, как рост хрупкого разрушения более значительный на 40 %;

- в интервале скоростей 140 – 226 м/с с $S_2 = 4$ мм² интенсивность образования шеек замедляется – рост всего на 17 %, в то время, как количество фрагментов увеличилось в 2 раза;

– в целом локализация деформации с $S_1 = 0,5 \text{ мм}^2$ при увеличении скорости до 200 м/с возросла в 1,9 раза, а хрупкое разрушение – в 4,7 раза;

– в целом локализация деформации с $S_2 = 4 \text{ мм}^2$ при увеличении скорости до 226 м/с возросла в 5,3 раза, а хрупкое разрушение – в 10 раз.

В таблицах 23 – 25 приводятся результаты экспериментов по растяжению колец из Al 6061-O и Cu-101 с покрытием и разным масштабным фактором.

Таблица 23 – Эксперименты по высокоскоростному расширению колец из Al 6061–O с полиуретановым покрытием, $a = 4$ [15]

| Испытание № | Напряжение разряда, кВт | Скорость V , м/с | Количество шеек, n_n | Количество фрагментов, n_f | Пластическая деформация ϵ , % |
|-------------|-------------------------|--------------------|------------------------|------------------------------|--|
| 1 | 10 | 148 | 13 | 4 | 0,486 |
| 2 | 12 | 182 | 17 | 7 | 0,5673 |
| 3 | 13 | 213 | 23 | 15 | 0,5654 |

Таблица 24 – Эксперименты по высокоскоростному расширению колец из Al 6061–O с полиуретановым покрытием, $a = 10$ [15]

| Испытание № | Напряжение разряда, кВт | Скорость V , м/с | Количество шеек, n_n | Количество фрагментов, n_f | Пластическая деформация ϵ , % |
|-------------|-------------------------|--------------------|------------------------|------------------------------|--|
| 1 | 10 | 105 | 7 | 2 | 0,5714 |
| 2 | 11 | 146 | 12 | 5 | 0,7038 |
| 3 | 12 | 166 | 13 | 7 | 0,7711 |

Таблица 25 – Эксперименты по высокоскоростному расширению колец из Cu 101 с полиуретановым покрытием, $a = 6$ [15]

| Испытание № | Напряжение разряда, кВт | Скорость V , (м/с) | Количество шеек, n_n | Количество фрагментов, n_f | Пластическая деформация ϵ , % |
|-------------|-------------------------|----------------------|------------------------|------------------------------|--|
| 1 | 10,5 | 106 | 9 | 3 | 0,4323 |
| 2 | 12 | 130 | 14 | 6 | 0,4918 |
| 3 | 13,5 | 159 | 17 | 11 | 0,5988 |

По данным таблиц 23 – 25 построены графики (рисунок 28, 29) сравнительной динамики образования шеек и фрагментов при различных скоростях растяжения колец с полиуретановым покрытием, а также зависимость пластической деформации от скорости расширения кольца с полиуретановым покрытием (рисунок 29).

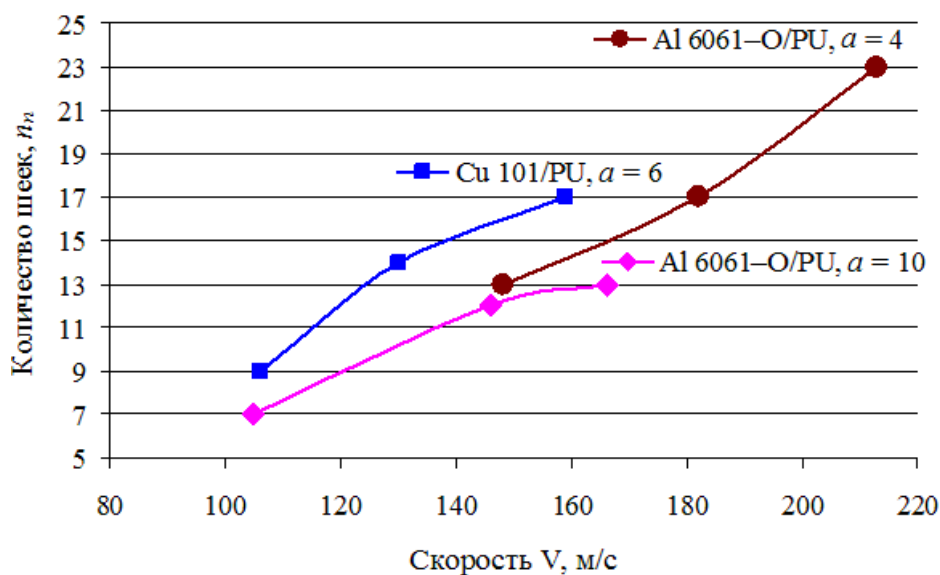


Рисунок 28 – Сравнительная динамика образования шеек при различных скоростях растяжения колец с покрытием [15, автор]

Из рисунка 28 можно сделать следующие выводы:

- монотонное возрастание количества шеек (рост локализации деформации) с увеличением скорости деформации как для образцов из Cu-101, так и для алюминиевых;
- влияние полиуретанового покрытия практически отсутствует;
- масштабный фактор действует аналогично образцам без покрытия – с ростом размеров образца локализация замедляется. Более прочный Al 6061-O проявляет меньшую склонность к локализации, чем Cu-101 даже при более высоком масштабном факторе (Cu-101/PU, $a = 6$; Al 6061-O/PU, $a = 4$).

Влияние покрытия на процесс фрагментации тех же материалов представлено на рисунке 29.

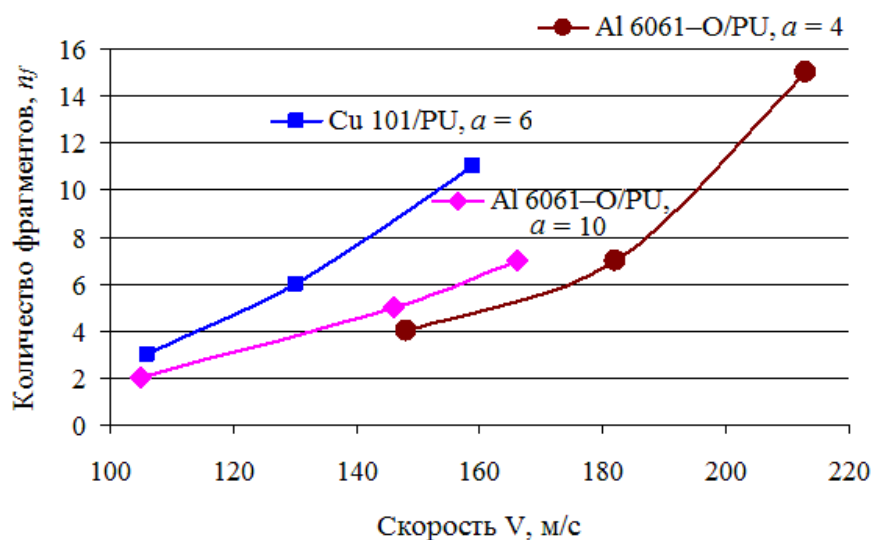


Рисунок 29 – Сравнительная динамика образования фрагментов при различных скоростях растяжения колец с покрытием [15, автор]

Из рисунка 29 можно сделать следующие выводы:

- наблюдается монотонное возрастание фрагментации с ростом скорости деформации как для Cu-101, так и для Al 6061-O;
- масштабный фактор влияет аномально для Al 6061-O. При меньших размерах Al 6061-O/PU, $a=4$ образец проявляет меньшую склонность к фрагментации, чем при больших Al 6061-O/PU, $a=10$. Вероятно, это связано с адгезионными свойствами покрытия.

Влияние покрытия на пластическую деформацию приведено на рисунке 30.

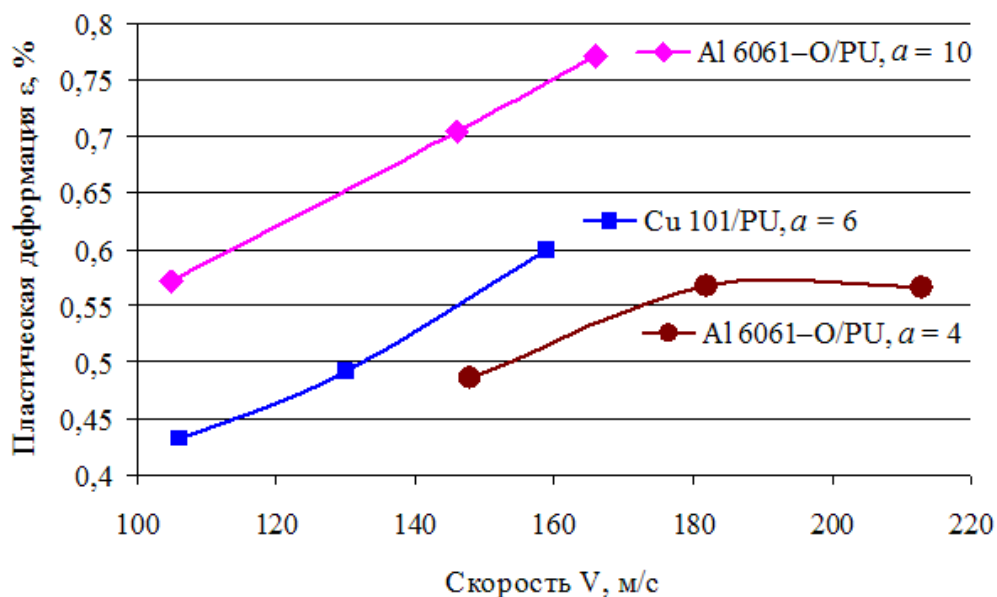


Рисунок 30 – Зависимость пластической деформации от скорости расширения кольца с покрытием [15, автор]

Из рисунка 30 можно сделать следующие выводы:

- увеличение пластической деформации с ростом скорости расширения колец;
- образцы с большим масштабным фактором проявляют большую пластичность (Al 6061-O/PU, $a = 10$ и Al 6061-O/PU, $a = 4$);
- покрытие приводит к значительному увеличению пластической деформации как для Al 6061-O/PU, так и для Cu-101/PU. Это связано, вероятно, с хорошей адгезией покрытия.

По экспериментальным данным динамического расширения колец из меди (таблица 20, 25) и алюминия (таблица 21, 24) построены диаграммы зависимости пластической деформации от скорости расширения и полиуретанового покрытия кольца на рисунках 31 и 32 соответственно.

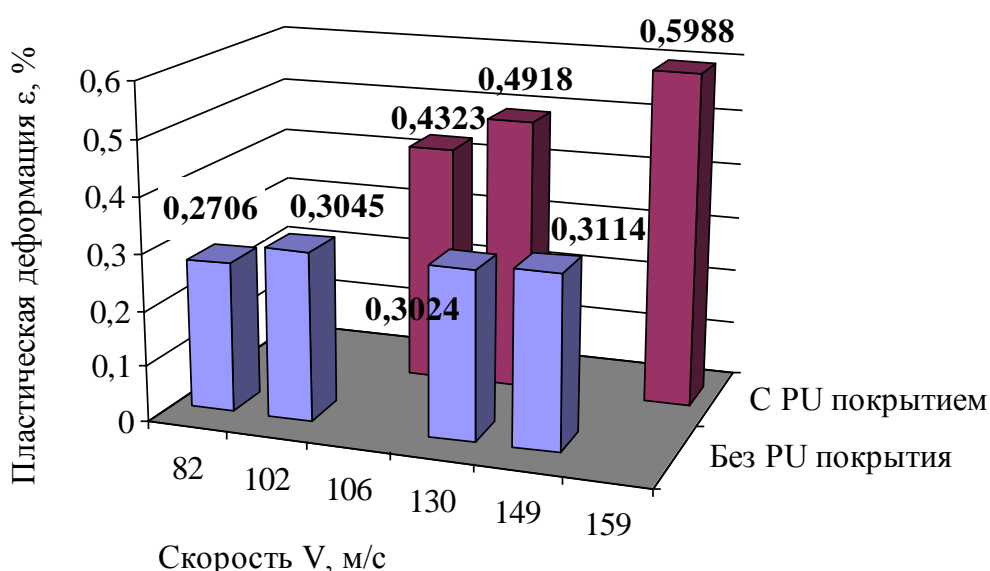


Рисунок 31 – Зависимость пластической деформации от скорости расширения и полиуретанового покрытия кольца из Cu-101, $a = 6$ [14, автор]

Проанализировав диаграмму зависимости пластической деформации от скорости расширения и полиуретанового покрытия кольца из Cu-101, $a = 6$ (Рисунок 31), можно сделать **вывод**, что при увеличении скорости растяжения колец без полиуретанового покрытия пластическая деформация возрастает незначительно - на 15 %, в то время как пластическая деформация колец с полиуретановым покрытием возросла более значительно - на 39 %. Вероятно, это связано с хорошей адгезией покрытия.

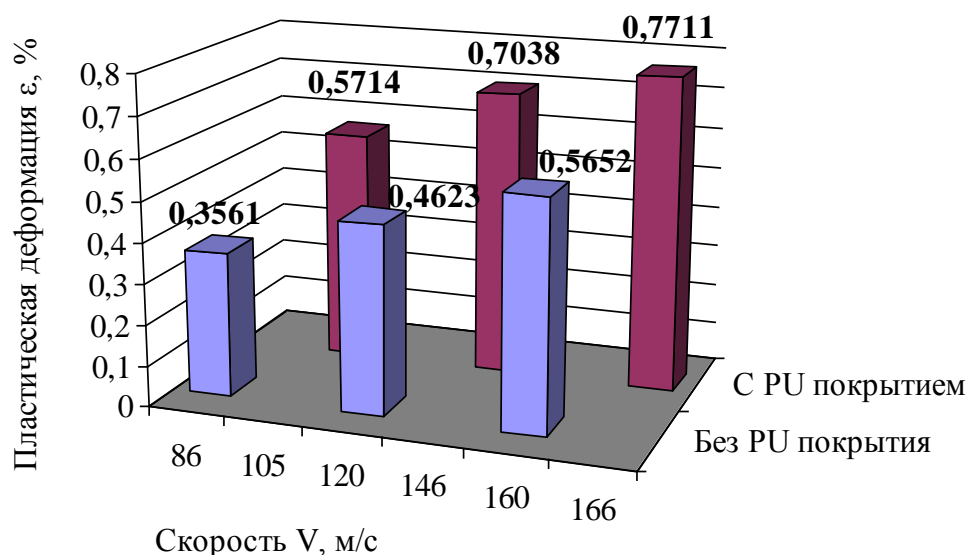


Рисунок 32 – Зависимость пластической деформации от скорости расширения и полиуретанового покрытия кольца из Al 6061-O, $a = 10$ [15, автор]

Проанализировав диаграмму зависимости пластической деформации от скорости расширения и полиуретанового покрытия кольца из Al 6061-O, $a = 10$ (Рисунок 32), можно сделать **вывод**, что при увеличении скорости растяжения колец без полиуретанового покрытия пластическая деформация возрастает на 0,2091 %, в то время как пластическая деформация колец с полиуретановым покрытием возросла на 0,1997 %.

Из выше приведенных данных видно, что пластическая деформация образцов с покрытием выше, чем без покрытия для меди в 1,9 раза, для алюминия в 1,4 раза

Процесс локализации происходит в три этапа: зарождение, распространение шейки через поперечное сечение и, наконец, разгрузки соседних районов. В условиях квазистатического нагружения покрытие не взаимодействует ни с одним из этих процессов, которые происходят в гораздо более короткие сроки и, следовательно, не влияет на начало локализации.

При высокоскоростной деформации зарождение и распространение не оказывают существенного влияния, но распространение разгрузки по длине образца влияет, вызывая большие деформации в областях далеко от места локализации. Представляется, что это просто влияние дополнительной массы полиуретана, а не каких-либо изменений, вызванных деформационными механизмами материала или самой механикой локализации.

Адгезия между полиуретаном и металлическим слоем является важным параметром, который не был рассмотрен систематически в настоящей работе. Однако, численное моделирование показывает, что даже получение совершенной связи между двумя слоями вряд ли приведет к значительным задержкам в начале локализации.

На основании анализа экспериментальных данных из литературных источников, была выбрана стратегия исследования образцов испытанных при различных режимах высокоскоростного нагружения магнитно-импульсным методом. В соответствии с предложенной методикой (рисунок 18) ниже представлена оценка качества алюминиевых кольцевых образцов испытанных при различных режимах высокоскоростного нагружения магнитно-импульсным методом.

3.2 Функция желательности материалов испытанных магнитно-импульсным методом

Исходная информация для построения номограммы желательности приведена в таблице 26 [24, 28, 84-95].

Таблица 26 – Данные для определения показателей желательности [24, 28, 86-95]

| № п/п | Наименование показателя качества | Ед. измерения | Базовые значения №1 | Значение показателя качества образца | |
|----------|--|------------------|---|---|------|
| | | | | №2 | №3 |
| | | | при испытании с длительностью импульса T , мкс | | |
| 1. | Размер зерна, D_z | мкм | 4,6 | 8,2 | 3,0 |
| 2. | Твердость по Виккерсу, HV | МПа | 1175 | 1461 | 1202 |
| 3. | Растягивающее напряжение, σ | МПа | 100 | 104 | 142 |
| 4. | Количество вязкой составляющей в изломе, B | % | 75 - 85 | 98,2 | 91,5 |

Градация качества при построении функции желательности выбирается в соответствии с данными таблицы 10.

Для перевода значений в безразмерную шкалу, в соответствии с методикой, решались следующие системы уравнений:

– для показателя качества № 1:

$$\begin{cases} 1 = a_0 + 8,2a_1 \\ 4,5 = a_0 + 3,0a_1 \end{cases}$$

– для показателя качества № 2:

$$\begin{cases} 1 = a_0 + 1175a_1 \\ 4,5 = a_0 + 1461a_1 \end{cases}$$

– для показателя качества № 3:

$$\begin{cases} 1 = a_0 + 100a_1 \\ 4,5 = a_0 + 142a_1 \end{cases}$$

– для показателя качества № 4:

$$\begin{cases} 1 = a_0 + 75a_1 \\ 4,5 = a_0 + 98,2a_1 \end{cases}$$

Уравнение параметра оптимизации имеет вид:

– для показателя качества № 1:

$$y = 6,52 + (-0,67) \cdot x_i$$

– для показателя качества № 2:

$$y = -13,032 + 0,012 \cdot x_i$$

– для показателя качества № 3:

$$y = -7,33 + 0,08 \cdot x_i$$

– для показателя качества № 4:

$$y = -10,25 + 0,15 \cdot x_i$$

Рассчитанные данные для построения номограммы желательности приведены в таблице 27.

Таблица 27 – Значения показателей желательности и соответствующих безразмерных вспомогательных показателей

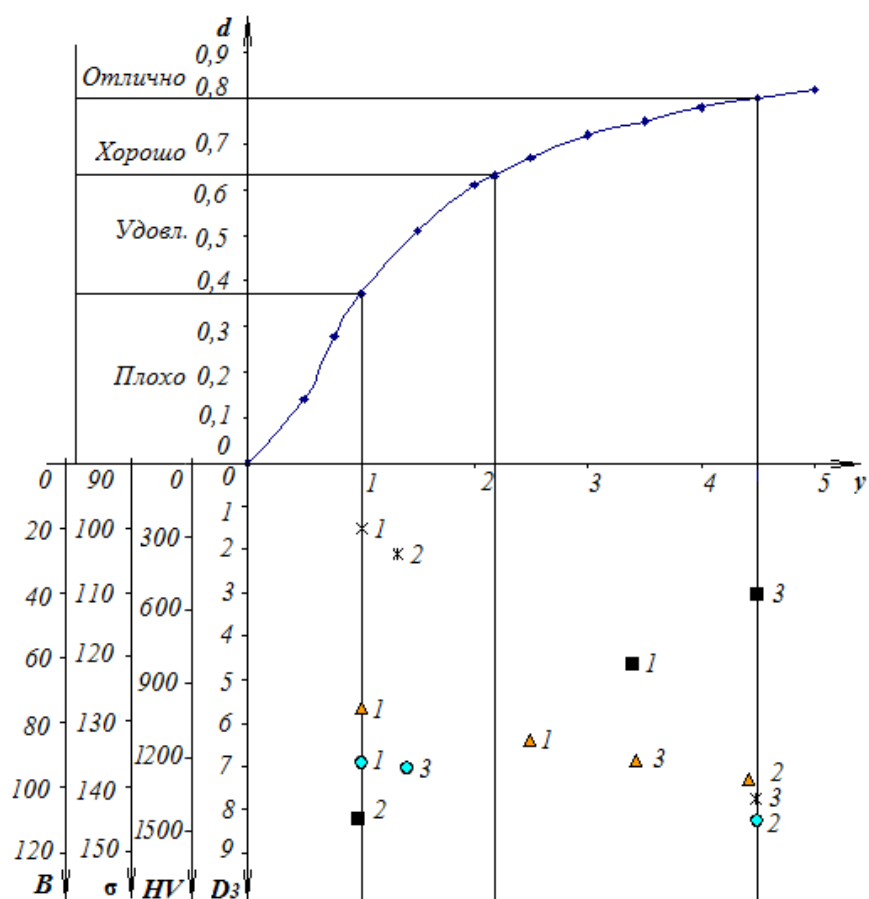
| № | Показатель качества | Оценка изменения показателей качества | |
|--|--|---------------------------------------|-------------|
| | | y | d |
| Режим № 1. Данные по нормативно-технической документации (НТД) | | | |
| 1 | Размер зерна, D_3 | 3,42 | 0,75 |
| 2 | Твердость по Виккерсу, HV | 1 | 0,37 |
| 3 | Растягивающее напряжение, σ | 1 | 0,37 |
| 4 | Количество вязкой составляющей в изломе, B | 1 – 2,5 | 0,37 – 0,67 |
| Режим № 2 | | | |
| 1 | Размер зерна, D_3 | 1 | 0,37 |
| 2 | Твердость по Виккерсу, HV | 4,5 | 0,80 |
| 3 | Растягивающее напряжение, σ | 1,33 | 0,47 |
| 4 | Количество вязкой составляющей в изломе, B | 4,48 | 0,79 |
| Режим № 3 | | | |
| 1 | Размер зерна, D_3 | 4,5 | 0,80 |
| 2 | Твердость по Виккерсу, HV | 1,39 | 0,49 |
| 3 | Растягивающее напряжение, σ | 4,49 | 0,80 |
| 4 | Количество вязкой составляющей в изломе, B | 3,48 | 0,75 |

Значения единичных показателей рассчитанных по формуле 8, и значения обобщенной функции желательности с учётом коэффициента экономического эффекта K_3 (36) рассчитанных по формуле (37), приведены в таблице 28.

Таблица 28 – Единичные и комплексные показатели желательности для образцов

| Режим испытания | Единичные показатели желательности по d_i отдельным характеристикам материала | | | | Комплексный показатель желательности D_i |
|-----------------|---|-----------------------------|------------------------------------|--|--|
| | Размер зерна, D_3 | Твердость по Виккерсу, HV | Растягивающее напряжение, σ | Количество вязкой составляющей в изломе, B | |
| 1(НТД) | 0,75 | 0,37 | 0,37 | 0,37 – 0,67 | 0,48 |
| 2 | 0,37 | 0,80 | 0,47 | 0,79 | 0,54 |
| 3 | 0,80 | 0,49 | 0,80 | 0,75 | 0,65 |

Обобщенная функция желательности Харрингтона для рассматриваемых показателей качества приведена на рисунке 33.



1,2,3 – Режим испытания; ■ – Размер зерна D_3 , мкм; ● – Твердость по Виккерсу HV , МПа;
 * – Растягивающее напряжение σ , МПа; ▲ – Количество вязкой составляющей в изломе B , %.

Рисунок 33 – Обобщенная функция желательности Харрингтона

При анализе единичных показателей желательности и на основе значений обобщенной функции желательности можно сделать следующие выводы:

- наилучшим сочетанием характеристик обладает алюминий, испытанный по режиму №3;
- при существенно более коротком импульсе ударного воздействия (режим №3) значение обобщенной функции желательности имеет максимальное значение 0,70, что говорит о преимуществе использования этого режима для проведения испытаний кольцевых материалов;
- так как для оценки качества материалов при ударном нагружении большое значение имеет сопротивляемость хрупкому разрушению, характеризуемая единичным параметром «Количество вязкой составляющей в изломе B , %», то наиболее предпочтительным является режим, когда материал переходит в категорию качества «отлично».

Таким образом, с помощью номограммы желательности и на основе значений обобщенной функции желательности можно увидеть, какие исследуемые параметры находятся в интервалах «хорошо» и «отлично», а также значения, попавшие в интервалы «удовлетворительно» и «плохо» и нуждаются в улучшении и доработке.

Представленный квалиметрический метод оценки сопротивляемости металлических материалов хрупкому разрушению позволяет эффективно оценить уровень надежности материала в экстремальных условиях нагружения.

3.3 Диаграмма сравнения показателей качества металлических материалов испытанных магнитно-импульсным методом

В таблице 29 приведены экспериментальные данные и результаты исследований кольцевых образцов испытанных по разным режимам высокоскоростного нагружения магнитно-импульсным методом [24, 28, 68, 84, 85].

В соответствии с методом оценки [57, 71], рассчитаны отдельные относительные показатели уровня качества образцов q_i по прямой формуле (5) и обратной (6) формуле.

Количественно величины итоговых показателей качества образцов, т.е. уровень качества (Y_k) рассчитаны как средние арифметические значения всех уровней учитываемых свойств (q_i), сопоставляемых (оцениваемого и базового) образцов по формуле (7).

Таблица 29 – Значения показателей качества кольцевых образцов [24, 28, 68, 84, 85]

| № п/п | Наименование показателя качества | Базовые значения №1 | Значение показателя качества образца | | | |
|----------|---|---|--------------------------------------|------|------|------|
| | | | №2 | №3 | №4 | №5 |
| | | при испытании с длительностью импульса T , мкс | | | | |
| | | 38 | 7,5 | 5,5 | 7,5 | 1 |
| 1. | Размер зерна D_z , мкм | 4,6 | 8,2 | 0,45 | 1,2 | 3 |
| 2. | Твердость по Виккерсу HV , МПа | 1175 | 1461 | 992 | 1098 | 1202 |
| 3. | Количество вязкой составляющей в изломе B , % | 80 | 98,2 | 92,3 | 96,5 | 91,5 |

В таблице 30 приведены результаты расчетов уровней качеств алюминиевых образцов.

Таблица 30 – Оценки уровней качеств алюминиевых образцов

| № п/п | Наименование показателя качества | Обозна чение, q_i | Относительное значение показателя качества образца | | | | |
|--------------------------|---|------------------------|---|------|-------|------|------|
| | | | №1 | №2 | №3 | №4 | №5 |
| | | | при испытании с длительностью импульса T , мкс | | | | |
| | | | 38 | 7,5 | 5,5 | 7,5 | 1 |
| 1. | Размер зерна | q_1 | 1 | 0,56 | 10,22 | 3,83 | 1,53 |
| 2. | Твердость по Виккерсу | q_2 | 1 | 1,24 | 0,84 | 0,93 | 1,02 |
| 3. | Количество вязкой составляющей в изломе | q_3 | 1 | 1,23 | 1,15 | 1,21 | 1,14 |
| Уровень качества образца | | Y_{ki} | 1 | 1,01 | 4,07 | 1,99 | 1,23 |

Для более точной и информативной оценки технического уровня, характеризующего качество образцов, построена диаграмма сравнения показателей качества (рисунок 33), на которой наглядно видно, по какому показателю следует принимать управленческие и технические решения.



Рисунок 34 – Диаграмма сравнения показателей качества

При анализе диаграммы сравнения показателей качества (рисунок 34) и на основе итоговых значений показателей качества для образцов, испытанных по разным режимам, можно сделать следующие выводы:

- в материале образца, испытанного по режиму №3, наблюдается улучшение по всем показателям, за исключением параметра «Твердость по Виккерсу»;
- площадь многоугольника, занимаемая показателями режима №3 значительно больше площади многоугольников, занимаемых показателями режимов №1, №2, №4 и №5 что свидетельствует о превосходстве режима №3;
- при существенно более коротком импульсе ударного воздействия (режим №3) образец имеет максимальное значение $V_{к3} = 4,07$, по сравнению с $V_{к2} = 1,01$, $V_{к4} = 1,99$ $V_{к5} = 1,23$ и что указывает на преимущество использования этого режима для проведения испытаний кольцевых материалов.

3.4 Планирование эксперимента материалов испытанных магнитно-импульсным методом

При планировании в соответствии с методикой [76], был реализован полный двухфакторный эксперимент. Параметром оптимизации являлось время до разрушения алюминиевого образца, факторами оптимизации были выбраны длительность импульса и площадь поперечного сечения образца. Исходные данные для планирования эксперимента приведены в таблице 31.

Таблица 31 – Исходные данные для планирования эксперимента [24, 28, 68, 84, 85]

| № п/п | Длительность импульса T , мкс | Площадь поперечного сечения S , мм | Время до разрушения t , мкс |
|-------|---------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 7,5 | 0,12 | 13,4 |
| 2 | 7,5 | 0,15 | 13,4 |
| 3 | 1,0 | 0,042 | 2,65 |
| 4 | 1,0 | 0,023 | 4,17 |

В выбранной линейной модели, для построения аппроксимирующей функции (11), которая строится в виде полинома (12), определены основной уровень x_0 по формуле (13) и интервал варьирования I по формуле (14) управляющего параметра x_i .

Для упрощения планирования эксперимента, кодирование реальных (натуральных) уровней x_i значений факторов проведено с помощью преобразования (15)

В таблице 32 приведены значения факторов оптимизации для проведенных экспериментов [97].

Таблица 32 – Условия проведения опытов

| Факторы | Длительность импульса T , мкс | Площадь поперечного сечения S , мм |
|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|
| Код | x_1 | x_2 |
| Основной уровень (x_0) | 4,25 | 0,0865 |
| Интервал варьирования (I_j) | 3,25 | 0,0635 |
| Верхний уровень (x_{\max}) | 7,5 | 0,15 |
| Нижний уровень (x_{\min}) | 1,0 | 0,023 |

В таблице 33 приведена матрица планирования экспериментов.

Таблица 33 – Матрица планирования экспериментов

| Номер опыта | Факторы (x_j) | | | Время до разрушения t , мкс |
|-------------|-------------------|-------|-------|-------------------------------|
| | x_0 | x_1 | x_2 | |
| 1 | +1 | +1 | +0,53 | 13,4 |
| 2 | +1 | +1 | +1 | 13,4 |
| 3 | +1 | -1 | -0,70 | 2,65 |
| 4 | +1 | -1 | -1 | 4,17 |

Коэффициенты регрессии функции отклика рассчитаны по формуле (16).

$$b_0 = \frac{(+1) \cdot 13,4 + (+1) \cdot 13,4 + (+1) \cdot 2,65 + (+1) \cdot 4,17}{4} = 8,405$$

$$b_1 = \frac{(+1) \cdot 13,4 + (+1) \cdot 13,4 + (-1) \cdot 2,65 + (-1) \cdot 4,17}{4} = 4,995$$

$$b_2 = \frac{(+0,53) \cdot 13,4 + (+1) \cdot 13,4 + (-0,70) \cdot 2,65 + (-1) \cdot 4,17}{4} = 3,619$$

Уравнение регрессии рассчитанное по формуле (12), имеет следующий вид.

$$y = 8,405 + 4,995x_1 + 3,619x_2$$

Таким образом, достижение максимальных значений времени до разрушения алюминиевого образца возможно при приближении значений факторов к верхнему уровню выбранного интервала варьирования.

По результатам проведенного планирования эксперимента можно сделать следующие выводы:

– значения времени до разрушения алюминиевого образца возрастают при повышении длительности импульса и увеличении площади поперечного сечения образца в выбранных интервалах варьирования;

– сопоставление коэффициентов регрессии при соответствующих факторах показывает, что наибольшее влияние в проведенных экспериментах имеет длительность импульса.

3.5 Секторные диаграммы материалов испытанных магнитно-импульсным методом

Для оценки материалов испытанных магнитно-импульсным методом, показателями качества для построения секторных диаграмм были выбраны:

- размер зерна D_z , мкм;
- твердость по Виккерсу HV , МПа;
- растягивающее напряжение σ , МПа;
- количество вязкой составляющей в изломе B , %;
- время до разрушения t , мкс.

Коэффициенты весомости получены экспертным путем - методом ранжирования. Коэффициент согласованности мнений экспертов составил – 0,8, что говорит о том, что коэффициентам весомости, определенным данным методом, можно доверять. Полученные значения пока-

зателей качества образцов №2 и №3, испытанных при разной длительности импульса T , представлены в таблицах 34, 35 и на рисунке 35 а, б соответственно [88, 89, 91 - 94].

Уровень качества U_k близок к среднему взвешенному арифметическому показателю. Значение среднего взвешенного кругового показателя графически отображается окружностью в виде пунктирной линии и составляет:

$$U_{k1} = \sqrt{0,21 \cdot 0,56^2 + 0,20 \cdot 1,24^2 + 0,19 \cdot 1,04^2 + 0,33 \cdot 1,23^2 + 0,07 \cdot 1,00^2} = 1,072$$

$$U_{k2} = \sqrt{0,21 \cdot 1,53^2 + 0,20 \cdot 1,02^2 + 0,19 \cdot 1,42^2 + 0,33 \cdot 1,14^2 + 0,07 \cdot 0,19^2} = 1,230$$

$U_k < 1$ означает, что уровень качества данного образца ниже базового.

Таблица 34 – Данные для уровня качества образца №1

| № п/п | Показатели качества | Базовые значения | № 1 | Относительное значение, r_i | Коэффициент весомости, α_i | φ , град |
|-------|---|------------------|------|-------------------------------|-----------------------------------|------------------|
| 1. | Количество вязкой составляющей в изломе B , % | 80 | 98,2 | 1,23 | 0,33 | 119 |
| 2. | Размер зерна D_z , мкм | 4,6 | 8,2 | 0,56 | 0,21 | 76 |
| 3. | Твердость по Виккерсу HV , МПа | 1175 | 1461 | 1,24 | 0,20 | 72 |
| 4. | Растягивающее напряжение σ , МПа | 100 | 104 | 1,04 | 0,19 | 68 |
| 5. | Время до разрушения t , мкс | 13,4 | 13,4 | 1 | 0,07 | 25 |
| | Сумма | - | - | - | 1 | 360 |

Таблица 35 – Данные для уровня качества образца №2

| № п/п | Показатели качества | Базовые значения | № 2 | Относительное значение, r_i | Коэффициент весомости, α_i | φ , град |
|-------|---|------------------|------|-------------------------------|-----------------------------------|------------------|
| 1. | Количество вязкой составляющей в изломе B , % | 80 | 91,5 | 1,14 | 0,33 | 119 |
| 2. | Размер зерна D_z , мкм | 4,6 | 3 | 1,53 | 0,21 | 76 |
| 3. | Твердость по Виккерсу HV , МПа | 1175 | 1202 | 1,02 | 0,20 | 72 |
| 4. | Растягивающее напряжение σ , МПа | 100 | 142 | 1,42 | 0,19 | 68 |
| 5. | Время до разрушения t , мкс | 13,4 | 2,65 | 0,19 | 0,07 | 25 |
| | Сумма | - | - | - | 1 | 360 |

Учитывая коэффициенты весомости, расчёты показали, что уровень качества образца №2 в 1,1 раза больше уровня качества образца № 1. Для наглядного сравнения показателей построены секторные диаграммы (Рисунок 35).

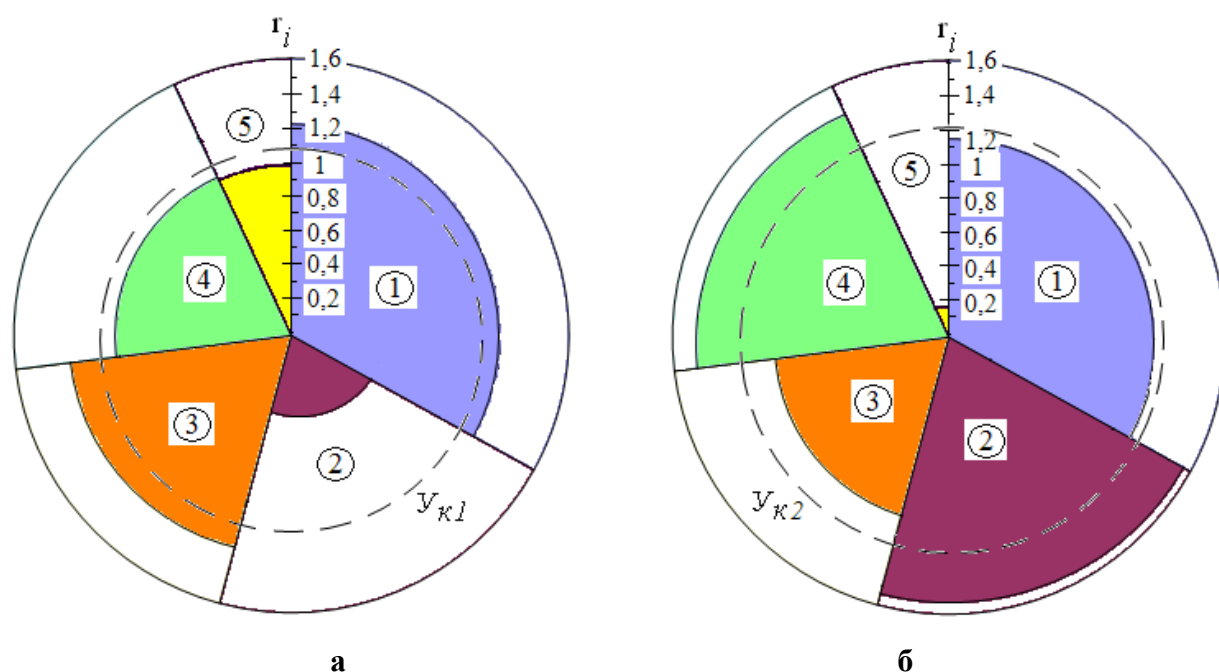


Рисунок 35 – Секторные диаграммы уровня качества: а - образец № 1; б- образец №2

На секторных диаграммах наглядно видно, что по показателям 2 - «Размер зерна» и 4 - «Растягивающее напряжение» образец №2 превосходит образец № 1: примерно на 9 пунктов по параметру 2 - «Размер зерна», на 4 пункта по параметру 4 - «Растягивающее напряжение». При этом образец № 1 обладает наилучшим показателем (базовым) по параметру 1 - «Количество вязкой составляющей в изломе», превосходит образец №2 примерно на 1 пункт, по параметру 3 - «Твердость по Виккерсу» на 2 пункта, по параметру 5 - «Время до разрушения» на 8 пунктов.

3.6 Горизонтальные гистограммы материалов испытанных магнитно-импульсным методом

Показателями качества алюминиевых кольцевых образцов для построения *горизонтальной гистограммы* были выбраны:

- количество вязкой составляющей в изломе B , %;
- размер зерна D_z , мкм;
- твердость по Виккерсу HV , МПа;
- растягивающее напряжение σ , МПа;
- количество пор на площади 400 мкм^2 n , шт;
- время до разрушения t , мкс.

В таблице 36 представлены экспериментальные данные, результаты исследований и

процентная значимость характеристик, влияющих на качество кольцевых алюминиевых образцов испытанных по разным режимам высокоскоростного нагружения магнитно-импульсным методом [88, 89, 91-93, 97].

Таблица 36 – Характеристики исследованных алюминиевых образцов и их процентная значимость [88, 89, 91-93, 97]

| № п/п | Наименование показателя качества | Базовые значения №1 | Значение показателя качества образца | | Значимость, % |
|-------|--|--|--------------------------------------|------|---------------|
| | | | №2 | №3 | |
| | | при испытании с длительностью импульса T , мкс | | | |
| | | 38 | 7,5 | 1 | |
| 1. | Количество вязкой составляющей в изломе B , % | 80 | 98,2 | 91,5 | 30 |
| 2. | Размер зерна D_3 , мкм | 4,6 | 8,2 | 3 | 20 |
| 3. | Твердость по Виккерсу HV , МПа | 1175 | 1461 | 1202 | 20 |
| 4. | Растягивающее напряжение σ , МПа | 100 | 104 | 142 | 15 |
| 5. | Время до разрушения t , мкс | 13,4 | 13,4 | 2,6 | 10 |
| 6. | Количество пор на площади 400 мкм^2 n , шт | 53 | 91 | 70 | 5 |

Для более точной и информативной количественной оценки технического уровня, характеризующего качество алюминиевых образцов, был применен дифференциальный метод, в соответствии с которым, рассчитаны отдельные относительные показатели уровня качества оцениваемых образцов q_i по формулам (5) и (6). Итоговые показатели качества образцов, т.е. уровни качества (V_k) рассчитаны как средние арифметические значения всех уровней учитываемых свойств (q_i), сопоставляемых (оцениваемого и базового) образцов по формуле (7).

В таблице 37 приведены оценки уровней качеств алюминиевых образцов.

Таблица 37 – Оценки уровней качеств алюминиевых образцов

| № п/п | Наименование относительных показателей качества | Обозначение, q_i | Относительное значение показателя качества образца | | |
|-------|---|--------------------|--|------|------|
| | | | №1 | №2 | №3 |
| | | | при испытании с длительностью импульса T , мкс | | |
| | | | 38 | 7,5 | 1 |
| 1. | Количество вязкой составляющей в изломе, B | q_1 | 1,00 | 1,23 | 1,14 |
| 2. | Размер зерна, D_3 | q_2 | 1,00 | 0,56 | 1,53 |
| 3. | Твердость по Виккерсу, HV | q_3 | 1,00 | 1,24 | 1,02 |
| 4. | Растягивающее напряжение, σ | q_4 | 1,00 | 1,04 | 1,42 |
| 5. | Время до разрушения t , мкс | q_5 | 1,00 | 1,00 | 0,19 |
| 6. | Количество пор на площади 400 мкм^2 , n | q_6 | 1,00 | 0,58 | 1,30 |
| | Итоговый показатель качества образца | V_{ki} | 1,00 | 0,94 | 1,10 |

Для визуального представления оценок уровней качества алюминиевых образцов, на горизонтальной гистограмме от вертикальной оси относительные значения критериев откладываются влево, а для удобства анализа натуральные значения критериев откладываются вправо (рисунок 36).

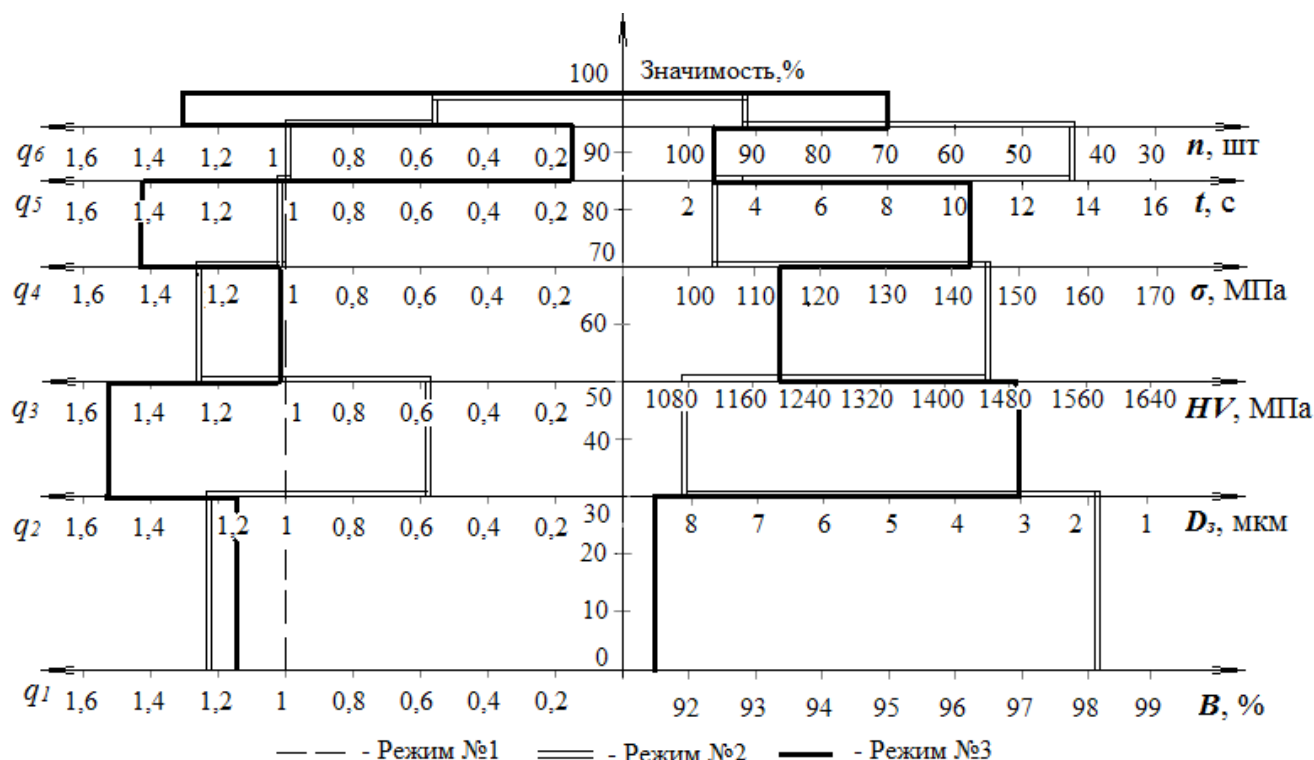


Рисунок 36 – Горизонтальная гистограмма

При анализе горизонтальной гистограммы (рисунок 35) и на основе итоговых значений показателей качества для алюминиевых образцов, испытанных по разным режимам нагружения, можно сделать следующие выводы:

- режим испытания № 3 предпочтительнее режима №2 по таким показателям, как длительность импульса $T = 1$ мкс, растягивающее напряжение $\sigma = 142$ МПа, количество пор на площади 400 мкм^2 $n = 70$ шт, несмотря на проигрыш по количеству вязкой составляющей в изломе $B = 91,5$ % и времени до разрушения $t = 2,6$ мкс;

- при существенно более коротком импульсе ударного воздействия режим №3 имеет максимальное значение уровня качества $Y_{к3} = 1,10$, по сравнению с $Y_{к1} = 1,00$ и $Y_{к2} = 0,94$, что указывает на преимущество использования этого режима для проведения испытаний кольцевых материалов.

что При существенно более коротком импульсе ударного воздействия режим №3 имеет максимальное значение уровня качества $Y_{к3} = 1,10$, по сравнению с $Y_{к1} = 1,00$ и $Y_{к2} = 0,94$.

3.7 Корреляционный анализ по диаграмме разброса материалов испытанных магнитно-импульсным методом

Для оценки тесноты взаимосвязи между показателями качества, полученными после испытаний алюминиевых образцов по разным технологическим режимам высокоскоростного ударного нагружения (Таблица 38), был применен корреляционный анализ [84, 96, 99-102].

Таблица 38 – Данные, полученные после испытаний алюминиевых образцов [84, 96, 99-102]

| № п/п | Наименование показателя качества | Значение показателя качества образца | | | | | | |
|-------|---|--|------|------|-------|-------|-------|-------|
| | | №1 | №2 | №3 | №4 | №5 | №6 | №7 |
| | | при испытании с длительностью импульса T , мкс | | | | | | |
| | | 7,5 | 5,5 | 7,5 | 1 | 1 | 1 | 0,10 |
| 1. | Размер зерна D_z , мкм | 8,2 | 0,45 | 1,2 | 3 | 1,2 | 1,95 | 0,72 |
| 2. | Твердость по Виккерсу HV , МПа | 1461 | 992 | 1098 | 1202 | 288,9 | 240,6 | 2745 |
| 3. | Количество вязкой составляющей в изломе B , % | 98,2 | 92,3 | 96,5 | 91,5 | 91,1 | 88 | 92,62 |
| 4. | Время до разрушения t , мкс | 13,4 | 4,5 | 13,4 | 2,65 | 4,17 | - | 0,30 |
| 5. | Площадь поперечного сечения S , мм ² | 0,12 | 0,03 | 0,15 | 0,042 | 0,023 | 0,03 | 0,041 |

Для пар данных: «количество вязкой составляющей в изломе, B - длительность импульса, T », «время до разрушения, t - площадь поперечного сечения, S », «количество вязкой составляющей в изломе, B - площадь поперечного сечения, S », «размер зерна, D_z - площадь поперечного сечения, S », «размер зерна, D_z - длительность импульса, T », «твердость по Виккерсу, HV - площадь поперечного сечения, S » построены диаграммы разброса (рисунок 37- 42).

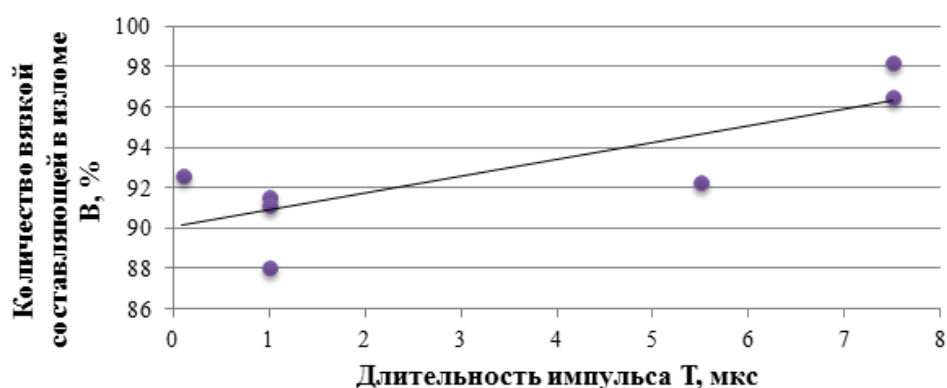


Рисунок 37 – Диаграмма разброса: количество вязкой составляющей в изломе B , % - длительность импульса T , мкс

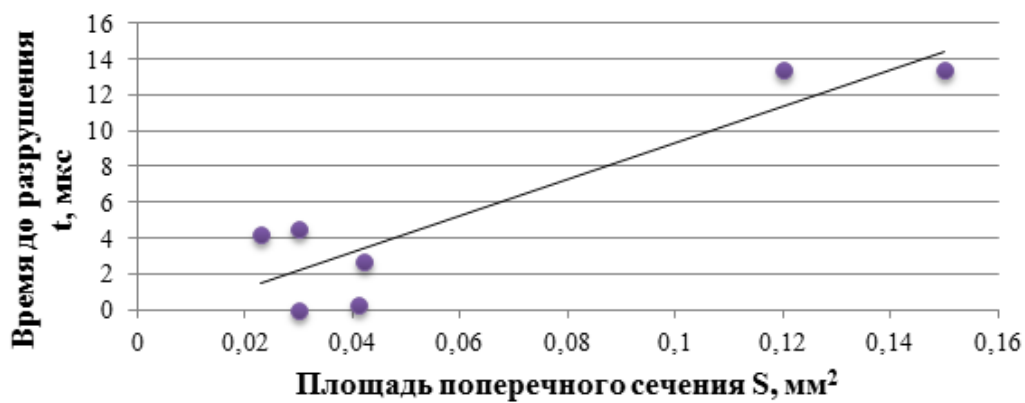


Рисунок 38 – Диаграмма разброса: время до разрушения t , мкс - площадь поперечного сечения S , мм²

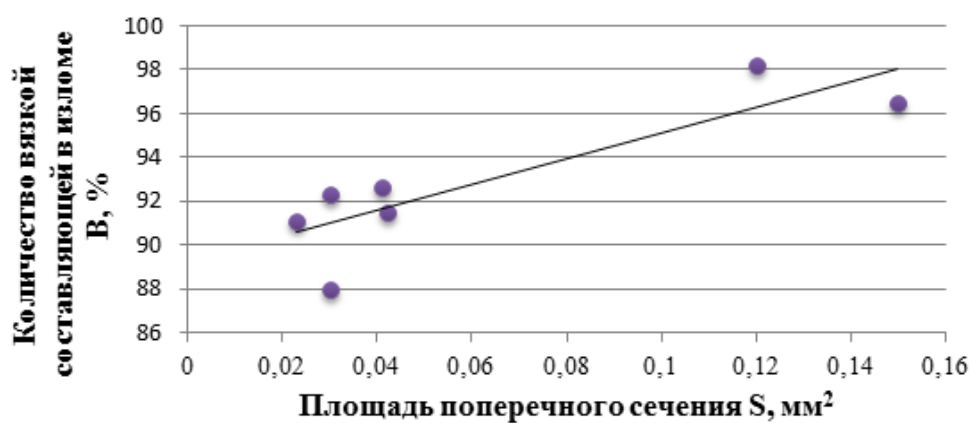


Рисунок 39 – Диаграмма разброса: количество вязкой составляющей в изломе B , % - площадь поперечного сечения S , мм²

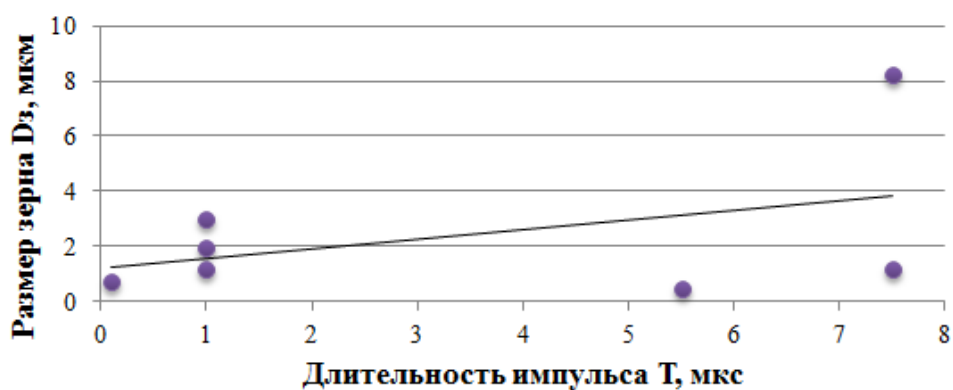


Рисунок 40 – Диаграмма разброса: размер зерна D_z , мкм - длительность импульса T , мкс

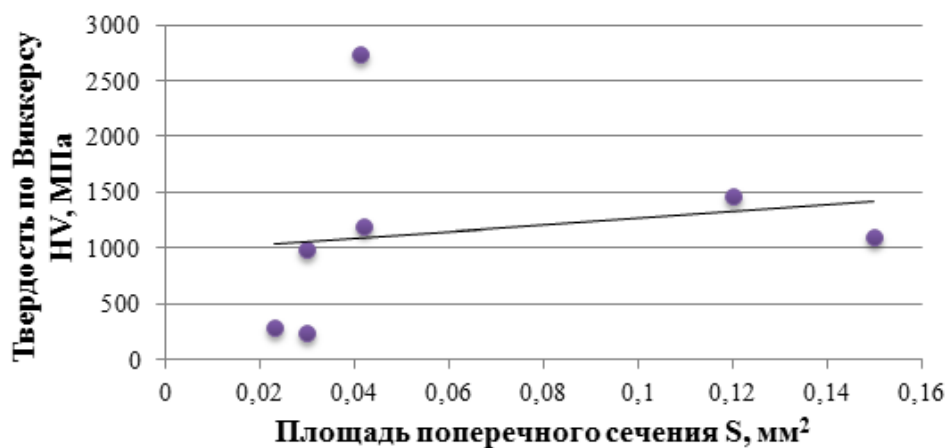


Рисунок 41 – Диаграмма разброса: твердость по Виккерсу HV , МПа – площадь поперечного сечения S , мм²

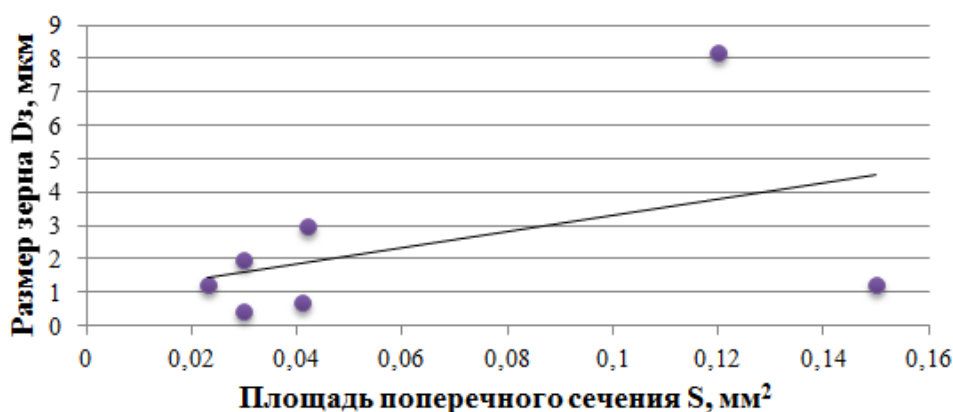


Рисунок 42 – Диаграмма разброса: размер зерна D_z , мкм – площадь поперечного сечения S , мм²

На диаграммах разброса (Рисунок 37- 42) видно, что между показателями существует прямая положительная корреляция (с увеличением x_i значения y_i имеют тенденцию к возрастанию).

Степень взаимосвязи коррелируемых пар признаков оценивалась с помощью коэффициента корреляции Пирсона, вычисляемого по формуле (21).

Ввиду оценки корреляции по выборке малого объема ($N=7$ меньше 100) значение коэффициента корректировалось по формуле (22) [79, 80].

Полученные значения коэффициентов корреляции r^l (Таблица 39) проверены на значимость по t -критерию Стьюдента. При этом выдвигалась и проверялась нулевая гипотеза об отсутствии связи между x и y в генеральной совокупности. Для этого определено расчетное значение критерия по формуле (23) [7] и сопоставлено с табличным значением t -критерия Стьюдента $t_{табл}$. При уровне значимости (т. е. вероятности допустимой ошибки в прогнозе)

$\alpha = 0,05$ и числом степеней свободы $\nu = n-2$, при $n = 7$ значение t -критерия Стьюдента $t_{табл} = 2,5706$.

Таблица 39 – Сводные данные корреляционного анализа

| Пары данных для оценки | Коэффициент корреляции, r^l | Расчетный t -критерий Стьюдента, $t_{расч.}$ |
|---|-------------------------------|--|
| Количество вязкой составляющей в изломе, B - длительность импульса, T | 0,847 | 3,5648 |
| Время до разрушения, t - площадь поперечного сечения, S | 0,933 | 5,774 |
| Количество вязкой составляющей в изломе, B - площадь поперечного сечения, S | 0,891 | 4,3849 |
| Размер зерна, D_3 , - площадь поперечного сечения, S | 0,854 | 3,6706 |
| Размер зерна, D_3 - Длительность импульса, T | 0,468 | 1,1838 |
| Твердость по Виккерсу, HV - площадь поперечного сечения, S | 0,648 | 1,9014 |

На основе построенных диаграмм разброса, рассчитанных значений коэффициентов корреляции для исследуемых пар данных и сопоставления их с табличным значением t -критерия Стьюдента, можно сделать следующие выводы:

– Самое большое значение коэффициента корреляции $r^l = 0,933$ имеет коррелируемая пара «время до разрушения, t - площадь поперечного сечения, S ». С увеличением показателя «площадь поперечного сечения, S » увеличивается показатель «время до разрушения, t ».

– Для коррелируемых пар признаков: «количество вязкой составляющей в изломе, B - длительность импульса, T », «количество вязкой составляющей в изломе, B - площадь поперечного сечения, S », «размер зерна, D_3 - площадь поперечного сечения, S », значения коэффициентов корреляции показывают высокую степень взаимосвязи. С увеличением показателя x увеличивается показатель y .

– Значение коэффициента корреляции $r^l = 0,648$ показывает степень взаимосвязи - выше средней между парой «твердость по Виккерсу, HV - площадь поперечного сечения, S ». С увеличением показателя «площадь поперечного сечения, S » увеличивается показатель «твердость по Виккерсу, HV ».

– Значение коэффициента корреляции $r^l = 0,468$ показывает слабую степень взаимосвязи между парой «размер зерна, D_3 - длительность импульса, T ». С увеличением показателя «длительность импульса, T » увеличивается показатель «размер зерна, D_3 ».

– Для коррелируемых пар признаков: «количество вязкой составляющей в изломе, B - длительность импульса, T », «время до разрушения, t - площадь поперечного сечения, S », «количество вязкой составляющей в изломе, B - площадь поперечного сечения, S », «размер зерна,

D_3 - площадь поперечного сечения, S » выполняется соотношение $t_{расч} > t_{табл}$. Следовательно, для указанных пар данных нулевая гипотеза отвергается, линейные коэффициенты корреляции считаются значимыми, а связь между x и y – реальной.

– Для коррелируемых пар: «размер зерна, D_3 - длительность импульса, T », «твердость по Виккерсу, HV - площадь поперечного сечения, S », соотношение $t_{расч} > t_{табл}$ не выполняется, следовательно нулевая гипотеза подтверждается, линейный коэффициент корреляции считается не значимым, корреляционной взаимосвязи нет, поэтому указанные пары данных дальше в исследованиях не рассматривались.

3.8 Регрессионный анализ материалов испытанных магнитно-импульсным методом

Для исследования формы связи пар данных, приведенных в таблице 39 и на диаграммах 37-42, проведен *регрессионный анализ*. Для этого по статистическим данным получены уравнения зависимостей (линейная (24), логарифмическая (25), полиномиальная (26), степенная (27), экспоненциальная (28)), построены линии тренда и рассчитаны коэффициенты детерминации с использованием программы Microsoft Excel.

В таблицу 40 занесены уравнения полиномиальных моделей регрессии, которые наилучшим образом описывают зависимость пар данных, а коэффициенты детерминации принимают наибольшие значения [100-104].

Таблица 40 – Сводные данные корреляционного и регрессионного анализа

| Пары данных для оценки | Параметры | | | |
|---|------------------------------------|---|---------------------------------|-------------------|
| | Уравнение модели | Теоретическое корреляционное отношение, $\eta_{теор}$ | Коэффициент детерминации, R^2 | F-критерий Фишера |
| Количество вязкой составляющей в изломе, B - длительность импульса, T | $y = 0,3818x^2 - 2,1695x + 92,252$ | 0,9229 | 0,865 | 66,329 |
| Время до разрушения, t - площадь поперечного сечения, S | $y = 206,64x^2 + 66,443x + 0,0904$ | 0,9165 | 0,839 | 54,858 |
| Количество вязкой составляющей в изломе, B - площадь поперечного сечения, S | $y = -782x^2 + 192,03x + 85,695$ | 0,8992 | 0,809 | 44,584 |
| Размер зерна, D_3 , - площадь поперечного сечения, S | $y = 0,2061x^2 - 1,2795x + 2,4108$ | 0,8206 | 0,673 | 22,873 |

Для измерения тесноты связи при криволинейной зависимости между результативным и факторным признаком определено теоретическое корреляционное отношение (индекс корреляции), $\eta_{теор}$ по формуле (31).

Полученные теоретические корреляционные отношения $\eta_{теор}$ (Таблица 33) характеризуют очень тесную зависимость между коррелируемыми величинами.

Качество составленных уравнений регрессии оценено с помощью величины достоверности аппроксимации (коэффициента детерминации), который равен квадрату коэффициента корреляции (R^2). Он показывает, в какой мере изменчивость y (результативного признака) объясняется поведением x (факторного признака), т. е. какая часть общей изменчивости y вызвана собственно влиянием x . Этот показатель вычисляется путём простого возведения в квадрат коэффициента корреляции. Тем самым доля изменчивости y , определяемая выражением $1 - R^2$, оказывается необъясненной.

После нахождения по эмпирическим данным параметров уравнения регрессии, осуществлена проверка значимости уравнения регрессии (проверка адекватности модели).

Эта задача решалась путем расчета F -критерия Фишера (34) и сопоставления его с табличным (критическим) [81].

Расчётные F -критерии приведены в таблице 2 и сопоставлены с табличным (критическим), определенным для числа степеней свободы $\nu_1 = m-1$ и $\nu_2 = n-m$ и заданного уровня значимости $\alpha = 0,05$. Так как $F_{расч} > F_{табл}$ (6,61), то рассматриваемые уравнения регрессии являются значимыми.

По результатам регрессионного анализа пар данных, можно сделать следующие **выводы**:

– между факторами «размер зерна, D_z - площадь поперечного сечения, S » наблюдается зависимость выше средней $\eta_{теор} = 0,8$. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,673$. Это значение говорит о том, что 67,3% общей вариации размера зерна обусловлено вариацией фактора - площади поперечного сечения (и 32,7% общей вариации нельзя объяснить изменением площади поперечного сечения).

– между факторами «количество вязкой составляющей в изломе, B - длительность импульса, T » наблюдается сильная зависимость, $\eta_{теор} = 0,9$. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,865$, следовательно, 86,5% общей вариации количества вязкой составляющей в изломе обусловлено вариацией фактора - длительности импульса, остальные 13,5% общей вариации объясняются другими причинами).

– между факторами «время до разрушения, t - площадь поперечного сечения, S » наблюдается сильная зависимость, $\eta_{теор} = 0,9$. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,839$, значение кото-

рого говорит о том, что 83,9% общей вариации времени до разрушения обусловлено вариацией фактора - площади поперечного сечения (и 16,5% общей вариации нельзя объяснить изменением площади поперечного сечения).

– между факторами «количество вязкой составляющей в изломе, B - площадь поперечного сечения, S » наблюдается сильная зависимость, $\eta_{теор} = 0,9$. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,809$, значение которого говорит о том, что 80,9% общей вариации количества вязкой составляющей в изломе обусловлено вариацией фактора - площади поперечного сечения (и 19,1% общей вариации нельзя объяснить изменением площади поперечного сечения).

3.9 Процедура разработки стандарта организации «Методика квалитметрической оценки сопротивления разрушению металлических материалов испытанных магнитно-импульсным методом»

В настоящее время изготовление алюминиевых труб производят в соответствии с требованиями ГОСТ18482-79 [105], ОСТ192096-83 [106], ГОСТ 23697-79 [107].

За прошедшее время с момента введения выше указанных нормативно-технических документов, как в нашей стране, так и за рубежом ужесточились требования к прочностным характеристикам, введены новые требования к эксплуатационным характеристикам изделий в условиях возникновения ударного нагружения. Так, например, для изделий, эксплуатация которых предполагается в условиях возникновения ударного воздействия, необходимо контролировать: временное сопротивление (растягивающее напряжение) σ , МПа [105-107], твердость [65], количество вязкой составляющей в изломе B , % на поверхности разрушения образцов, которое определяется по ГОСТ 30456-97 [66] и регламентируется ГОСТ 31447-2012 [108]. Микроструктуру труб проверяют по методике предприятия изготовителя, где контролируют средний размер зерна по ГОСТ 21073.1-75 [67], количество пор, а также рассматривают дислокационную структуру.

Вышеизложенное указывает на необходимость создать единый стандарт для труб и изделий (конструкций), изготовленных из них, эксплуатация которых предполагается в условиях возникновения высокоскоростного нагружения, где в соответствии с международными стандартами будут регламентированы технические параметры, требуемые эксплуатационные характеристики, методы испытаний и исследований для получения значений характеристик качества, и включающий методику квалитметрической оценки металлических материалов, содержащую приведённые в настоящей работе инструменты квалитметрической оценки.

В процессе разработки стандарта должно быть уточнено его название согласно национальной терминологии.

Целью разработки стандарта является:

- создание стандарта, в котором технические требования будут максимально приближены к требованиям на продукцию повышенного качества, выпускаемую зарубежными трубными заводами;
- унифицирование размеров труб и допускаемых отклонений от них, что обеспечит взаимозаменяемость отечественной продукции зарубежной и, следовательно, повысит ее экспортный потенциал;
- обеспечение единообразия метрологических требований к методам контроля и испытаний;
- повышение качества и конкурентоспособности продукции на международном рынке;
- содействие достижению России позиции одной из ведущих в области производства труб на международном рынке;
- устранение имеющихся расхождений в требованиях, установленных к одинаковой продукции в нашей стране и за рубежом, что является основным техническим барьером в международной торговле.

Необходимость создания условий для продвижения отечественной продукции на зарубежные рынки и сохранения в рамках СНГ приоритетного торгово-экономического, научно-технического и технологического партнерства, обеспечения соответствия уровня промышленного развития научно-техническому прогрессу в условиях сокращения сферы государственного регулирования экономики и расширения самостоятельности субъектов хозяйствования настоятельно требует развития и совершенствования российских национальных нормативных документов.

Общемировой тенденцией стандартизации сегодня можно назвать переход на международные стандарты. Отечественная стандартизация также взяла курс на разработку национальных стандартов, соответствующих международным, и на базе международных.

Внедрение стандарта позволит производить трубы и изделия (конструкции), изготовленные из них, с необходимыми и достаточными эксплуатационными характеристиками. Эти изделия применяются в аэрокосмической промышленности, для криогенных резервуаров, трубопроводов систем ракет-носителей однократного и многократного применения, космических кораблей и других космических аппаратов, в изделиях авиационной промышленности, машиностроения, работающих в условиях возникновения высокоскоростного ударного воздействия.

В процессе анализа нормативно-технической документации выявлено отсутствие правил, регламентирующих процесс квалитетической оценки металлических материалов, испытанных магнитно-импульсным методом, и механизмов управления данным процессом на производственных предприятиях.

Исходя из вышеизложенного, в настоящей работе предлагается процедура разработки стандарта организации (СТО) «Методика квалитетической оценки сопротивления разрушению металлических материалов, испытанных магнитно-импульсным методом», разработанная на основе рекомендаций, представленных в [109]. Данная процедура включает список требуемых разделов стандарта и их примерное содержание.

В соответствии с [109] основными разделами процедура написания данного СТО являются: «Основные характеристики процесса», «Ресурсы процесса», «Выполнение процесса», «Ответственность руководства за управление процессом». Содержание данных разделов формируется на основе результатов, представленных выше во втором и третьем разделах настоящей диссертации. Стандарт, сформированный на основе представленной процедуры, будет полностью отвечать требованиям к документам системы менеджмента качества, устанавливаемым к ним [49, 110].

3.9.1 Используемые в процедуре разработки стандарта организации соглашения

1) Полужирным шрифтом выделяются названия обязательных разделов, подразделов и пунктов СТО.

2) Названия разделов печатаются прописными буквами.

3) Обычным шрифтом в тексте методики напечатан обязательный текст соответствующих разделов СТО.

4) Курсивом в тексте методики напечатаны указания по заполнению соответствующих разделов, подразделов и пунктов СТО.

5) Сноски на структурные элементы, имеющиеся в тексте данной процедуры, предназначены для пояснений к заполнению соответствующих структурных элементов разрабатываемого СТО.

3.9.2 Текст процедуры разработки стандарта организации

- 1 НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ**
- 2 НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ**
- 3 ТЕРМИНЫ, ОПРЕДЕЛЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ**
- 4 ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА**
 - 4.1 Владелец процесса
 - 4.2 Руководитель процесса
 - 4.3 Входы процесса
 - 4.4 Выходы процесса
 - 4.5 Исполнители процесса
- 5 РЕСУРСЫ ПРОЦЕССА**
 - 5.1 Персонал
 - 5.2 Инфраструктура
 - 5.2.1 Оборудование
 - 5.2.2 Программное обеспечение
 - 5.3 Материальные и временные ресурсы
 - 5.4 Управление ресурсами
- 6 ВЫПОЛНЕНИЕ ПРОЦЕССА**
 - 6.1 Графические схемы процесса
 - 6.2 Схема управления процессом
 - 6.3 Управление документацией и данными
- 7 ОТВЕТСТВЕННОСТЬ РУКОВОДСТВА**
- 8 ИЗМЕРЕНИЕ, АНАЛИЗ И УЛУЧШЕНИЕ**
- 9 ДОКУМЕНТИРОВАНИЕ И АРХИВИРОВАНИЕ**
- 10 ВНЕСЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ**
- 11 РАССЫЛКА**
- 12 ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ**
- 13 ЛИСТ ОЗНАКОМЛЕНИЯ**

1 НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

1.1 Настоящий стандарт устанавливает:

– порядок выполнения «Методики квалитетической оценки сопротивления разрушению металлических материалов, испытанных магнитно-импульсным методом» (далее «методики»);

– распределение ответственности между должностными лицами при выполнении процесса.

1.2 Настоящий стандарт распространяется на все виды деятельности, в ходе выполнения «Методики квалитетической оценки сопротивления разрушению металлических материалов, испытанных магнитно-импульсным методом» и при взаимодействии с другими процессами предприятия. Является обязательным для *(название подразделений)*.

1.3 Целью «Методики квалитетической оценки сопротивления разрушению металлических материалов, испытанных магнитно-импульсным методом» является *(цель принятия стандарта, например: установление требуемых характеристик качества материала, квалитетическая оценка качества материала испытанного магнитно-импульсным методом и др.)*.

1.4 Квалитетическую оценку качества металлических материалов, испытанных магнитно-импульсным методом специалисты *(название подразделений)* осуществляют:

1.4.1 на стадии проектирования и разработки изделия (конструкции);

1.4.2 в процессе изготовления утвержденного (принятого) изделия (конструкции);

1.4.3 по результатам изготовления изделия (конструкции), а также при поступлении рекламаций на поставленные потребителю (заказчику) изделия.

2 НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты и/или классификаторы:

Приводится перечень ссылочных документов в области стандартизации, который излагается в следующем порядке:

- национальные стандарты Российской Федерации;

- республиканские стандарты РСФСР;

- межгосударственные стандарты;

- стандарты СЭВ;

- внутренние нормативные документы предприятия.

3 ТЕРМИНЫ, ОПРЕДЕЛЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящем стандарте применены термины по *(указать нормативные документы)*, а также следующие термины с соответствующими определениями:

Указать термины и их определения. Термин записывают со строчной буквы, а определение – с прописной буквы. Термины обязательно сортируются по алфавиту.

4 ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА

4.1 Владелец процесса

(Должность, например, Директор по качеству).

Права, обязанности и ответственность владельца процесса – по должностной инструкции *(номер, название, дата принятия).*

4.2 Руководитель процесса

(Должность, например, Начальник отдела по качеству).

Права, обязанности и ответственность руководителя процесса – по должностной инструкции *(номер, название, дата принятия).*

4.3 Входы процесса

Перечисляются входы процесса с указанием их поставщиков.

4.4 Выходы процесса

Перечисляются выходы процесса с указанием их потребителей.

4.5 Исполнители процесса

Исполнители процесса – сотрудники *(название подразделений).*

5 РЕСУРСЫ ПРОЦЕССА

Перечисляются требуемые процессу ресурсы. Приводятся ссылки на нормативные документы, в которых определены технические требования и объемы ресурсов.

5.1 Персонал

Штатным расписанием подразделений (*название подразделений*) установлены квалификационные требования к сотрудникам, выполняющих процесс, и их численность.

5.2 Инфраструктура

5.2.1 Оборудование

Приводятся перечень используемого при выполнении процесса оборудования и список должностных лиц, ответственных за его техническую эксплуатацию.

5.2.2 Программное обеспечение

Приводятся перечень используемого при выполнении процесса программного обеспечения.

5.3 Управление ресурсами

Управление ресурсами процесса – по 6.1,6.2.

6 ВЫПОЛНЕНИЕ МЕТОДИКИ

Структурно-функциональная модель методики квалитетической оценки сопротивления разрушению металлических материалов, испытанных магнитно-импульсным методом – по 6.1.

6.1 Графические схемы процесса

В подразделе приводятся выполненные по ГОСТ Р 50.1.028–2001 графические схемы процесса, обеспечивающие его визуализацию и понимание.

6.2 Схема управления процессом

Для разработки схемы управления процессом используются таблицы, в которых представляются соответствующие средства для получения необходимой информации о ходе протекания процесса владельцем и руководителем и анализа и разработки управленческих решений.

6.3 Управление документацией и данными

Порядок разработки, оформления, утверждения, введения в действие, прохождения, контроля за исполнением, учетом, хранением, печатанием, копированием и тиражированием инструкций, которые регламентируют выполнение отдельных подпроцессов методики квалитметрической оценки сопротивления разрушению металлических материалов, испытанных магнитно-импульсным методом, и данных о процессе – по СТО (номер документа) «Порядок управления организационно-распорядительной документацией».

7 ОТВЕТСТВЕННОСТЬ РУКОВОДСТВА

7.1.1 Владелец процесса несет ответственность за своевременное и полное доведение до подразделений характеристик качества металлических материалов и режимов их испытания магнитно-импульсным методом для процесса квалитметрической оценки качества.

7.1.2 Владелец процесса несет ответственность за проведение квалитметрической оценки качества металлических материалов, испытанных магнитно-импульсным методом и за внесение возможных изменений и дополнений. Результаты квалитметрической оценки качества металлических материалов испытанных магнитно-импульсным методом по всем материалам должны рассматривать на оперативных заседаниях у директора по качеству.

7.2.1 Руководитель процесса несет ответственность за:

- ознакомление персонала подразделений (*название подразделений*) с политикой предприятия в области качества и роли процесса квалитметрической оценки качества металлических материалов, испытанных магнитно-импульсным методом и каждого сотрудника подразделений (*название подразделений*) в ее реализации;

- регулярный анализ процесса по 1.4 и разработку корректирующих и предупреждающих действий;

- обеспечение ресурсов процесса по 5.

7.2.2 Руководитель процесса управляет процессом путем его планирования, контроля, анализа и принятия управленческих решений.

8 ИЗМЕРЕНИЕ, АНАЛИЗ И УЛУЧШЕНИЕ

Владелец процесса осуществляет контроль и анализ хода выполнения процесса и его результатов по следующим измеряемым параметрам: *(приводится перечень измеряемых параметров процесса квалитетической оценки качества металлических материалов, испытанных магнитно-импульсным методом, контролируемых владельцем процесса).*

9 ДОКУМЕНТИРОВАНИЕ И АРХИВИРОВАНИЕ

9.1 Утвержденный подлинник настоящего стандарта организации хранятся у его разработчика.

9.2 Подлинник настоящего стандарта организации по окончании срока действия, при аннулировании или замене хранится в архиве *(название подразделения)* ___ лет.

10 ВНЕСЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ

10.1 Изменения к настоящему стандарту разрабатывает и оформляет рабочая группа предприятия по разработке стандартов по решению владельца процесса. Разработка нового издания также относится к изменениям.

Владелец процесса принимает решение об изменении настоящего стандарта на основании предложений владельцев других процессов, результатов анализа выявленных несоответствий и проводимых на предприятии аудитов.

10.2 Порядок оформления изменений к настоящему стандарту и взаимодействие должностных лиц и структурных подразделений при внесении изменений – по *(ссылка на соответствующий стандарт системы менеджмента качества предприятия).*

11 РАССЫЛКА

| № учт. экз. | Подразделение | Количество копий |
|-------------|---------------|------------------|
| | | |

12 ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ

| Изм. | Номера листов | | | | Номер документа | Подп. | Дата |
|------|---------------|--------|------|----------|-----------------|-------|------|
| | Изм. | Замен. | Нов. | Аннулир. | | | |
| | | | | | | | |

13 ЛИСТ ОЗНАКОМЛЕНИЯ

| № | Должность | Фамилия И.О. | Подп. | Дата |
|---|-----------|--------------|-------|------|
| | | | | |

3.10 Практическая ценность предложенной методики проведения оценки качества металлических материалов испытанных магнитно-импульсным методом

Использование конструктивных элементов из металлических материалов в изделиях авиационной, космической промышленности, машиностроения, работающих в условиях возникновения высокоскоростного ударного воздействия должно быть обоснованно прочностными, техническими или эксплуатационными свойствами металлического материала.

Результаты настоящей работы будут полезны и возможно их использование на промышленных предприятиях и объединениях, принимающих участие в разработке и производстве броневой защиты, средств индивидуальной защиты, элементов космической техники, медицинской техники.

С помощью предложенных инструментов квалитметрической оценки, возможно, усовершенствовать существующую методику оценки качества материалов, в условиях ударного нагружения путем проведения комплексной и наглядной оценки, кроме того, позволяет по упрощённой схеме выбрать материалы с наиболее подходящим качеством с точки зрения цены и качества, условий конечного использования. Предложенная квалитметрическая методика (в отличие от экспертных) увеличивает объективность оценки. Она не требует высокой квалификации и опыта в изучении и исполнении экспериментов со стороны персонала, последующего комплексного анализа и математической обработки результатов оценки. Реализация предложенной методики, в будущем позволит прогнозировать качество материала, подвергнутого нагружению в заданных условиях по результатам оценки и накопленным данным, что позволяет сэкономить на дорогостоящих натурных испытаниях изделий.

3.11 Оценка экономического эффекта исследования опытного образца

С помощью предложенных инструментов квалитметрической оценки возможно усовершенствовать существующую методику оценки качества материалов в условиях динамического нагружения путем проведения комплексной и наглядной оценки. Кроме того, это позволяет по упрощённой схеме выбрать материалы с наиболее подходящим качеством с точки зрения соотношения цены и качества и условий конечного использования. Предложенная квалитметрическая методика (в отличие от экспертных) увеличивает объективность оценки. Она не требует высокой квалификации и опыта в изучении и исполнении экспериментов со стороны персонала, последующего комплексного анализа и математической обработки результатов оценки. Реали-

зация предложенной методики в будущем позволит прогнозировать качество материала, подвергнутого нагружению в заданных условиях, по результатам оценки и накопленных данных, что позволяет сэкономить на дорогостоящих натуральных испытаниях изделий.

Суммарная экономия затрат всех производственных ресурсов (материалы, капитальные вложения, живой труд) от внедрения предложенных инструментов квалиметрической оценки в комплексе с испытаниями кольцевых образцов на магнитно-импульсной установке выражается через экономический эффект. Определение экономического эффекта осуществляется по методу приведенных затрат, либо при сопоставлении затрат между базовым (ранее применявшимся) и внедряемым методом. Таким образом, расчет экономического эффекта (\mathcal{E}) при использовании предлагаемой методики выбора материала с наиболее подходящим качеством для условий конечного использования осуществляется по формуле (35) [111].

$$\mathcal{E} = Z_1 - Z_2 \quad (35)$$

где Z_1 - затраты по первому способу;

Z_2 - затраты по второму способу.

Исследованию подвергалась деталь «Кронштейн», изготовленная из алюминиевого сплава Д16, массой 0,4 кг, предназначенная для использования в условиях возникновения ударных нагрузок. Цена изготовления приведенной детали составляет 500 руб.

Стоимость изготовления детали включает в себя следующие составляющие:

- стоимость подготовки к производству (определение технологических процессов и порядка изготовления детали, разработка программы для обработки на станке с числовым программным управлением, разработка и изготовление специализированной оснастки для установки и позиционирования заготовки);

- стоимость материала, включая логистику, связанную с приобретением отсутствующего материала на складе;

- машинное время на изготовление детали;

- слесарная обработка (снятие заусенцев, сверление отверстий, нарезание резьбы);

- финишные операции (покрытие, покраска);

- логистика (транспортировка детали для проведения финишных операций, отправка готовой продукции Заказчику курьером или экспресс-почтой).

В зависимости от объема научно-исследовательских работ для испытаний может потребоваться несколько деталей. В стоимость исследования также входит оплата кадров с высокой

квалификацией и опытом в изучении и исполнении экспериментов, комплексный анализ и математическая обработка результатов оценки.

Затраты на исследование лабораторных образцов в виде колец, масса которых с учетом отходов в сумме не превышает 0,3 кг, в комплексе с инструментами квалитметрической оценки, значительно снижаются, т. к. не требуется изготавливать деталь, уменьшаются расходы на материал и логистику.

Расчет затрат на проведение исследований детали «Кронштейн», подвергнутой испытанию динамической нагрузкой на испытательном стенде, и затрат на проведение исследований кольцевых образцов, испытанных на магнитно-импульсной установке в комплексе с инструментами квалитметрической оценки, приведен в таблице 41.

Таблица 41 - Расчет затрат на проведение исследований

| Объем работ | Заработная плата, руб. | Материальные затраты, руб. | Общие затраты на проведение исследований, руб |
|--|------------------------|----------------------------|---|
| Исследование детали на испытательном стенде | | | |
| Стоимость изготовления детали «Кронштейн» | | 500,00 | 500,00 |
| Транспортные расходы (с заработной платой) | 1700,00 | | 1700,00 |
| Работы, связанные с использованием труда специалистов | 18000,00 | | 18000,00 |
| Испытания на стенде (с заработной платой) | 9000,00 | | 9000,00 |
| Всего | | | 29200,00 |
| Исследование кольцевых образцов | | | |
| Стоимость изготовления кольцевых образцов | | 80,00 | 80,00 |
| Работы, связанные с использованием труда специалистов | 14000,00 | | 14000,00 |
| Испытания на магнитно-импульсной установке (с заработной платой) | 6000,00 | | 6000,00 |
| Всего | | | 20080,00 |

Исходя из данных, представленных в таблице 41, ниже проведен расчет экономического эффекта по формуле (35) от внедрения предлагаемого способа исследования материалов.

$$\mathcal{E} = 29200,00 - 20080,00 = 9120 \text{ руб.}$$

Экономический эффект в размере 9120 руб. не является значительным, но в сравнении с величиной затрат на стендовые испытания детали эта экономия составляет 31%, что уже существенно.

Таким образом, приведенные расчеты позволяют сделать вывод, что предлагаемый способ исследования материалов путем испытания кольцевых образцов на магнитно-импульсной установке в комплексе с инструментами квалиметрической оценки будет экономичнее стендовых испытаний деталей и дает положительный экономический эффект.

3.12 Модификация функции желательности Харрингтона

Выбор металлического материала, применяемого в конструкциях изделий, эксплуатация которых предполагается в условиях возникновения ударного воздействия, должен быть обоснован, как с точки зрения оптимального сочетания прочностных, технических и эксплуатационных свойств, так и с экономической точки зрения. Исходя из вышеизложенного, для учета экономической составляющей, повышения объективности при оценке металлических материалов (образцов изделий) по прочностным и эксплуатационным характеристикам с помощью квалиметрического инструмента - функции желательности Харрингтона предложено введение коэффициента экономического эффекта, который рассчитывается по формуле (36). Тенденция приближения коэффициента экономического эффекта $K_{\text{э}}$ к 1, означает повышение достигаемого экономического эффекта от применяемого металлического материала и изделия в целом.

$$K_{\text{э}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{C_p}{C_{\delta}}\right)^2} \quad (36)$$

где C_{δ} - цена опытного образца базового варианта;

C_p - цена опытного образца разрабатываемого варианта.

Соответственно обобщенная функция желательности принимает следующий вид (37).

$$D = K_{\text{э}} \cdot m \sqrt[m]{\prod_{i=1}^m d_i} \quad (37)$$

Приведенный коэффициент экономического эффекта (36) характеризует экономию при разработке изделия по отношению к базовому варианту разработки изделия, достигаемую путем сокращения статей затрат на проведение исследований изделия, таких как:

- стоимость изготовления кольцевых образцов;
- транспортные расходы;
- стоимость испытаний на магнитно-импульсной установке;
- стоимость работ, связанных с использованием труда высококвалифицированных специалистов по испытанию и обработке результатов в комплексе с инструментами квалиметрической оценки.

В прикладных целях квалиметрический инструмент - модифицированную функцию желательности Харрингтона целесообразно использовать для контроля качества организации процессов оценки качества металлических материалов и изделия в целом, и постоянного повышения качества организации, а следовательно, эффективности деятельности предприятия в целом, что гарантирует укрепление его конкурентоспособности.

3.13 Выводы по главе 3

1. Проведена квалиметрическая оценка алюминиевых кольцевых образцов испытанных при различных режимах высокоскоростного нагружения магнитно-импульсным методом.

2. Выявлено, что наилучшим сочетанием характеристик обладает алюминиевый образец, испытанный по режиму №3 с длительность импульса $T = 5,5$ мкс. При существенно более коротком импульсе ударного воздействия (режим №3) образец имеет максимальное значение итогового показателя качества образца $V_{к3} = 4,07$, по сравнению с $V_{к2} = 1,01$, $V_{к4} = 1,99$ $V_{к5} = 1,23$ и что указывает на преимущество использования этого режима для проведения испытаний кольцевых образцов.

3. Установлено, что существует высокая корреляционная зависимость (коэффициент корреляции $r^l = 0,933$) между характеристиками «время до разрушения, t - площадь поперечного сечения, S ». С увеличением показателя «площадь поперечного сечения, S » увеличивается показатель «время до разрушения, t ». Для коррелируемых пар признаков: «количество вязкой составляющей в изломе, B - длительность импульса, T », «количество вязкой составляющей в изломе, B - площадь поперечного сечения, S », «размер зерна, D_z - площадь поперечного сечения, S », значения коэффициентов корреляции показывают высокую степень взаимосвязи.

4. Установлено, что с уменьшением длительности импульса на алюминиевый образец, количество вязкой составляющей в изломе монотонно уменьшается, т.е. образцы становятся

более хрупкими.

5. Разработана процедура подготовки стандарта организации «Методика квалитметрической оценки сопротивления разрушению металлических материалов, испытанных магнитно-импульсным методом», включающая описание необходимых разделов стандарта, а также примерное содержание каждого раздела, и представляющая собой формализованную совокупность правил, регламентирующих процесс квалитметрической оценки качества металлических материалов, испытанных магнитно-импульсным методом и управление им в рамках сети процессов предприятия.

6. Проведена оценка экономического эффекта исследования опытного образца, которая показала, что предлагаемый способ исследования материалов путем испытания кольцевых образцов на магнитно-импульсной установке в комплексе с инструментами квалитметрической оценки будет экономичнее стеновых испытаний деталей и дает положительный экономический эффект.

7. Квалитметрический инструмент - функция желательности Харрингтона модифицирован путем введения коэффициента экономического эффекта в формулу расчета комплексного показателя желательности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе достигнута цель, имеющая важное экономическое и народно-хозяйственное значение – повышение качества оценки сопротивления разрушению металлических материалов, испытанных при коротком времени нагружения ($T = 1$ мкс) с помощью высокоскоростного расширения магнитно-импульсным методом, путем разработки методики квалитметрической оценки. Предлагаемый способ исследования материалов путем испытания кольцевых образцов на магнитно-импульсной установке в комплексе с инструментами квалитметрической оценки будет экономичнее стеновых испытаний деталей и дает положительный экономический эффект. В результате проведенных исследований получены следующие результаты:

1. Определены основные квалитметрические показатели металлических материалов, испытанных магнитно-импульсным методом, на основе проведенного анализа механических характеристик, полученных при испытаниях основных эксплуатационных свойств: твердость, растягивающее напряжение, количество вязкой составляющей в изломе, время до разрушения, размер зерна, количество пор;

2. Современные квалитметрические инструменты качества адаптированы к задаче оценивания сопротивления разрушению металлических материалов, эксплуатация которых предпола-

гается в условиях возникновения ударного воздействия, а именно: функции желательности Харрингтона (улучшен расчет комплексного показателя желательности, модифицированный путем введения коэффициента экономического эффекта), диаграммы сравнения показателей качества, планирования эксперимента, корреляционного анализа по диаграмме разброса, секторных диаграмм, горизонтальных гистограмм, регрессионного анализа;

3. Разработана рабочая инструкция «Разработка и правила оформления документированных процедур, рабочих инструкций, форм» определяющая единый порядок оформления ДП, РИ, Ф, используемый при описании любой деятельности в системе менеджмента качества предприятия;

4. Разработана документированная процедура «Процесс менеджмента ресурсов» описывающая порядок действий при внедрении и использовании инструментов качества для анализа и контроля качества продукции и процессов в системе менеджмента качества предприятия;

5. Впервые разработана методика квалитметрической оценки сопротивления разрушению металлических материалов, испытанных магнитно-импульсным методом;

6. Разработано методическое, технологическое, инструментальное обеспечение и технико-экономическое обоснование для апробации и внедрения стандарта организации «Методика квалитметрической оценки сопротивления разрушению металлических материалов, испытанных магнитно-импульсным методом».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мейерс, М.А., Мурр, Л.Е. Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов / под ред. М.А. Мейерса и Л.Е. Мурра. – М.: Metallurgiya, 1984. – 512 с.
2. Эпштейн, Г. Н. Высокоскоростная деформация и структура металлов / Г. Н. Эпштейн, О. А. Кайбышев. – М.: Metallurgiya, 1971. – 200 с.
3. Arnold, W. Dynamisches Werkstoffverhalten von Armco-Eisen bei Strobwellenbelastung. Fortschr / W. Arnold. – Ber.: VDI-Verlang. –1992, 248 с.
4. Гилман, Дж. Дж. Динамика дислокаций и поведение материалов при ударном воздействии / Дж. Дж. Гилман; пер. с англ. // Механика. – 1970. – №2. – С. 96–124.
5. Gray, III G. T., Rollett A.D. The high strain rate and spallation response of tantalum, Ta-10W and T-111. High strain rate behavior of refractory metals and alloys. Edited by Riad Asfahani, Edward Chen and Andrew Crowson // The Minerals, Metals & Materials Society. –1992. – P. 303–315.
6. Gray, III. G.T., Cerreta, E. Influence of Shock Prestraining and Grain Size on the Dynamic-Tensile-Extrusion Response of Copper: Experiments and Simulation. Shock Compression of Condensed Matter. – 2005. – P. 725-733.
7. Petit, J., Dequiedt, J.-L. Constitutive relations for copper with two mechanisms including twinning for a use under shock wave loading // J. Phys. IV France 110 (2003)
8. Glushak, B.L., Ignatova, O.N., Nadezhin, S.S., Nizovtsev, P.N., Podurets, A.M., Raevsky, V.A., Zocher, M. A., Preston, D.L.. A phenomenological visco-elastic-plastic model for dynamic yield of M1 Cu account for grain size / B.L. Glushak, O.N. Ignatova, S.S. Nadezhin, P.N. Nizovtsev, A.M. Podurets, V.A. Raevsky, M.A. Zocher, D.L. Preston // SCCM. – 2007. – P. 649
9. Janiszewski, J. Selection of Shaped Charge Liner Material with the Use of Electromagnetic Expanding Ring Technique / J. Janiszewski // Engineering Transactions. – 2012. – №4. – P. 333–344
10. Раевский, В. А. Расчетно-экспериментальные исследования влияния внутренней микроструктуры ОЦК и ГЦК металлов (Cu, Ta) на их механические свойства при высокоскоростном деформировании / В. А. Раевский // Проект 08-02-00087а. – 2008. – 10 с.
11. Niordson, F.L. A unit for testing materials at high strain rates / F.L. Niordson // Exp Mech. – 1965. – №5. – P. 23–32.
12. Grady, D.E., Benson, D.A. Fragmentation of metal rings by electromagnetic loading / D.E. Grady, D.A. Benson // Experimental Mechanics. – 1983. – №12. – P. 393–400.

13. Zhang, H., Ravi-Chandar, K. On the dynamics of necking and fragmentation – I. Real-time and post-mortem observations in Al 6061 / H. Zhang, K. Ravi-Chandar // *International Journal of Fracture*. – 2006. – №142. – P. 183-217.
14. Zhang, H., Ravi-Chandar, K. On the dynamics of necking and fragmentation – II. Effect of material properties, geometrical constraints and absolute size / H. Zhang, K. Ravi-Chandar // *International Journal of Fracture*. – 2008. – №150. – P. 33–36.
15. Zhang, H., Ravi-Chandar, K. On the dynamics of localization and fragmentation–III. Effect of cladding with a polymer / H. Zhang, K. Ravi-Chandar // *International Journal of Fracture*. – 2009. – №155. – P. 101–118.
16. Gududru, P.R., Freund, L.B. The dynamics of multiple neck formation and fragmentation in high rate extension of ductile materials / P.R. Gududru, L.B. Freund // *International Journal of Solids and Structures*. – 2002. – №39. – P. 5615-5632.
17. Zhou F., Molinari J.F., Ramesh K. An elastic-visco-plastic analysis of ductile expanding ring / F. Zhou, J.F. Molinari, K. Ramesh // *Int J Impact*. – 2006. – №33. – P. 1-12.
18. Altynova, M., Hu, X., Daehn, G.S Increased ductility in high velocity electromagnetic ring expansion / M. Altynova, X. Hu, G.S. Daehn // *Metall Trans A*. – 1996. – №18. – P. 37–44.
19. Carden, A.E., Williams, P.E., Karpp, R.R. Shock waves and high-strain-rate phenomena in metals / A.E. Carden, P.E. Williams, R.R. Karpp // Editors: Meyers M.A. and Murr L.E. New York and London. Plenum Press. – 1984. – P. 51
20. Wesenberg, D.L., Sagartz, M.J. Dynamic fracture of 6061-t6 aluminium cylinders / D.L. Wesenberg, M.J. Sagartz ppl // *J Appl Mech*. – 1977. –№4. – P. 643–646.
21. Rajendran, A.M., Fyfe I.M. Inertia effects on the ductile failure of thin rings / A.M. Rajendran, I.M. Fyfe // *J Appl Mech*. – 1982. – №49. – P. 31–36.
22. Mercier, S., Molinari, A. Analysis of multiple necking in rings under rapid radial expansion / S. Mercier, A. Molinari // *International Journal of Impact Engineering*. – 2004. – №30 P. 403–419.
23. Степанов, Г.В. Упруго-пластическое деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении / Г.В. Степанов. – Киев: Наукова думка. – 1991. – 288с.
24. Морозов, В.А., Петров, Ю.В., Лукин, А.А., Кац, В.М., Удовик, А. Г., Атрошенко, С.А., Грибанов, Д.А., Федоровский, Г.Д. Исследование прочности металлических колец при ударном воздействии магнитно-импульсным методом / В.А. Морозов, Ю.В. Петров, А.А. Лукин, В.М. Кац, А.Г. Удовик, С.А. Атрошенко, Д.А. Грибанов, Г.Д. Федоровский // *Журнал технической физики*. – 2011. – №6. – С. 51–56.
25. Кривошеев, С.И., Петров, Ю.В. Экспериментальная установка и методика исследования пороговых разрушающих нагрузок для образцов с макротрещинами при кратковременных

ударных воздействиях, создаваемых импульсным магнитным полем / С.И. Кривошеев, Ю.В. Петров. – Препринт №142. – СПб: ИПМаш РАН, 1997. – 32с.

26. Janiszewski, J. Effect of Cross Section Size on Ductility and Fragmentation of Copper Ring at High Strain Rate Loading Conditions / J. Janiszewski // Solid State Phenomena. – 2013. – №199. – P. 297–302.

27. Pandolfi, A., Krysl, P., Ortiz, M. Finite element simulation of ring expansion and fragmentation: the capturing of length and time scales through cohesive models of fracture / A. Pandolfi, P. Krysl, M. Ortiz // Intern. J. Fracture. – 1999. – № 95. – P. 279–297.

28. Морозов, В.А., Петров, Ю.В., Лукин, А.А., Атрошенко, С.А, Грибанов, Д.А. Разрыв металлических колец при ударном нагружении магнитно-импульсным методом / В.А. Морозов, Ю.В. Петров, А.А. Лукин, С.А. Атрошенко, Д.А. Грибанов // Журнал технической физики. – 2014. – №9. – С. 78–85.

29. Андреев, В.В. Выбор и формирование результативной технологии производства шипов противоскольжения на основе аддитивной квалиметрической модели: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.23 / Андреев Валентин Викторович. – Магнитогорск, 2008. – 140 с.

30. Бородина, Е.Н. Управление качеством стальных канатов с применением комплексного показателя действенности технологии волочения и свивки: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.23 / Бородина Екатерина Николаевна. – Магнитогорск, 2014. – 122 с.

31. Наливайко, А.В. Повышение качества арматурного проката в условиях металлургического мини-завода на основе комплексного показателя: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.23 / Наливайко Александр Владимирович. – Магнитогорск, 2011. – 145 с.

32. Рубин, Г.Ш. Развитие квалиметрии метизного производства на основе методологии функционально-целевого анализа: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.23 / Рубин Геннадий Шмульевич. – Магнитогорск, 2011 – 210 с.

33. Сабадаш, А.В. Выбор и разработка эффективной технологии производства фланцевых болтов с фасонной головкой типа "TORX" на основе квалиметрической оценки: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.23 / Сабадаш Алексей Владиславович. – Магнитогорск, 2005. – 147 с.

34. Александров, М.Н. Разработка методики управления качеством технологических систем с высокой вариабельностью параметров (на примере производства высокоэнергетических магнитных материалов): дис. ... канд. техн. наук: 05.02.23 / Александров Марк Никитич. – М., 2009. – 136с.

35. Богоявленский-Храмов, М.С. Разработка методики статистического анализа производственно-технологического процесса для выбора предупреждающих действий и повышения

качества продукции: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.23 / Богоявленский-Храмов Михаил Сергеевич. – М., 2008. – 117 с.

36. Новикова, Е.Г. Разработка методических рекомендаций по применению квалитметрических методов оценки качества материалов в условиях высокоскоростного нагружения: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.23 / Новикова Евгения Геннадьевна. – М., 2009. – 137 с.

37. Ботвина, Л.Р. Критерий динамической фрагментации, отражающий влияние состава, механических свойств материала и условий нагружения / Л.Р. Ботвина // Деформация и разрушение материалов. – 2010. – №12. – С. 15–22.

38. Гридин, В.И., Пьянков, А.А. Прогнозирование остаточного ресурса агрегатов ракетно-артиллерийского вооружения с использованием корреляционных зависимостей контролируемых эксплуатационных параметров износа / В.И. Гридин, А.А. Пьянков // Системы обработки информации. – 2007. – №7. – С. 10–12.

39. Яковлева, Е.С., Мезин, И.Ю., Касаткика, Е.Г., Куцепендик, В.И. Квалитметрическая оценка производственных процессов изготовления металлоизделий / Е.С. Яковлева, И.Ю. Мезин, Е.Г. Касаткика, В.И. Куцепендик // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2010. – №2. – С. 67–68.

40. Рублева, О.А. Квалитметрический подход к оценке качества шиповых соединений деревянных заготовок. / О.А. Рублева // Научный журнал Advanced science. – 2012. – № 1. – С. 32–46.

41. Шахова, К.И. Оценка качества сталей горного оборудования по составу и механическим свойствам. / К.И. Шахова // Горное оборудование и электромеханика. – 2008. – №3. – С. 23–26.

42. Королева, С.В. Практические аспекты использования функции желательности в медико-биологическом эксперименте [Электронный ресурс] / С.В. Королева // Современные проблемы науки и образования. – 2011. – № 6. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/100-5270.html>.

43. ГОСТ ISO 9001-2011 Системы менеджмента качества. Требования. – М.: Стандартинформ, 2012. – 36 с.

44. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15 288-2005 Информационная технология. Системная инженерия. Процессы жизненного цикла систем. – М.: Стандартинформ, 2006. – 57с.

45. ГОСТ Р ИСО/МЭК 31000 - 2010 Менеджмент риска. Принципы и руководство. – М.: Стандартинформ, 2012. – 26с.

46. Кане, М.М., Суслов, А.Г., Горленко, О.А. и др. Управление качеством продукции машиностроения: учебное пособие / М.М. Кане, А.Г. Суслов, О.А. Горленко, Б.В. Иванов, В.Н.

Корешков, А.И. Медведев, В.В. Мирошников; под общ. ред. М.М. Кане. – М.: Машиностроение, 2010. – 416 с.

47. Азгальдов, Г.Г., Костин, А.В., Садовов, В.В. Квалиметрия: первоначальные сведения. Справочное пособие с примером для АНО «Агентство стратегических инициатив по продвижению новых проектов»: учебное пособие / Г.Г. Азгальдов, А.В. Костин, В.В. Садовов. – М.: Высш. шк., 2010. – 143 с.

48. Аристов, О.В. Управление качеством: учебник. / О.В. Аристов. – М.: ИНФРА-М., 2009. – 239 с.

49. ГОСТ ISO 9000-2011 Межгосударственный стандарт. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. – М.: Стандартинформ, 2013. – 32 с.

50. Радкевич, Я.М. Метрология, стандартизация и сертификация: учебник для вузов / Я.М. Радкевич, А.Г. Схиртладзе, Б.И. Лактионов. – М.: Высш. шк., 2004. – 767 с.

51. Канне, М.М., Иванов, Б.В., Корешков, В.Н., Схиртладзе, А.Г. Системы, методы и инструменты менеджмента качества. / М.М. Канне, Б.В. Иванов, В.Н. Корешков, А.Г. Схиртладзе. – 2-е изд. – СПб.: Питер, 2012. – 576 с.

52. Биктимиров, Р.Л., Гречишников, В.А., Дырин, С.П., Гумеров, А.Ф. и др. Управление качеством, персоналом и логистика в машиностроении: учебное пособие / Р.Л. Биктимиров, В.А. Гречишников, С.П. Дырин, А.Ф. Гумеров и др. – 2-е изд. – СПб.: Питер, 2005. – 256 с.

53. Фатхутдинов, Р.А. Производственный менеджмент: учебник для вузов. – 6-е изд. – СПб.: Питер, 2008. – 496 с.

54. ГОСТ 15467-79 Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 22 с.

55. Мишин, В.М. Управление качеством: учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Менеджмент организации» (061100) / В.М. Мишин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2007. – 463 с.

56. Минько, Э.В., Минько А.Э., Смирнов В.П. Качество и конкурентоспособность продукции и процессов: учебное пособие / Э.В. Минько, А.Э. Минько, В.П. Смирнов. – СПб.: СПбГУАП, 2005. – 240 с.

57. Федюкин, В.К. Квалиметрия: учебное пособие / В.К. Федюкин. – СПб.: СПбГИЭУ, 2009. – 365 с.

58. РД 50-149-79 Методические указания по оценке технического уровня и качества промышленной продукции. – М.: Госстандарт, 1979. – 121 с.

59. ГОСТ 27.002-89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Госстандарт, 1990. – 24 с.

60. ГОСТ 14.205-83 Технологичность конструкции изделий. Термины и определения. – М.: Госстандарт, 1983. – 5 с.
61. Кремер, Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник для студентов вузов, обучающихся по экономическим специальностям / Н.Ш. Кремер. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2009. – 551 с.
62. Прохоров, Ю.К. Управление качеством: учебное пособие / Ю.К. Прохоров. – СПб.: СПбГУИТМО, 2007. – 144 с.
63. Иберла, К. Факторный анализ / К. Иберла. – пер. с нем. В. М. Ивановой. – М.: Статистика, 1980. – 398 с.
64. Atroshenko, S.A., Morozov, V.A., Griбанov, D.A., Lukin, A.A., Petrov, Y.V. Metallic Ring Fracture Induced by Magnetic Pulse Loading of Short Duration. / S.A. Atroshenko, V.A. Morozov, D.A. Griбанov, A.A. Lukin, Y.V. Petrov // 20th European Conference on Fracture (ECF20). Procedia Materials Science 3. – 2014. – pp. 906 – 911.
65. ГОСТ 9450-76. (СТ СЭВ 1195-78) Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. – М.: Издательство стандартов, 1993. – 35с.
66. ГОСТ 30456-97.Metalлопродукция. Прокат листовой и трубы стальные. Методы испытания на ударный изгиб. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 11с.
67. ГОСТ 21073.1-75 Металлы цветные. Определение величины зерна методом сравнения со шкалой микроструктур. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2009. – 25 с.
68. Морозов, В.А. Неравновесность и высокоскоростное деформирование и разрушение материалов при кратковременных импульсных нагружениях: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.02.04 / Морозов Виктор Александрович. – СПб, 2011 – 330 с.
69. Малинина, Р. И., Малютина, Е. С., Новиков, В. Ю. и др. Практическая металлография / Р.И. Малинина, Е.С. Малютина, В.Ю. Новиков и др. – М.: Интермет инжиниринг, 2002. – 233 с.
70. Лившиц, Б.Г. Металлография: [Учеб. для металлург. спец. вузов]. / Б.Г. Лившиц. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1990. – 333 с.
71. Варжапетян, А.Г. Квалиметрия : учеб. пособие / А.Г. Варжапетян. – СПб.: СПбГУАП, 2005. – 176 с.
72. Атрошенко, С.А. Усовершенствование высокохромистых штамповых сталей легированием / С.А. Атрошенко // Вестник инжэкона. Серия: технические науки. – 2005. – № 3. – С. 116–125.
73. Азгальгов, Г.Г. Теория и практика оценки качества товаров / Г.Г. Азгальгов. – М.: Экономика, 1982. – 345 с.

74. Лунькова, С.В., Матрохин, А.Ю. Измерение качества (квалиметрия) текстильных материалов и товаров: методические указания / С.В. Лунькова, А.Ю. Матрохин. – Иваново: ИГТА, 2004. – 41 с.
75. Рыбинцев, В.А., Горюнов, А.Н., Саламатова, Н.С. Теоретические аспекты оценки качества и конкурентоспособности товаров народного потребления / В.А. Рыбинцев, А.Н. Горюнов, Н.С. Саламатова // Культура народов Причерноморья. – 2005. – № 71. – С. 45–52.74.
76. Новик, Ф.С., Арсов, Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф.С. Новик, Я.Б. Арсов. – М.: Машиностроение, София, Техника, 1980. – 304 с.
77. Железнов, Г.С. Графическое представление уровня и индекса качества продукции / Г.С. Железнов. // Методы менеджмента качества. – 2002. – №12. – С. 26–27.
78. Аронов, И.З., Бурцев, С.Ю., Вахитов, С.Ю. Новый метод визуализации анализа качества и конкурентоспособности продукции / И.З. Аронов, С.Ю. Бурцев, С.Ю. Вахитов // Надежность и контроль качества. –1995. – №10. – С. 9–14.
79. Харченко, М.А. Корреляционный анализ: учебное пособие для вузов / М.А. Харченко. – Воронеж: Изд-во Воронежского государственного университета, 2008. – 31 с.
80. Варжапетян, А.Г. Современные инструменты менеджмента качества: робастное проектирование. Ч. 1: учебное пособие / А. Г.Варжапетян. – СПб.: СПбГУАП, 2008. – 172 с.
81. Громыко, Г.Л. Теория статистики: учебник / под ред. проф. Г.Л. Громыко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ИНФРА-М, 2005. – 476 с.
82. СНИП 2.05.06-85 Магистральные трубопроводы. – М.: ФГУП ЦПП, 2005. – 60 с.
83. Zhang, H, Ravi-Chandar, K On the dynamics of necking and fragmentation: IV. Expansion of Al 6061-O tubes / H. Zhang, K. Ravi-Chandar // International Journal of Fracture. – 2010. – №163. – P. 41–65.
84. Атрошенко С.А., Грибанов Д.А. Оценка структуры и свойств алюминиевых кольцевых образцов, подвергнутых ударно-волновому нагружению, дифференциальным методом / С.А. Атрошенко, Д.А. Грибанов // Качество в производственных и социально-экономических системах: материалы Международной научно-технической конференции / ред. кол.: Е.В. Павлов (отв. ред.) [и др.]; Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2013. – С. 14 - 18.
85. Атрошенко С.А., Грибанов Д.А. Квалиметрическая оценка сопротивления хрупкому разрушению динамически нагруженных алюминиевых кольцевых образцов / С.А. Атрошенко, Д.А. Грибанов // «Вестник ИНЖЭКОНА», серия «Технические науки». – 2013. – №8. – С. 88 – 90.

86. Атрошенко С.А., Грибанов Д.А. Оценка качества металлических колец при ударном воздействии магнитно-импульсным методом / С.А. Атрошенко, Д.А. Грибанов // Четвертый научный конгресс студентов и аспирантов ИНЖЭКОН-2011 20, 21 апр. 2011 г. Науч.-практ. конф. факультета экономики и управления в машиностроении: тез. докл. – СПб.: СПбГИЭУ, 2011. – С. 8.

87. Атрошенко С.А., Грибанов Д.А. Оценка качества металлических колец при ударном воздействии инновационным магнитно-импульсным методом / С.А. Атрошенко, Д.А. Грибанов // Век инноваций. XI Симпозиум научной молодежи Санкт-Петербурга: тезисы докладов 23-25 ноября 2011 г. – СПб.: СПбГИЭУ, 2012. – С. 101 – 102.

88. Атрошенко С.А., Грибанов Д.А. Квалиметрическая оценка сопротивления разрушению металлов при ударном нагружении / С.А. Атрошенко, Д.А. Грибанов // XX Петербургские чтения по проблемам прочности. Санкт-Петербург, 10-12 апреля 2012г.: сборник материалов. – Ч. 2. – СПб.: Соло, 2012. – С. 134 – 136.

89. Атрошенко С.А., Грибанов Д.А. Квалиметрическая оценка сопротивления разрушению металлических изделий при ударном нагружении / С.А. Атрошенко, Д.А. Грибанов // Качество. Инновации. Образование. – 2012. – №4. – С. 78 – 85.

90. Атрошенко С.А., Грибанов Д.А. Оценка качества металлических колец при ударном воздействии магнитно-импульсным методом / С.А. Атрошенко, Д.А. Грибанов // Методы менеджмента качества. – 2012. – №3. – С. 56–59.

91. Атрошенко С.А., Грибанов Д.А. Оценка сопротивления разрушению конструкций при ударном нагружении квалиметрическими методами / С.А. Атрошенко, Д.А. Грибанов // Конференция-семинар «Актуальные направления в механике сплошных сред» – СПб: Соло, 2012. – С. 8 - 9.

92. Атрошенко С.А., Грибанов Д.А. Квалиметрическая оценка механических характеристик кольцевых образцов, полученных при высокоскоростных испытаниях на растяжение / С.А. Атрошенко, Д.А. Грибанов // Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития 2012». – Выпуск 3. Том 7. – Одесса: КУПРИЕНКО, 2012. – С. 3 – 6.

93. Атрошенко С.А., Грибанов Д.А. Квалиметрическая оценка экспериментальных данных о прочности динамически нагруженных кольцевых образцов / С.А. Атрошенко, Д.А. Грибанов // 53 Международная конференция «Актуальные проблемы прочности». 2-5 октября 2012 года. Витебск, Беларусь: сборник материалов. Ч1. / УО «ВГТУ». – Витебск, 2012. – С. 93 – 95.

94. Атрошенко С.А., Грибанов Д.А. Оценка сопротивления разрушению металлических изделий при ударном нагружении с помощью секторных диаграмм / С.А. Атрошенко, Д.А. Грибанов // Пятый научный конгресс студентов и аспирантов ИНЖЭКОН-2012 25, 26 апр. 2012 г. Науч.-практ. конф. факультета экономики и управления в машиностроении: тез. докл. – СПб.: СПбГИЭУ, 2012. – С. 7.

95. Атрошенко С.А., Грибанов Д.А. Квалиметрическая оценка механических характеристик кольцевых образцов, полученных при растяжении магнитно-импульсным методом / С.А. Атрошенко, Д.А. Грибанов // Вестник Тамбовского университета. – 2013. – №4. – С. 1757- 1758.

96. Атрошенко С.А., Грибанов Д.А. Квалиметрическая оценка сопротивления разрушению алюминиевых кольцевых образцов после высокоскоростного ударного нагружения / С.А. Атрошенко, Д.А. Грибанов // Взрыв в физическом эксперименте. Тезисы докладов Всероссийской конференции 16-20 сентября 2013г. Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск. – Новосибирск, 2013. – С. 200-202.

97. Атрошенко С.А., Грибанов Д.А. Планирование эксперимента по динамическому нагружению алюминиевых колец магнитно-импульсным методом / С.А. Атрошенко, Д.А. Грибанов // XXI Петербургские чтения по проблемам прочности. К 100-летию со дня рождения Л.М. Качанова и Ю.Н. Работнова. Санкт-Петербург, 15-17 апреля 2014 г.: сборник материалов. – СПб.: Соло, 2014. – С. 103 - 106.

98. Атрошенко С.А., Грибанов Д.А. Квалиметрическая оценка структуры и свойств, алюминиевых кольцевых образцов после ударно-волнового нагружения / С.А. Атрошенко, Д.А. Грибанов // Перспективное развитие науки, техники и технологий [Текст]: материалы 3-й Международной научно-практической конференции (18 октября 2013 года)/ редкол.: Горохов А.А. (отв. Ред.); Юго-Зап. гос. ун-т. В 3 томах, Том 1. – Курск, 2013. – С. 151- 155.

99. Атрошенко С.А., Грибанов Д.А. Анализ качественных характеристик сопротивления динамическому нагружению кольцевых образцов / С.А. Атрошенко, Д.А. Грибанов // Проблемы обеспечения взрывобезопасности и противодействия терроризму: Труды Восьмой Всероссийской научно-практической конференции (апрель 2013 г., Санкт- Петербург). – СПб.: Любавич. – С. 185- 196.

100. Атрошенко С.А., Грибанов Д.А. Корреляционно-регрессионный анализ характеристик алюминиевых кольцевых образцов после динамического нагружения / С.А. Атрошенко, Д.А. Грибанов // Современные инновации в науке и технике [Текст]: Сборник научных трудов 4-ой Международной научно-практической конференции (17 апреля 2014 года)/ редкол.: Горохов А.А. (отв. Ред.); В 4-х томах, Том 1., Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2014. – С. 86 - 91.

101. Ефимова М.Р., Петрова Е.В., Румянцев В.Н. Общая теория статистики: Учебник / М.Р. Ефимова, Е.В. Петрова, В.Н. Румянцев. - 2-е изд., испр. и доп. - (Высшее образование). – М.: ИНФРА-М, 2009. – 416 с.
102. Атрошенко С.А., Грибанов Д.А. Квалиметрическая оценка влияния масштабного фактора на механические характеристики металлов при магнитно-импульсном нагружении. / С.А. Атрошенко, Д.А. Грибанов // Национальные концепции качества: обеспечение устойчивого развития экономики: сборник материалов международной научно-практической конференции 29 сентября-5 октября 2014г./ под ред. проф. Е.А. Горбашко. – СПб.: Изд-во Культ-информ-пресс, 2014. – С. 41 – 44.
103. Morozov V.A., Petrov Y.V., Lukin A.A., Kats V.M., Atroshenko S.A., Fedorovskii G.D., Griбанov D.A., Zaichenko O.K. Fracture of Metallic Ring Samples under static and dynamic loading / V.A. Morozov, Y.V. Petrov, A.A. Lukin, V.M. Kats, S.A. Atroshenko, G.D. Fedorovskii, D.A. Griбанov, O.K. Zaichenko // Proceedings of 13th International Conference on Fracture (ICF13) Beijing, China. – 2013. – pp. 1550-1557.
104. Атрошенко С.А., Грибанов Д.А. Влияние масштабного фактора на механические характеристики металлов при магнитно-импульсном нагружении / С.А. Атрошенко, Д.А. Грибанов // Проблемы обеспечения взрывобезопасности и противодействия терроризму: Труды Девятой Всероссийской научно-практической конференции (апрель 2014 г., Санкт-Петербург). - СПб.: Любавич, 2014. – С. 127- 138.
105. ГОСТ18482-79 Трубы прессованные из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2008. – 16 с.
106. ОСТ192096-83 Трубы бесшовные холоднодеформированные из алюминиевых сплавов. Технические условия. – М.: Издательство стандартов, 1984. – 23 с.
107. ГОСТ 23697-79 Трубы сварные прямошовные из алюминиевых сплавов. Технические условия. – М.: Издательство стандартов, 1991. – 13 с.
108. ГОСТ 31447-2012 Трубы стальные сварные для магистральных газопроводов, нефтепроводов и нефтепродуктопроводов. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2013. – 72 с.
109. Федоров, А.В. Совершенствование управления качеством технического обслуживания и ремонта технологического оборудования на основе процессного подхода: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.23 / Федоров Алексей Валентинович. – М., 2004. – 128 с.
110. ГОСТ Р 1.5-2002. Стандарты. Общие требования к построению, изложению, оформлению и обозначению. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 100 с.

111. Голубев Б.В., Кобылянский И.Г., Шутов А.В., Долматова Е.В. Теплотехнические процессы при внедрении нового способа температурных испытаний и испытаний на оттаивание шкафов-витрин в магазинах, кулинарных магазинах, ресторанах, кафе и столовых / Б.В. Голубев, И.Г. Кобылянский, А.В. Шутов, Е.В. Долматова // Вестник МГТУ. – 2007. – №4. – С. 577-580.

1 Цель

В разделе кратко формулируется цель деятельности, описываемой в данной ДП (РИ).

2 Область применения

В разделе указывается перечень подразделений, участвующих в деятельности, описываемой данной ДП (РИ).

3 Термины и определения

В разделе приводятся специфические термины, не включённые в МС ГОСТ ISO 9001-2011, ГОСТ ISO 9000-2011, применяемые в ДП (РИ).

4 Описание

В разделе описывается последовательность выполнения работ, процессов, действий, относящихся к данной ДП (РИ). Для описания взаимодействий между процессами и условий их выполнения рекомендуется использовать графическое представление процедуры. При этом используются символные обозначения. Если составлено графическое описание процедуры, то ссылки на нее делаются в следующей редакции:

«Графическое описание процедуры (инструкции) представлено в Приложении № (указывается порядковый номер) к данной ДП (РИ).

Пояснения к графическому описанию ДП (РИ):

10 – ...»

При словесном описании процедуры (инструкции) даются пояснения к процессам, указанным на графической схеме под соответствующими номерами (10, 20, 30 ...).

В разделе возможно использование подзаголовков:

4.1

4.2

4.3

и т.д.

5 Ответственность и полномочия

В разделе 5 определяют подразделения и должностных лиц, ответственных за выполнение работ, описываемых в разделе 4.

Раздел оформляют в виде таблицы 1: «Матрица ответственности». При этом первую фразу раздела предлагается приводить в следующей редакции:

«Распределение ответственности и полномочий подразделений и должностных лиц предприятия при выполнении работ и мероприятий по виду деятельности данной ДП (РИ) приведено в матрице ответственности».

Таблица 1 - Матрица ответственности

| Наименование работ, мероприятий | Подразделение, должностное лицо | | | | |
|---------------------------------|---------------------------------|-------------|---------------|-------------|---------------------|
| | Ответственный | Реализующий | Соисполнитель | Согласующий | Информирующий (емь) |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

Примечание: допускается информацию об ответственности приводить в правом нижнем углу элемента графического описания процесса «Работа» (см. Приложение Б).

| | | | | |
|----|-----|---|---|----|
| УК | СлК | - | - | ГМ |
|----|-----|---|---|----|

– в правом нижнем углу проставляются обозначения ответственных лиц или подразделений по представленной схеме (СлК - служба качества, УК - уполномоченный по качеству, ГМ - главный метролог).



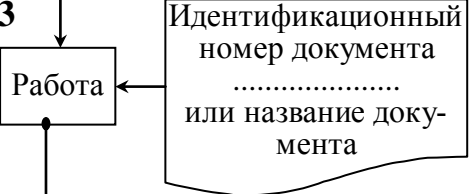
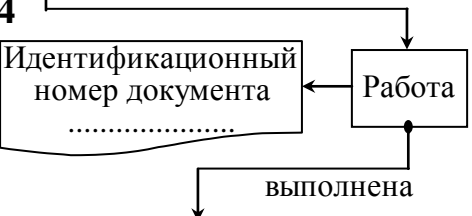
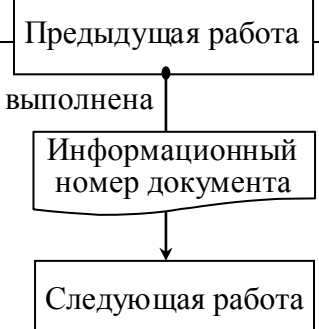

6 Документы

Приводятся ссылки на документы, которые используются при выполнении работ и процессов по данной ДП (РИ).

7 Приложения

По необходимости, в разделе приводят перечень приложений, разработанных для данной процедуры (инструкции), в следующем виде:

Приложение А – «Наименование Приложения».

| Элемент графического описания | Пояснения |
|---|---|
| <p>1</p>  | <p>Элемент «Стрелка»: обозначает направление процесса при смене работ или этапов деятельности</p> |
| <p>2</p>  | <p>Элемент «Работа» Внутри элемента указывается:</p> <ul style="list-style-type: none"> • название работы или этапа деятельности; • ответственный за выполнение работы; • при наличии внутри элемента места может быть сделана ссылка на документ, которым руководствуются при выполнении данной работы. <p>Точки C1, C2, ... – обозначение результатов работы Например: C1 – «Результат удовлетворительный»; C2 – «Обнаружено несоответствие»</p> |
| <p>3</p>  | <p>Ссылка на документы (или перечень документов), которыми руководствуются при выполнении данной работы. Это могут быть элементы Руководства по качеству (РК), документированные процедуры (ДП), рабочие инструкции (РИ), формуляры (Ф), стандарты предприятия (СТП), КД, ТД, ТУ и другая НД</p> |
| <p>4</p>  | <p>Ссылка на документы, которые создаются или заполняются при выполнении данной работы. Это могут быть формы, бланки, журналы, отчеты о несоответствии, протоколы, акты о браке и т. д.</p> |
| <p>5</p>  | <p>Документ, созданный или заполненный в результате выполнения предыдущей работы и инициирующий следующую работу</p> |
| <p>6</p>  | <p>Обозначение соединений в схеме</p> |

Процесс принятия решения об использовании инструмента качества



