

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное образовательное
учреждение высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

На правах рукописи

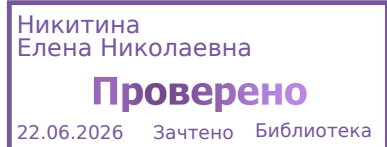
Журавлев Юрий Владимирович

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ОБСЛЕДОВАНИИ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ**

Направление 08.04.01 – «Строительство»

**АВТОРЕФЕРАТ
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ**

2026



Работа выполнена ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

Научный руководитель: Сысоев Олег Евгеньевич
доктор технических наук, профессор

Рецензент: Головки Александр Владимирович
доцент кафедры "Строительные конструкции, здания и сооружения" Дальневосточного государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.

Защита состоится «18» июня 2026г. в ____ часов ____ мин. на заседании государственной аттестационной комиссии по направлению подготовки 08.04.01 «Строительство» в Комсомольском-на-Амуре государственном университете по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ФГБОУ ВО «КНАГУ» ауд. _____.

Автореферат разослан ____ июня 2026 г.

Секретарь ГЭК

И.В. Погорельских

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования.

Промышленный комплекс Российской Федерации в значительной степени базируется на инфраструктуре, введённой в эксплуатацию 40–50 лет назад. По экспертным оценкам, свыше 60% основных производственных фондов в отраслях тяжелой индустрии, энергетики и нефтегазового комплекса в настоящее время эксплуатируются за пределами нормативного срока службы. Эта ситуация усугубляется постоянным ростом нагрузок, модернизацией технологических линий, а также естественным старением материалов. В этих условиях обеспечение надёжности и безопасной эксплуатации несущих металлоконструкций переходит из разряда планово-профилактических мероприятий в категорию критически важных задач промышленной безопасности.

Статистические данные свидетельствуют, что подавляющее большинство (по различным данным, до 80%) внезапных отказов и катастрофических разрушений стальных конструкций – обрушений крановых эстакад, прорывов магистральных трубопроводов, разрушений резервуаров и каркасов зданий – прямо или косвенно связано с дефектами в сварных швах. Сварные соединения, являясь зонами неизбежной структурной неоднородности и концентрации механических напряжений, закономерно становятся наиболее уязвимыми элементами любой конструкции. Последствия таких инцидентов носят системный характер: это не только прямые человеческие жертвы, но и масштабный экологический ущерб, и колоссальные экономические потери, связанные с остановкой производства. Как показано в работе, своевременное выявление усталостной трещины глубиной 8 мм позволяет предотвратить аварию с ущербом более 13 млн рублей только на одном объекте.

Современная индустрия располагает широким спектром высокотехнологичных методов неразрушающего контроля (НК) – визуально-измерительного, ультразвукового, радиографического, капиллярного, магнитопорошкового и др. Физические основы, аппаратное обеспечение и мето-

дики применения каждого из этих методов в отдельности достаточно глубоко проработаны и регламентированы национальными и международными стандартами.

Однако анализ реальной практики обследования действующих промышленных объектов выявляет существенный методический разрыв. Существующие нормативные документы (ГОСТ 3242-79, СП 16.13330.2017, типовые программы контроля) задают общие, часто избыточно консервативные требования, ориентированные на фиксированный процент длины швов (например, 10%, 20%, 50%) без учёта специфики конкретной конструкции, её реальной истории нагружения и агрессивности среды. На практике это приводит к тому, что ресурсы расходуются неоптимально: либо на избыточный контроль низкорисковых зон, либо – что гораздо опаснее – на недостаточную проверку критических узлов, где вероятность возникновения дефектов максимальна.

Таким образом, проблема заключается не в отсутствии самих методов контроля, а в дефиците научно обоснованных, адаптивных алгоритмов их обоснованного выбора и комплексного применения для решения конкретных диагностических задач с максимальной эффективностью и экономичностью.

В связи с изложенным, актуальность темы определяется необходимостью разработки риск-ориентированной методики формирования программы неразрушающего контроля сварных соединений, учитывающей тип конструкции, эксплуатационную историю, вероятные механизмы дефектообразования и позволяющей целенаправленно выявлять наиболее опасные повреждения при минимальных затратах. Такая методика востребована при техническом диагностировании стареющих объектов промышленности и является важным инструментом повышения уровня промышленной безопасности.

Целью диссертационной работы является разработка методики формирования программы контроля сварных соединений металлоконструкций.

Задачи исследования:

- провести комплексный анализ существующих методов неразрушающего контроля сварных соединений, систематизировав их по ключевым диагностическим и эксплуатационным критериям.

- исследовать закономерности возникновения и развития дефектов в сварных швах в процессе эксплуатации и разработать их классификацию, ориентированную на задачи диагностики.

- выполнить критический анализ действующей нормативно-технической базы в части контроля при обследовании и выявить области, требующие оптимизации.

- на основе установленных взаимосвязей разработать матрицу выбора оптимальных методов контроля в зависимости от типа вероятного дефекта и условий обследования.

- разработать методику формирования программы контроля сварных соединений металлоконструкций.

Объект исследования – процесс технического диагностирования и экспертного обследования несущих стальных конструкций действующих промышленных предприятий.

Предмет исследования – система методов неразрушающего контроля сварных соединений, а также принципы и алгоритмы их комплексного обоснованного применения.

Теоретической и методологической основой исследования

Методологическую основу работы составили методы системного анализа, сравнительной оценки, экспериментального планирования, а также положения теории надёжности и технической диагностики. В процессе выполнения диссертации изучены и критически проанализированы труды российских и зарубежных учёных в области неразрушающего контроля сварных соединений: Волченко В.Н., Ермолова И.Н., Щербинского В.Г., Крауткремера И. и Г., Алешина Н.П., Вopilкина А.Х., Ключева В.В., а также работы по усталостной прочности и дефектологии сварных конструкций (Труфяков В.И., Николаев Г.А., Макаров И.И. и др.). Наибольшее влияние на выполне-

ное исследование оказали результаты работ в области ультразвукового и радиографического контроля, а также нормативно-техническая база (ГОСТ Р ИСО 6520-1, ГОСТ 3242-79, СП 16.13330.2017). Экспериментальная часть основана на методах неразрушающего контроля (ВИК, УЗК, ПВК), применённых в ходе натурного обследования реального промышленного объекта.

Автор защищает: результаты сравнительного анализа пяти основных методов неразрушающего контроля (ВИК, УЗК, РК, ПВК, МПК) по ключевым критериям, показавшего отсутствие универсального метода и необходимость комплексного подхода; оригинальную классификацию дефектов сварных соединений по доминирующим механизмам эксплуатационного происхождения, адаптированную для задач технического диагностирования; матрицу выбора оптимальной последовательности методов контроля в зависимости от вида вероятного дефекта, позволяющую обоснованно назначать первичные, уточняющие и дополнительные методы; методику формирования программы контроля сварных соединений металлоконструкций, включающую анализ исходных данных; результаты методики на примере подкрановой балки, подтвердившие сокращение времени и стоимости контроля, повышение достоверности и полноты выявления опасных дефектов по сравнению с традиционным подходом.

Научная новизна работы заключается в развитии системного подхода к организации контроля при обследовании эксплуатируемых конструкций. В отличие от традиционных шаблонных схем, в основе предлагаемой методики лежит превентивный анализ исходных данных (тип конструкции, история нагрузок, агрессивность среды) и выдвижение гипотез о наиболее вероятных механизмах повреждения. Предложена классификация дефектов сварных соединений по доминирующему механизму их эксплуатационного генезиса (усталостные, коррозионные, от перегрузок, изначальные), более релевантная для целей диагностики, чем стандартная технологическая классификация. Разработана методика формирования программы контроля сварных соединений металлоконструкций.

Практическая ценность: результатов состоит в возможности их непосредственного внедрения в работу инженерно-диагностических и экспертных организаций. Разработанные методические рекомендации и методика позволяют формировать обоснованные и оптимизированные программы обследования, исключая избыточные или недостаточные операции; сокращать сроки проведения работ и их стоимость (по данным апробации – на 30-40%) при одновременном повышении достоверности и полноты результатов; повышать уровень промышленной безопасности за счет целенаправленного выявления наиболее опасных дефектов на ранних стадиях их развития; материалы диссертации могут быть использованы также в учебном процессе при подготовке специалистов в области неразрушающего контроля и технической диагностики.

Апробация работы и публикации

Основные положения диссертации опубликованы в трех научных статьях:

- Журавлев, Ю. В. Методы контроля сварных соединений металлоконструкций: обеспечение надежности и безопасности промышленных объектов в строительстве / Ю. В. Журавлев, О. Е. Сысоев // Региональные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства, кадастров и техносферной безопасности в начале III тысячелетия : Материалы XI Всероссийской научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 16–18 декабря 2024 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2025. – С. 119-122. – EDN UNWZHN.

- Журавлев, Ю. В. Обеспечение надежности сварных конструкций: роль контроля качества / Ю. В. Журавлев, О. Е. Сысоев // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы VIII Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 07–11 апреля 2025 года. – Комсомольск-на-Амуре:

Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2025. – С. 462-465.
– EDN OININH.

- Журавлев, Ю. В. Существующие Дефекты сварных соединений: анализ причин возникновения / Ю. В. Журавлев, О. Е. Сысоев // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы VIII Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 07–11 апреля 2025 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2025. – С. 466-468. – EDN ECRSTU.

Структура и объём работы.

Магистерская диссертация состоит из введения, четырех глав, списка литературы (81 источник). Основной текст изложен на 87 страницах, содержит 14 таблиц и 44 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель, задачи, предмет и объект исследования, раскрыты научная новизна и практическая значимость, апробация результатов.

В **первой главе** «Методы контроля сварных соединений металлических конструкций» изложены теоретические основы контроля сварных соединений промышленных конструкций, охватывающие роль сварочных технологий в обеспечении надёжности, систематизацию методов оценки качества и анализ типовых дефектов.

Технология сварки и её роль в надёжности. Показано, что эволюция способов соединения металлов привела к доминированию сварки благодаря её экономической и технической эффективности. Современные методы (ручная дуговая сварка, автоматическая сварка под флюсом, сварка в защитных газах MIG/MAG и TIG) классифицированы по типу защиты, виду электрода и степени механизации. Определены базовые требования к качеству сварного соединения – прочность и пластичность, сплошность, коррозионная стойкость. Выявлен фундаментальный парадокс сварного шва: являясь средством

создания монолитной конструкции, он одновременно становится её наиболее уязвимым звеном из-за неизбежной химической и структурной неоднородности, а также остаточных напряжений. Это обосновывает императивность многоступенчатого контроля.

Классификация методов контроля. Проведено сущностное разграничение разрушающих, повреждающих и неразрушающих методов. Установлено, что при обследовании действующих промышленных объектов применение разрушающего контроля (механические испытания, металлография) строго лимитировано ввиду инвазивности, локальности получаемых данных и необходимости последующего восстановительного ремонта. Обосновано, что основу экспертной диагностики (более 95 % объёма работ) составляет неразрушающий контроль (НК), позволяющий получать распределённую информацию о состоянии материала без остановки эксплуатации. Выделены основные физические группы методов НК (акустические, радиационные, магнитные, вихретоковые, капиллярные, оптические) и сформулированы требования к их применению в полевых условиях: мобильность, работоспособность в сложных пространственных положениях, адаптивность к климатическим факторам, минимальное вмешательство в технологический процесс. Сравнительный анализ разрушающего и неразрушающего подходов по критериям применимости, репрезентативности, стоимости и времени выполнения операций подтвердил приоритет НК при решении задач технического диагностирования.

Основные дефекты сварных соединений. Дефект определён как любое несоответствие параметров шва требованиям нормативно-технической и конструкторской документации. Рассмотрена технологическая классификация дефектов согласно ГОСТ Р ИСО 6520-1, выделяющая группы: трещины, полости, твёрдые включения, отсутствие сплавления и непровар, нарушения формы шва. Для каждой группы указаны доминирующие причины возникновения и характер опасности. Вместе с тем показано, что данная классификация, эффективная для управления процессом сварки, оказывается недоста-

точной для целей технического диагностирования длительно эксплуатируемых конструкций: она не связывает тип дефекта с механизмами его развития под действием эксплуатационных нагрузок и не позволяет оценить реальную опасность дефекта в конкретных условиях нагружения. Это диктует необходимость перехода к классификациям, ориентированным на эксплуатационную повреждаемость.

Выводы по первой главе резюмируют, что эффективная методика контроля сварных соединений промышленных объектов должна базироваться на приоритетном применении комплекса методов неразрушающего контроля, быть адаптированной к полевым условиям и учитывать эволюцию дефектов под воздействием эксплуатационных факторов, что закладывает теоретический фундамент для последующих экспериментальных и методических разработок.

Вторая глава посвящена анализу основных методов неразрушающего контроля (НК), применяемых при обследовании сварных соединений промышленных конструкций. Рассмотрены физические основы, аппаратное оснащение, методики проведения, диагностические возможности и ограничения пяти ключевых методов: визуально-измерительного (ВИК), ультразвукового (УЗК), радиографического (РК), капиллярного (ПВК) и магнитопорошкового (МПК).

Визуальный и измерительный контроль базируется на визуальном восприятии отражённого света с применением оптических приборов и измерительных инструментов. Метод обеспечивает высокую оперативность (50–100 м/ч), минимальную стоимость (50–100 руб./м) и безопасность, позволяя выявлять поверхностные дефекты (трещины, коррозионные поражения, подрезы, наплывы). Главное ограничение – невозможность обнаружения скрытых внутренних дефектов и значительное влияние субъективного фактора, что определяет его роль как обязательного первичного скрининга.

Ультразвуковой контроль основан на отражении высокочастотных механических колебаний от несплошностей. Современные технологии фазиро-

ванных решёток и TOFD позволяют не только обнаруживать внутренние плоскостные дефекты (трещины, непровары, расслоения) на глубинах до 300 мм и более, но и количественно измерять их высоту с погрешностью около ± 1 мм. Метод высокочувствителен к опасным трещинам, однако требует значительной квалификации оператора, качественной подготовки поверхности и ограничен при контроле крупнозернистых материалов.

Радиографический контроль использует различное ослабление ионизирующего излучения материалом и дефектами, фиксируемое на плёнке или цифровом детекторе. Он наиболее информативен для объёмных дефектов (поры, шлаковые включения, грубые непровары) и обеспечивает высокую объективность документа. Вместе с тем его применение сопряжено с радиационной опасностью, необходимостью организации санитарно-защитной зоны, остановки производства и высокой стоимостью (500–1000 руб./м).

Капиллярный и магнитопорошковый контроль решают задачу выявления поверхностных дефектов. ПВК, основанный на проникновении индикаторной жидкости в раскрытые полости, применим к любым материалам, но требует тщательной подготовки и характеризуется низкой оперативностью (3–5 м/ч). МПК использует поля рассеяния над дефектами в намагниченных ферромагнитных сталях; он более производителен (20–30 м/ч) и способен обнаруживать подповерхностные дефекты на глубине до 2–3 мм при очень высокой чувствительности (от 0,01 мм).

Сравнительный анализ проведён по девяти критериям: выявляемые дефекты, глубина контроля, чувствительность, подготовка поверхности, оперативность, стоимость, требования к квалификации оператора, влияние на эксплуатацию и безопасность. Результаты сведены в таблицу 2.2 и наглядно представлены на радарной диаграмме (рисунок 2.12), демонстрирующей, что ни один метод не является универсальным. ВИК показывает максимум по оперативности и безопасности, но минимум по глубине; РК обладает хорошей чувствительностью к объёмным дефектам, но проигрывает в мобильно-

сти и безопасности; УЗК оптимален для внутренних плоскостных дефектов, но требует высокой квалификации.

Установлено, что для достоверной диагностики сварных соединений в условиях действующего производства необходимо комплексное применение методов: ВИК – как скрининг, УЗК – как основной метод выявления внутренних дефектов, ПВК или МПК – для верификации поверхностных индикаций, а РК – выборочно в спорных случаях или для документирования объёмных нарушений. Полученные результаты формируют научную базу для разработки алгоритма выбора оптимальной комбинации методов НК в зависимости от диагностических задач, что составляет содержание последующих глав работы.

В третьей главе «Дефектология сварных соединений эксплуатируемых конструкций» разработаны основы дефектологии сварных соединений, ориентированные на задачи технического диагностирования конструкций, находящихся в эксплуатации. Предложена новая классификация дефектов, установлены корреляции между типом конструкции и характерными повреждениями, а также создана матрица выбора методов неразрушающего контроля.

Классификация дефектов по механизмам эксплуатационного происхождения. В отличие от нормативной технологической классификации (ГОСТ Р ИСО 6520-1), фиксирующей геометрию и причины возникновения дефекта на стадии изготовления, предложен подход, связывающий тип повреждения с механизмом его образования и развития в процессе службы. Это позволяет прогнозировать опасность дефекта и целенаправленно выбирать методы контроля. Выделены четыре основные группы:

1. Усталостные дефекты – преобладающий механизм отказов (до 90 %), проявляющийся в виде трещин, стартующих от концентраторов напряжений (корни швов, места приварки рёбер) при циклическом нагружении. Коррозионные повреждения – равномерная, язвенная и межкристаллитная коррозия, особенно опасная в зонах сварных соединений, где создаются гальванические

пары и структурная неоднородность. Скорость коррозии $V_k = \Delta h/\tau$ служит основой для прогноза остаточного срока службы.

2. Дефекты от эксплуатационных перегрузок – пластические деформации, хрупкие и вязкие разрушения, потеря устойчивости, возникающие вследствие однократного или малоциклового превышения расчётных нагрузок (аварии, ошибки эксплуатации, природные воздействия).

3. Изначальные (технологические) дефекты, проявившиеся в эксплуатации – непровары, поры, подрезы, которые, не будучи выявленными при приёмочном контроле, в процессе работы становятся концентраторами напряжений и очагами развития усталостных трещин или коррозионно-механических повреждений.

Влияние типа конструкции на характер дефектообразования. Показано, что доминирующий механизм повреждения определяется сочетанием конструктивной формы и действующих нагрузок. На примерах типовых промышленных объектов установлены ключевые зоны риска и наиболее вероятные дефекты.

Матрица выбора методов контроля. Синтез данных о механизмах дефектов (раздел 3.1), их привязке к конструктивным типам (раздел 3.2) и диагностических возможностях методов НК (глава 2) позволил формализовать процедуру выбора. Разработана матрица, где для каждого вида прогнозируемого дефекта (усталостные трещины, коррозионные поражения, непровары, поры и включения, подрезы) указана оптимальная последовательность применения методов – от первичного скрининга (ВИК) до уточняющих (УЗК с TOFD/PAUT, РК, МПК) и дополнительных верификационных. Для каждой схемы дана количественная оценка ожидаемой эффективности обнаружения (от 85–90 % для непроваров до 98–100 % для коррозионных утонений).

Разработанная классификация дефектов по механизмам эксплуатационного происхождения, установленные корреляции «тип конструкции – нагрузки – вероятный дефект» и построенная матрица выбора методов образуют научно-методический фундамент для перехода от тотального контроля

к целенаправленному диагностированию. Это инструментальное обеспечение этапа планирования обследования, позволяющее инженеру-диагносту формировать рациональную программу НК, фокусируя ресурсы на критических зонах и наиболее опасных видах повреждений.

В **четвертой главе** «Разработка методики комплексного применения методов контроля» разработана методика комплексного применения методов неразрушающего контроля, учитывающая реальное техническое состояние и условия эксплуатации объекта, и выполнено её экономическое обоснование.

Анализ нормативной базы. Систематизирована многоуровневая система нормативно-технической документации (Федеральный закон № 116-ФЗ, ТР ЕАЭС 032/2013, ГОСТ 3242-79, ГОСТ Р 55143-2012, СП 16.13330.2017, типовые программы контроля). Выявлены системные недостатки: отсутствие дифференциации требований в зависимости от типа конструкции и условий её работы, шаблонное назначение фиксированного процента контроля без учёта распределения риска, игнорирование эксплуатационной истории. Показано, что эти факторы приводят либо к избыточным затратам на контроль малоопасных участков, либо к риску пропуска опасных дефектов.

Алгоритм формирования программы контроля. Предложен пятиэтапный адаптивный алгоритм, заменяющий шаблонный подход на риск-ориентированный.

1. Анализ исходных данных – сбор конструктивной, эксплуатационной и дефектоскопической информации, формирование формализованного технического задания.

2. Выдвижение гипотез – на основе знаний о связи типа конструкции с механизмами дефектообразования (глава 3) составляется перечень вероятных дефектов. Для каждого рассчитывается коэффициент риска $K_p = P \cdot S$, где P – вероятность появления (0...1), S – опасность последствий (1...10). Это позволяет ранжировать дефекты по приоритетности контроля.

3. Выбор целевых методов – для каждого гипотетического дефекта по матрице выбора методов (таблица 3.1) назначается оптимальная последовательность НК (от ВИК к уточняющим и верификационным методам).

4. Определение объёма контроля – в зонах высокого риска ($K_p \geq 5$) проводится сплошной 100%-ный контроль; среднего риска ($2 \leq K_p < 5$) – выборочный статистический контроль с обоснованным объёмом выборки; низкого ($K_p < 2$) – ограничиваются ВИК. Для расчёта объёма выборки n используется статистическая формула с доверительной вероятностью 95 %.

5. Формирование итоговой программы – документируется в виде карт контроля, методик и протоколов.

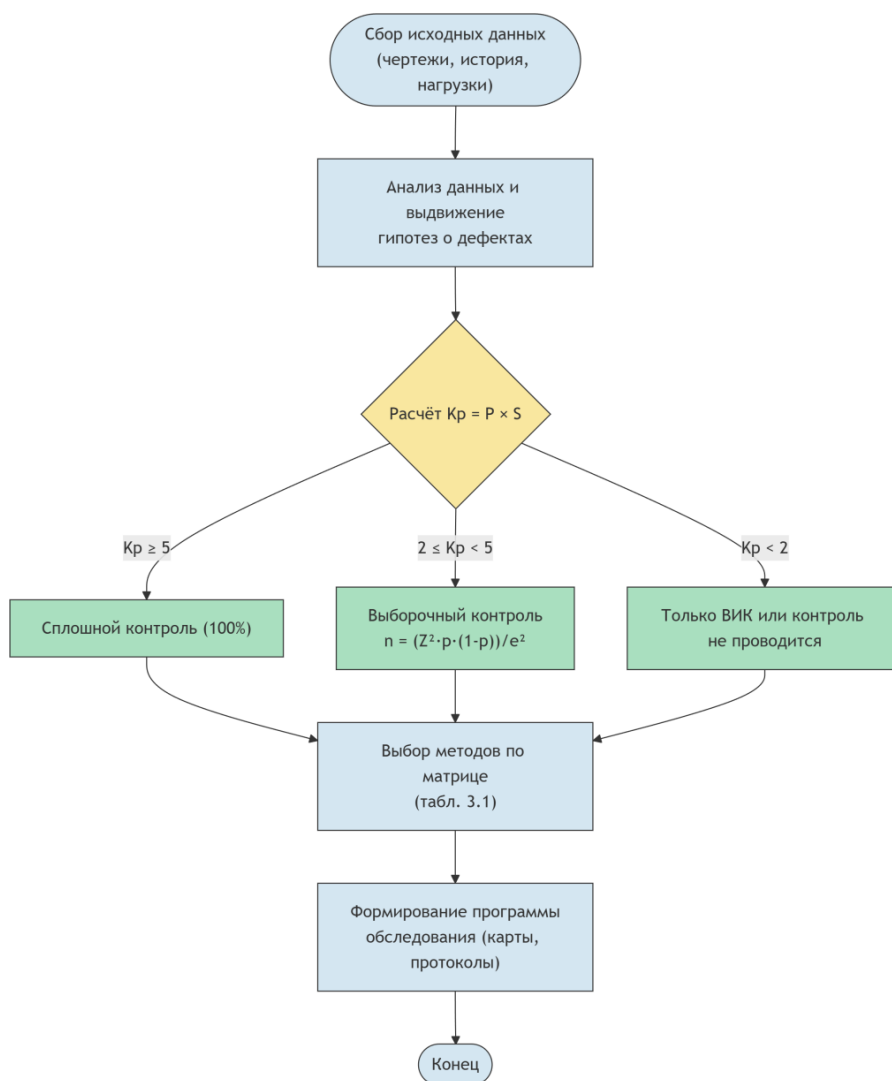


Рисунок 4.1 – Блок-схема алгоритма формирования программы контроля

Практическая апробация. Алгоритм верифицирован на расчётном примере подкрановой балки тяжёлого режима (сталь С345, пролёт 24 м, срок службы 20 лет, $\approx 10^7$ циклов нагружения). По этапам алгоритма выдвинуты две гипотезы: усталостные трещины в швах прикрепления диафрагм ($K_r = 8,1$) и коррозия нижнего пояса ($K_r = 4,8$). В соответствии с матрицей для зон высокого риска назначен 100%-ный УЗК с фазированной решёткой и МПК, для зон среднего риска – выборочная толщинометрия. Разработанная программа позволила выявить все три имевшиеся усталостные трещины (длиной до 40 мм, глубиной до 8 мм) и максимальное коррозионное утонение 3,5 мм. При традиционном подходе (ВИК + 20 % случайного УЗК) одна из трёх трещин была бы пропущена; время контроля сократилось на 33 % (с 36 до 24 ч), стоимость – на 29 % (с 120 до 85 тыс. руб.), расчётная достоверность повысилась с 85 до 98 %.

Экономическая эффективность. Прямая экономия за счёт оптимизации времени и методов составила 77 тыс. руб. на объект. Основной эффект получен за счёт предотвращения аварийной ситуации: раннее обнаружение трещины позволило выполнить плановый ремонт стоимостью 350 тыс. руб. вместо аварийного восстановления (1,5 млн руб.) и избежать простоя цеха, ущерб от которого оценивается в 12 млн руб. Суммарный предотвращённый ущерб на одном объекте – 13 150 тыс. руб., а общий экономический эффект с учётом прямой экономии – 13 227 тыс. руб. Срок окупаемости затрат на разработку методики (500 тыс. руб.) составил ~14 дней. При масштабировании на предприятие с 20 аналогичными балками годовой экономический эффект достигает порядка 265 млн руб.

Выводы по диссертации

Выполненные в магистерской диссертации исследования, посвящённые разработке методики комплексного применения методов неразрушающего контроля сварных соединений при обследовании промышленных объектов, позволяют сделать следующие выводы.

1. Анализ статистики аварийности на промышленных объектах показал, что до 80 % внезапных отказов металлоконструкций прямо или косвенно связаны с дефектами сварных швов. Сварное соединение, являясь зоной концентрации напряжений и структурной неоднородности, закономерно становится наиболее уязвимым звеном несущей системы, что обосновывает необходимость совершенствования методов его контроля.

2. Критический анализ нормативно-технической базы (ФЗ №116, ТР ЕАЭС 032/2013, ГОСТ 3242-79, СП 16.13330.2017 и др.) выявил её системные недостатки: шаблонное назначение объёма контроля (фиксированный процент швов без учёта рисков), отсутствие дифференциации по типам конструкций и условиям эксплуатации, неучёт эксплуатационной истории. Действующие стандарты детально регламентируют процедуры отдельных методов, но не содержат алгоритмов их обоснованного выбора и комплексного применения.

3. Проведён сравнительный анализ пяти основных методов неразрушающего контроля (ВИК, УЗК, РК, ПВК, МПК) по девяти критериям. Установлено, что ни один метод в отдельности не обеспечивает полной достоверности диагностики. Визуально-измерительный контроль (50–100 м/ч, 50–100 руб./м) является обязательным первичным этапом, но ограничен поверхностью. Ультразвуковой контроль наиболее эффективен для выявления внутренних плоскостных дефектов (глубина до 300 мм), однако требует высокой квалификации и качественной подготовки поверхности. Радиографический контроль, несмотря на высокую информативность для объёмных дефектов, сопряжён с радиационной опасностью, необходимостью остановки производства и высокой стоимостью (500–1000 руб./м), что ограничивает его применение в действующих цехах.

4. Разработана оригинальная классификация дефектов сварных соединений, ориентированная на задачи технического диагностирования. В отличие от традиционной технологической классификации (ГОСТ Р ИСО 6520-1), предложено деление по доминирующим механизмам эксплуатационного происхождения: усталостные трещины (до 90 % отказов подкрановых балок), коррозионные повреждения (равномерная, язвенная, межкристаллитная), дефекты от экс-

плутационных перегрузок, а также изначальные технологические дефекты, трансформировавшиеся в процессе службы.

5. Установлены количественные корреляции между типом промышленной конструкции и характерными дефектами: для подкрановых балок с тяжёлым режимом работы вероятность усталостных трещин в зонах прикрепления рёбер жёсткости достигает 0,85–0,90; для резервуаров и трубопроводов – коррозионное растрескивание в зоне переменного смачивания (вероятность 0,90); для каркасов зданий – коррозия узлов соединений (0,80). Эти зависимости позволяют на этапе планирования перейти к целевому, риск-ориентированному контролю.

6. На основе установленных взаимосвязей создана матрица выбора методов контроля (таблица 3.1), где для каждого вида дефекта указана оптимальная последовательность (первичный – уточняющий – дополнительный) с оценкой ожидаемой эффективности обнаружения (от 85–90 % для непроваров до 98–100 % для коррозии и подрезов). Матрица синтезирует знания о природе дефектов и диагностических возможностях методов, являясь готовым практическим инструментом для инженера-диагноста.

7. Разработан пятиэтапный адаптивный алгоритм формирования программы контроля: анализ исходных данных (чертежи, история нагрузок, результаты предыдущих осмотров) → выдвижение гипотез о вероятных дефектах с расчётом коэффициента риска $K_p = P \cdot S$ и ранжированием → выбор целевых методов по матрице → дифференциация объёма контроля (сплошной при $K_p \geq 5$, выборочный по формуле $n = (Z^2 \cdot p \cdot (1-p)) / e^2$ при $2 \leq K_p < 5$, визуальный при $K_p < 2$) → формирование итоговой программы с картами контроля и методиками.

8. Экспериментальная методика выполнена на расчётном примере подкрановой балки сталелитейного цеха (пролёт 24 м, сталь С345, срок службы 20 лет, режим работы тяжёлый с ПВ = 60 %, расчётное число циклов $\approx 10^7$). Для объекта выдвинуты две гипотезы: усталостные трещины в зоне прикрепления диафрагм ($K_p = 8,1$) и коррозия нижнего пояса ($K_p = 4,8$). По матрице выбраны последовательности: для трещин – ВИК → УЗК (РАУТ) → МПК; для коррозии –

ВИК + ультразвуковая толщинометрия. Объём контроля: 100 % угловых швов диафрагм (24 м) и выборочно 138 точек на нижнем поясе.

9. Сравнительный анализ эффективности показал, что предлагаемая методика по сравнению с традиционным подходом (ВИК + 20 % случайного УЗК) обеспечивает: сокращение времени контроля на 33 % (с 36 до 24 часов), снижение стоимости работ на 29 % (с 120 до 85 тыс. руб.), повышение полноты выявления критических дефектов до 100 % (обнаружены все три усталостные трещины против двух), рост расчётной достоверности результата с 85 % до 98 %.

10. Экономическое обоснование внедрения методики на одном объекте показало: прямая экономия от оптимизации контроля – 77 тыс. руб.; экономия от замены аварийного ремонта плановым – 1 150 тыс. руб.; предотвращённый ущерб от простоя цеха – 12 000 тыс. руб. Общий эффект – 13 227 тыс. руб. Срок окупаемости затрат на разработку (500 тыс. руб.) – 14 дней. Для предприятия, эксплуатирующего 20 аналогичных балок, годовой экономический эффект достигает 265 млн руб.

11. Таким образом, выполненные теоретические и экспериментальные исследования доказывают, что разработанная риск-ориентированная методика комплексного применения методов неразрушающего контроля сварных соединений обладает высокой эффективностью, адаптивностью и экономической целесообразностью. Её внедрение в практику экспертных организаций позволяет повысить достоверность диагностики, сократить трудозатраты и предотвратить аварийные ситуации на промышленных объектах.

12. Перспективными направлениями дальнейших исследований являются: автоматизация предложенного алгоритма в виде специализированного программного обеспечения с базами данных типовых дефектов и модулем расчёта рисков; разработка систем постоянного мониторинга критических конструкций с использованием методов акустической эмиссии и беспроводных датчиков; применение методов машинного обучения для автоматической классификации дефектов по данным ультразвукового и радиографического контроля.