

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»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2015

Работа выполнена на кафедре экономики и управления качеством Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный экономический университет».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Атрошенко Светлана Алексеевна

Официальные оппоненты: **Тисенко Виктор Николаевич**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Управления проектами» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого»

Оленин Михаил Иванович
кандидат технических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно - исследовательский институт конструкционных материалов Прометей»


Ведущая организация: **ЗАО «Научно-производственное объединение специальных материалов»**,
195253, г. Санкт-Петербург, Б. Сампсониевский пр., 28а,
тел.: +7(812)600-7554, факс: (812) 542-7558,
e-mail: commerce@npo-sm.ru

Защита состоится 24 июня 2015 года в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.233.04 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67.

С авторефератом и текстом диссертации можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67 и на сайте университета <http://guar.ru/dissov>.

Автореферат разослан «18» мая 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.233.04,
кандидат технических наук, доцент



Фролова Е.А.

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. № 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 коротком 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.

Степень разработанности проблемы. 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 технико-экономическое обоснование для апробации и внедрения стандарта организации «Методика

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

- создана 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».

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 квалиметрической 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 квалиметрические показатели сопротивления разрушению металлических материалов, уточнена номенклатура критериев оценки квалиметрических показателей сопротивления разрушению металлических материалов, исследованы и уточнены возможности современных квалиметрических инструментов качества, модифицирован расчет комплексного показателя желательности, разработана методика квалиметрической оценки сопротивления разрушению металлических материалов эксплуатируемых при ударном воздействии. Сформулированы конкретные предложения по совершенствованию стандартизации в области использования инструментов качества для квалиметрической 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, квалиметрические 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 студентов 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, 2013 г.; 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.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи, объект и предмет исследования, научная новизна, практическая и теоретическая значимости, выдвинуты основные положения, выносимые на защиту, сведения об апробации и внедрении результатов работы.

В **Первой главе** проведен анализ современных подходов к оценке и измерению качества металлических материалов, испытанных магнитно-импульсным методом. Рассмотрены стандарты ГОСТ ISO 9001-2011, ГОСТ Р ИСО/МЭК 31000-2010, ГОСТ Р ИСО/МЭК 15288-2005 в части, касающейся общего подхода к управлению качеством, технологии оценки, достаточности и объективности оценки. В ряде известных государственных стандартов установлены характеристики и значения технических требований к аппаратуре в условиях ударного воздействия, однако не имеется нормативной базы, которая описывает требования к аппаратуре в условиях ударного воздействия с длительностью импульса T микросекундного диапазона. Выявлено отсутствие стандартов как национальных, так и международных, регламентов, методических рекомендаций и апробированных методик по оценке сопротивления разрушению металлических материалов, испытанных магнитно-импульсным методом в области короткого времени нагружения ($T = 1$ мкс). На основании проведенного анализа сделан вывод о необходимости: применения инструментов оценки качества, разработки методики квалиметрической оценки сопротивления разрушению металлических материалов, испытанных магнитно-импульсным методом в области короткого времени нагружения ($T = 1$ мкс), составления рабочей инструкции и документированной процедуры позволяющих определить и описать единый порядок действий при внедрении и использовании инструментов качества для анализа и контроля качества продукции и процессов в системе менеджмента качества предприятия.

Во **второй главе** рассмотрены и адаптированы современные квалиметрические инструменты качества: диаграмма Исикавы, диаграмма Парето, диаграмма сравнения показателей качества, функция желательности, планирование эксперимента, секторные диаграммы, горизонтальные гистограммы, корреляционный анализ по диаграмме разброса, регрессионный анализ, применительно к задаче оценки сопротивления разрушению металлических материалов, используемых в конструкциях изделий эксплуатируемых в условиях возникновения ударного воздействия. Для рассматриваемых материалов, на основе анализа диаграммы Парето **уточнены основные показатели качества: твердость, растягивающее напряжение, количество вязкой составляющей в изломе, время до разрушения, размер зерна, количество пор.**

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. На основе разработанной рабочей инструкции **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. Документированная процедура может применяться во всех подразделениях предприятия, где вводятся инструменты качества, анализа и контроля качества продукции и процессов. Схема документированной процедуры приведена на рисунке 1.

В соответствии с предложенной документированной процедурой **разработана методика проведения квалиметрической оценки сопротивления разрушению металлических материалов, испытанных магнитно-импульсным методом.** Разработанная методика реализована трехуровневым алгоритмом проведения оценки сопротивления разрушению металлических материалов с применением процессного подхода (рисунок 2). 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;



Рисунок 1 - Процесс принятия решения об использовании инструмента качества

в) формирование совокупности показателей качества, по которым будет произведена квалиметрическая оценка (твердость, 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. 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);

Процесс II. Определение квалиметрических инструментов оценки (ВХ – в зависимости от цели оценки качества изделий предложены следующие основные инструменты квалиметрической оценки – функция желательности, планирование эксперимента, диаграмма сравнения показателей качества, причинно-следственная диаграмма Исикавы, диаграмма Парето.

В случае необходимости проведения более детальной оценки, предложены дополнительные инструменты оценки с учетом весовых коэффициентов – секторные диаграммы, горизонтальные гистограммы, а также дополнительные инструменты детальной оценки с учетом связей свойств металлических материалов – корреляционный анализ по диаграмме разброса и регрессионный анализ, В – инструмент квалиметрической оценки);

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

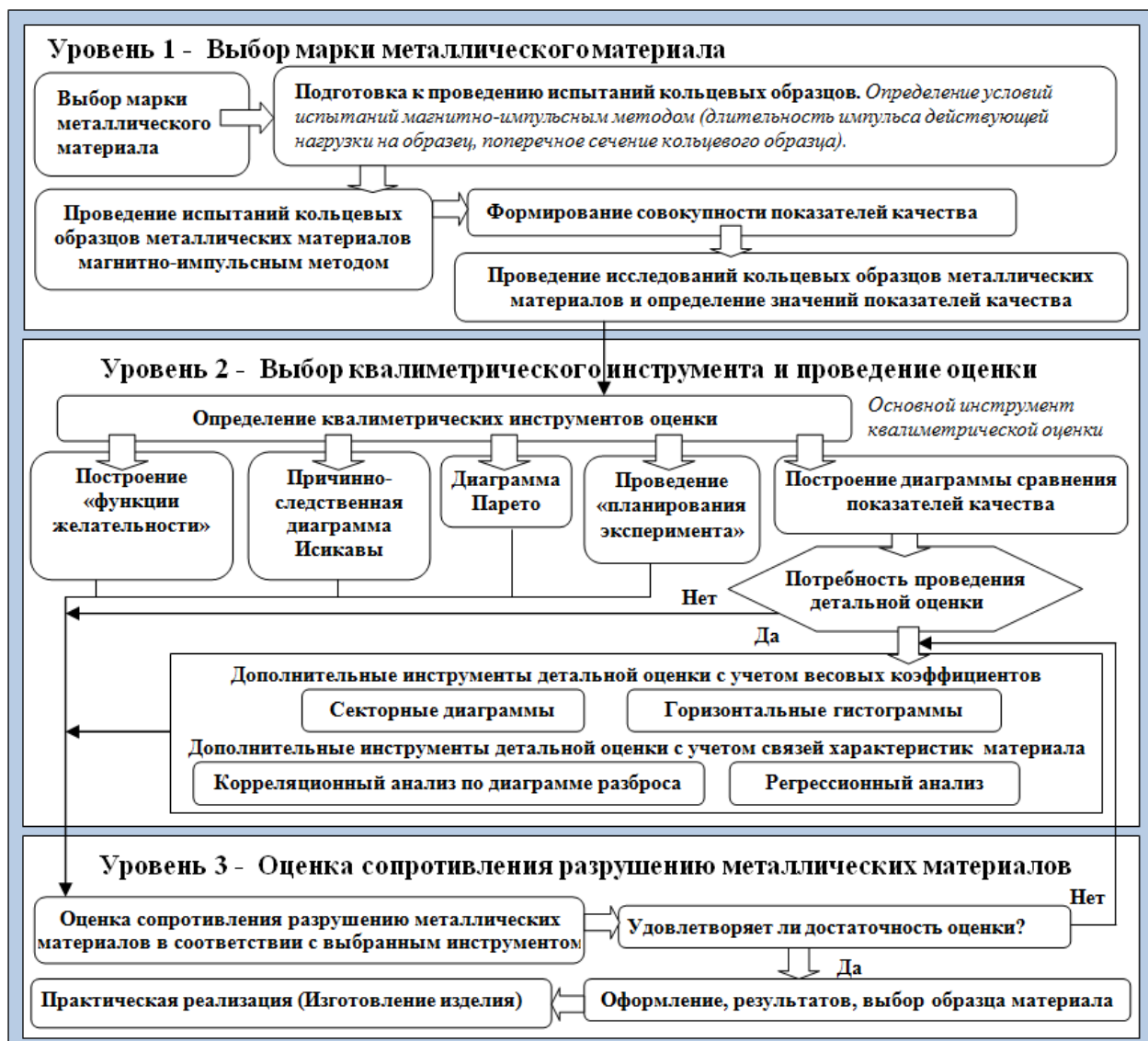


Рисунок 2 – Методика проведения квалиметрической оценки сопротивления разрушению металлических материалов, испытанных магнитно-импульсным методом

Приведено описание результатов экспериментальных исследований алюминиевых кольцевых образцов, испытанных магнитно-импульсным методом, характеристики сопротивления разрушению которых приведены в таблице 1. В зависимости от длительности импульса действующего на образец, определено растягивающее напряжение, выдерживаемое образцом перед разрушением, размер зерна, твердость по Виккерсу, количество вязкой составляющей в изломе, количество пор, время до разрушения.

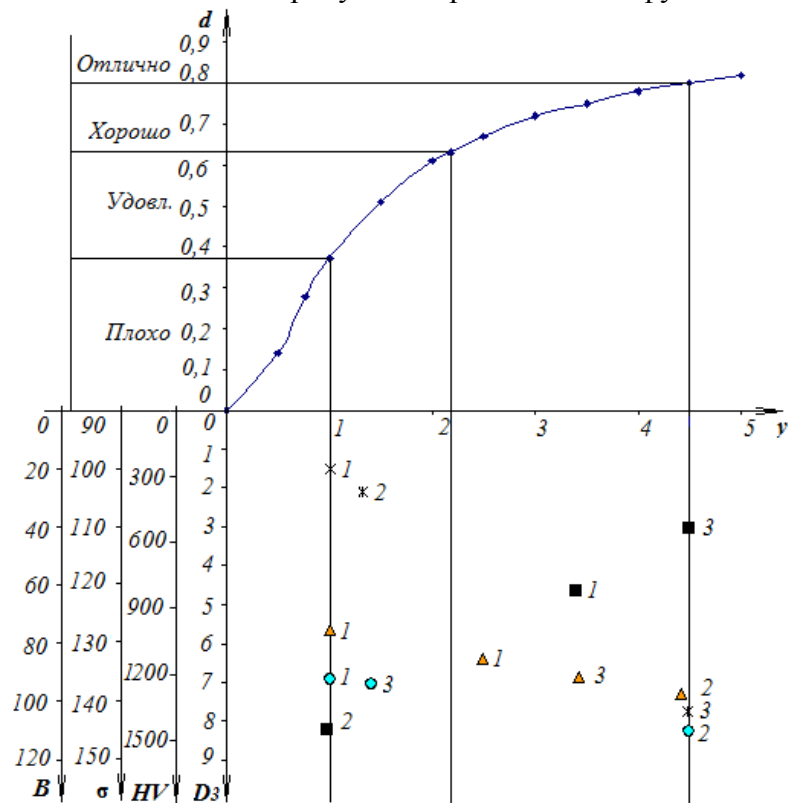
Приведено оборудование, приборы, инструменты, нормативно-технические документы для обработки результатов исследований металлических материалов, испытанных магнитно-импульсным методом.

В третьей главе диссертационной работы осуществлено практическое применение разработанной методики квалиметрической оценки сопротивления разрушению металлических материалов, испытанных магнитно-импульсным методом. Для алюминиевых кольцевых образцов, испытанных при различных режимах высокоскоростного нагружения магнитно-импульсным методом, проведен анализ сопротивления разрушению с помощью основных квалиметрических инструментов качества.

Таблица 1 – Характеристики сопротивления разрушению исследованных образцов из алюминия

№ п/п	Наименование показателя качества	Базовые значения №1	Значение показателя качества образца								
			№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8	№9	
		при испытании с длительностью импульса T , мкс:									
		38	7,5	5,5	7,5	1	1	1	0,1	0,08	
1.	Размер зерна D_z , мкм	4,6	8,2	0,45	1,2	3	1,2	1,95	0,72	1,05	
2.	Количество пор на площади 400 мкм^2 n , шт	53	91	64	121	70	-	-	56	36	
3.	Твердость по Виккерсу HV , МПа	1175	1461	992	1098	1202	288,9	240,6	2745	303,3	
4.	Растягивающее напряжение σ , МПа	100	104	150	-	230	162	-	-	-	
5.	Количество вязкой составляющей в изломе B , %	80	98,2	92,3	96,5	91,5	91,1	88	92,62		
6.	Время до разрушения t , мкс	13,4	13,4	4,5	13,4	2,65	4,17	-	0,3	-	

1. **Функция желательности.** На рисунке 3 представлена «функция желательности».



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

Рисунок 3 – Обобщенная функция желательности Харрингтона

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

- наилучшим сочетанием характеристик обладает образец, испытанный по режиму №3;
- при существенно более коротком импульсе ударного воздействия (режим №3) значение обобщенной функции желательности имеет максимальное значение 0,65, 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».

Для увеличения объективности и полноты оценки металлических материалов модифицирована формула расчета комплексного показателя желательности Харрингтона (1) путем введения коэффициента экономического эффекта.

$$D = K_э \cdot m \sqrt[m]{\prod_{i=1}^m d_i} \quad (1)$$

где m – число частных желательностей;

d_i – показатель частной желательности;

$K_э$ – коэффициент экономического эффекта от оцениваемого материала.

Предложенная модификация комплексного показателя желательности отражает один из важнейших аспектов развития квалиметрии, а именно оптимизация процесса определения качества продукции. Это позволило дать комплексную оценку исследуемым материалам с учетом экономической целесообразности изменяемых свойств материала.

2. Диаграмма сравнения показателей качества. На рисунке 4 представлена диаграмма сравнения показателей качества.



Рисунок 4 – Диаграмма сравнения показателей качества

При анализе диаграммы сравнения показателей качества и на основе итоговых значений уровня качества (Y_k) для алюминиевых образцов, испытанных по разным технологическим 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 $Y_{к3} = 4,07$, по сравнению с $Y_{к2} = 1,01$, $Y_{к4} = 1,99$, $Y_{к5} = 1,23$ и что указывает на преимущество использования этого режима для проведения испытаний кольцевых материалов.

3. Планирование эксперимента. При планировании 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 2. Таблица 2 – Исходные данные для планирования эксперимента

№ 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

Рассчитаны коэффициенты регрессии функции отклика (2).

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_j y_u}{N}, \quad (2)$$

где y_u – параметр состояния в u -том опыте;

N – общее число опытов.

В таблице 3 приведены значения факторов оптимизации для проведенных экспериментов.

Таблица 3 – 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 4 приведена матрица планирования экспериментов.

Таблица 4 – Матрица планирования экспериментов

Номер опыта	Факторы (x_j)			Время до разрушения t , мкс
	x_0	x_1	x_2	y
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

Уравнение регрессии, имеет следующий вид: $y = 8,405 + 4,995x_1 + 3,619x_2$

Установлено, что 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

4. Секторные диаграммы. На рисунке 5 представлены секторные диаграммы.

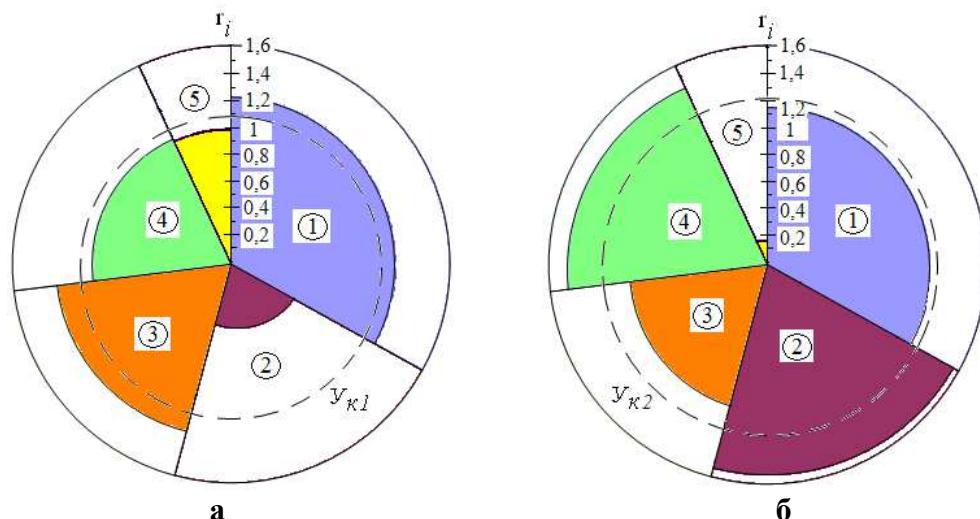


Рисунок 5 – Секторные диаграммы уровня качества: а - образец № 1; б- образец №2

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. Учитывая коэффициенты весомости, расчёты показали, что уровень качества образца №2 в 1,1 раза больше уровня качества образца № 1.

5. Горизонтальная гистограмма. На основе построенной горизонтальной гистограммы можно сделать вывод, что режим испытания № 3 предпочтительнее режима №2 по таким показателям, как длительность импульса $T = 1$ мкс, растягивающее напряжение $\sigma = 142$ МПа, количество пор на площади $400 \text{ мкм}^2 n = 70$ шт, несмотря на проигрыш по количеству вязкой составляющей в изломе $B = 91,5 \%$ и времени до разрушения $t = 2,6$ с. 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 $Y_{к2} = 0,94$.

6. Корреляционный анализ по диаграмме разброса. На основе построенных диаграмм разброса, рассчитанных значений коэффициентов корреляции для исследуемых пар данных (Таблица 5), можно сделать следующие выводы:

– Самое большое значение коэффициента корреляции $r^I = 0,933$ имеет коррелируемая пара «время до разрушения, t - площадь поперечного сечения, S », (Рисунок 6). С увеличением показателя «площадь поперечного сечения, S » увеличивается показатель «время до разрушения, t ».

– Для коррелируемой пары признаков «количество вязкой составляющей в изломе, B - площадь поперечного сечения, S » (Рисунок 7) значение коэффициента корреляции $r^I = 0,891$ показывает высокую степень взаимосвязи.

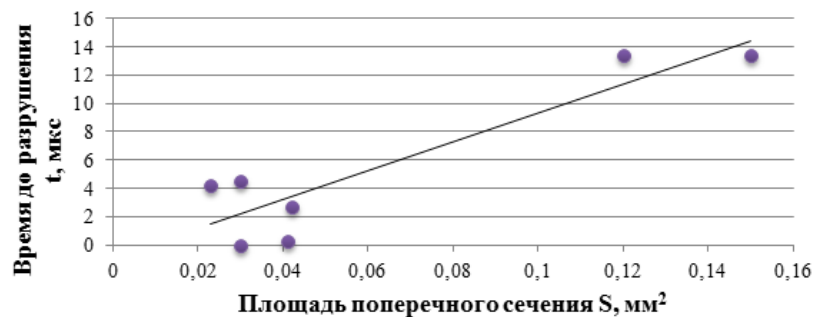


Рисунок 6 – Диаграмма разброса: время до разрушения t , мкс - площадь поперечного сечения S , мм^2

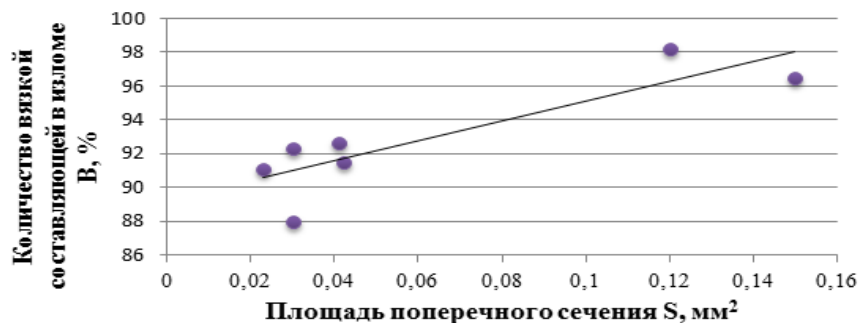


Рисунок 7 – Диаграмма разброса: количество вязкой составляющей в изломе B , % - площадь поперечного сечения S , мм^2

7. Регрессионный анализ. Для исследования формы связи пар данных на диаграммах разброса, проведен регрессионный анализ. Для этого по статистическим данным получены уравнения зависимостей (линейная, логарифмическая, полиномиальная, степенная, экспоненциальная), построены линии тренда и рассчитаны коэффициенты детерминации с использова-

нием программы Microsoft Excel.

В таблицу 5 занесены уравнения полиномиальных моделей регрессии, которые наилучшим образом описывают зависимость пар данных, а коэффициенты детерминации принимают наибольшие значения.

Таблица 5 – 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
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

Для измерения тесноты связи при криволинейной зависимости между результативным и факторным признаком определено теоретическое корреляционное отношение (индекс корреляции), $\eta_{теор}$. Полученные теоретические корреляционные отношения $\eta_{теор}$ (Таблица 5) характеризуют очень тесную зависимость между коррелируемыми величинами.

Качество составленных уравнений регрессии оценено с помощью величины достоверности аппроксимации (коэффициента детерминации, R^2).

После нахождения по эмпирическим данным параметров уравнения регрессии осуществлена проверка значимости уравнения регрессии (проверка адекватности модели) путем расчета F-критерия Фишера и сопоставления его с табличным (критическим). Расчётные F-критерии приведены в таблице 5 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 «время до разрушения, t - площадь поперечного сечения, S » наблюдается сильная зависимость, $\eta_{теор} = 0,9$. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,839$, значение которого 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).

На основе **разработанного методического, технологического, инструментального обеспечения и технико-экономического обоснования созданы предпосылки для апробации и внедрения стандарта организации «Методика квалиметрической оценки сопротивления разрушению металлических материалов, испытанных магнитно-импульсным методом».**

III. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

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 квалиметрической оценки. Предлагаемый способ исследования материалов путем испытания кольцевых образцов на магнитно-импульсной установке в комплексе с инструментами квалиметри-

ческой оценки будет экономичнее стендовых испытаний деталей и дает положительный экономический эффект. В результате проведенных исследований получены следующие результаты:

1. Определены основные квалиметрические 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 квалиметрические инструменты качества адаптированы к задаче оценивания сопротивления разрушению металлических материалов, эксплуатация которых предполагается 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 квалиметрической 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 квалиметрической оценки сопротивления разрушению металлических материалов, испытанных магнитно-импульсным методом».

IV. СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Список работ, опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Грибанов, Д.А. Особенности процессного подхода при оценке качества металлических материалов / Д.А. Грибанов // Перспективы науки. – 2015. – №3. – С.62–68.

2. Грибанов, Д.А. Совершенствование комплексной оценки качества металлических материалов после высокоскоростного нагружения / Д.А. Грибанов // Наука и бизнес: пути развития. – 2015. – №4. – С.36–46.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

Список остальных работ, опубликованных по теме диссертации:

1. 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.

2. 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.

3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Griбанov, D.A. 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.
9. 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.
10. Griбанov, D.A. 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.
11. 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.