

МЧС РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«УРАЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ СЛУЖБЫ МИНИСТЕРСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ, ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ»

УНК Пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ

Кафедра пожарной, аварийно-спасательной техники и специально

технических средств

Дисциплина: Детали машин

**Реферат**

На тему: «Механика разрушения и долговечность сварных соединений в деталях машин».

Выполнил:

Курсант ТБ-326 П.В. Седлецкая

Научный руководитель: И.Ю. Королькова

г. Екатеринбург

2025

# Введение

В современном машиностроении сварные соединения играют ключевую роль, обеспечивая прочность и надёжность конструкций. Однако их долговечность и устойчивость к различным эксплуатационным условиям остаются важными аспектами, требующими глубокого изучения. Проблемы разрушения сварных соединений часто становятся причиной серьёзных аварий и поломок, что подчёркивает необходимость разработки современных методов анализа и контроля качества. Развитие технологий и материалов требует применения новых подходов к изучению механики разрушения сварных соединений. Современные методы, такие как численные расчёты и экспериментальные исследования, позволяют более точно оценивать их поведение под воздействием нагрузки и факторов окружающей среды. Это делает тему исследования актуальной для обеспечения безопасности и надёжности машин и механизмов.

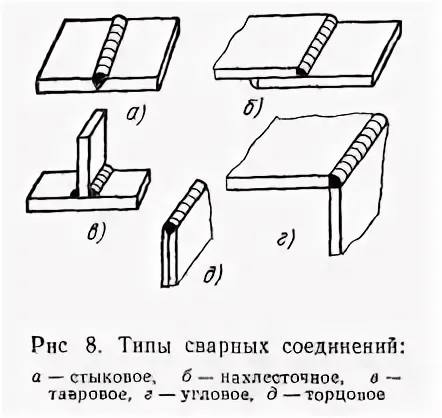
Цель данной работы заключается в изучении механизмов разрушения сварных соединений, оценке факторов, влияющих на их долговечность, и разработке рекомендаций по повышению их прочности. Для достижения этой цели необходимо рассмотреть современные методы анализа, изучить влияние эксплуатационных условий и материалов, а также предложить эффективные подходы к контролю качества сварных соединений.

На сегодняшний день в механике разрушения сварных соединений применяются как экспериментальные, так и численные методы анализа. Экспериментальные методы позволяют выявить дефекты и оценить их влияние на долговечность соединений, тогда как численные расчёты дают возможность моделировать сложные процессы разрушения. Современные технологии, такие как использование искусственного интеллекта и автоматизированных систем контроля, существенно расширяют возможности исследования и повышения качества сварных конструкций.

# Основы механики разрушения сварных соединений

## Понятие и классификация сварных соединений

Сварные соединения представляют собой неразъемное соединение металлических деталей, образующееся в результате локального нагрева или пластической деформации. Этот процесс позволяет объединить материалы с высокой прочностью и надежностью, что делает сварные соединения важным элементом в машиностроении и других отраслях промышленности. Основные характеристики таких соединений включают прочность, устойчивость к внешним нагрузкам и долговечность, что в значительной степени зависит от методов сварки и свойств соединяемых материалов. Выявлено, что «эффект режима обработки на сопротивление усталости материалов контролируется структурным состоянием, приложенным напряжением и средой усталостного нагружения» (Пачурин, Курагина, 2025. 2 с.) [3]. Таким образом, комплексный подход к выбору технологий сварки и оценке характеристик материалов является ключевым для достижения надежности сварных соединений.



Сварные соединения классифицируются по нескольким основным признакам, которые определяют их конструктивные особенности и области применения. По пространственному расположению выделяют стыковые, угловые и тавровые соединения, выбор которых зависит от требований к конструкции и нагрузки. В зависимости от способа сварки различают дуговую, газовую и лазерную сварку, каждая из которых имеет свои преимущества и ограничения. Классификация также проводится по материалам соединяемых деталей, таким как сталь, алюминий или титан, что позволяет учитывать физико-химические свойства материалов при выборе технологии сварки.В зависимости от объема имеющихся исходных данных могут применяться различные методы оценки работоспособности кольцевых сварных соединений. В этом контексте важно учитывать традиционную оценку на основе нормативных значений механических свойств металла (Ковех, Овсянников, Панов, 1 с.) [7].

## Физико-механические свойства сварных соединений

Физико-механические свойства сварных соединений имеют решающее значение для их эксплуатационных характеристик. К числу этих свойств относятся прочность, пластичность, вязкость разрушения и твердость. Например, предел прочности сварных соединений из низкоуглеродистых сталей может достигать 400–500 МПа. Сварные соединения также демонстрируют неоднородность свойств в различных зонах: зоне шва, зоне термического влияния и основном металле. Это обусловлено изменениями структуры материала, происходящими в процессе сварки, которые значительно влияют на поведение соединения под нагрузкой и его способность выдерживать эксплуатационные условия. Изучение структурного состояния и изменения механических характеристик при статическом и циклическом нагружении этих соединений имеет как теоретическое, так и практическое значение (Гущин, Пачурин, 2013. 417 с.) [3].

Неоднородность свойств сварных соединений существенно влияет на их долговечность. В зоне термического влияния, где происходят изменения структуры материала, может наблюдаться концентрация напряжений, что способствует возникновению трещин и сокращает срок службы соединения. Исследования показывают, что повышение вязкости разрушения сварных соединений на 20-30% приводит к значительному увеличению их долговечности, особенно при воздействии циклических нагрузок. В этом контексте важно отметить, что «исследованию особенностей влияния этих видов обработки на структуру и комплекс показателей конструктивной прочности, в первую очередь, усталостной трещиностойкости, посвящена данная работа» (Корниенко, 2009. 3 с.) [8]. Оптимизация физико-механических свойств сварных соединений является важным аспектом для обеспечения их надежности и долговечности.

## Основные механизмы разрушения сварных соединений

Механизмы разрушения сварных соединений представляют собой совокупность процессов, приводящих к утрате целостности и функциональности конструкций. К числу основных механизмов относятся усталостное разрушение, межкристаллитное разрушение, коррозионное растрескивание и термическая усталость. Усталостное разрушение возникает под воздействием многократных циклических нагрузок, что особенно актуально для сварных конструкций, эксплуатируемых в условиях переменных нагрузок, таких как мосты и трубопроводы. Например, «из сварных соединений паропроводов ТЭЦ, отработавших 329640, 361800, 482400 часов, были вырезаны три серии образцов» (Сукиасян, 2015, с. 65) [13], что подчеркивает влияние времени эксплуатации на прочность соединений. Межкристаллитное разрушение связано с разрушением по границам зерен материала и может быть спровоцировано внутренними напряжениями или воздействием агрессивных сред. Коррозионное растрескивание представляет собой процесс разрушения под воздействием коррозионной среды, часто сопровождающийся механическими напряжениями. Термическая усталость, в свою очередь, возникает из-за чередующихся циклов нагрева и охлаждения, что приводит к образованию трещин в зоне сварного шва. Все эти механизмы играют ключевую роль в понимании процессов разрушения и важны для прогнозирования долговечности сварных  соединений.

Влияние механизмов разрушения на долговечность сварных соединений является значительным, так как каждый из них может существенно сократить срок службы конструкции. Коррозионное растрескивание, возникающее в агрессивных средах, таких как нефтехимическая промышленность, способно уменьшить срок службы сварных соединений на 30–50%. Это связано с тем, что коррозионные процессы ускоряют образование трещин, особенно в местах концентрации напряжений. Корниенко отмечает, что «интенсивная пластическая деформация поверхностных слоев приводит к смене растягивающих напряжений сжимающими» (Корниенко, 2009, 14 с.) [8], что также ухудшает состояние сварных соединений.Усталостное разрушение также оказывает значительное влияние, поскольку многократные циклические нагрузки приводят к постепенному накоплению повреждений, что в конечном итоге может вызвать катастрофическое разрушение. Таким образом, понимание и анализ влияния этих механизмов позволяют разрабатывать меры по увеличению надежности и долговечности сварных соединений. К таким мерам относятся применение защитных покрытий, использование материалов с высокой коррозионной стойкостью и контроль за эксплуатационными нагрузками.

# Методы анализа долговечности сварных соединений

## Экспериментальные методы исследования

Экспериментальные методы исследования играют ключевую роль в оценке долговечности сварных соединений, поскольку они позволяют изучить их поведение под действием различных нагрузок. Одним из наиболее распространенных методов является метод циклических испытаний, или усталостного тестирования, который помогает определить пределы выносливости соединений при многократных нагрузках. Этот подход моделирует реальные эксплуатационные условия, выявляя слабые места конструкции. Кроме того, рентгенографический контроль, позволяющий обнаруживать внутренние дефекты, такие как поры и трещины, значительно повышает точность оценки долговечности соединений. Троицкий отмечает, что «подробно описаны рентгеновский, ультразвуковой, магнитный методы контроля, исследование поверхности проникающими веществами». (Троицкий, 2006. 7 с.) [14]. Таким образом, комплексное применение различных методов контроля способствует более детальному анализу состояния сварных соединений и повышает надежность конструкций.

Применение экспериментальных методов исследования сварных соединений подчеркивает их эффективность и значимость. Исследование, проведенное в 2018 году Институтом сварки, показало, что метод акустической эмиссии способен выявить критические дефекты в 85% образцов, что существенно улучшает надежность конструкций. Циклические испытания на усталость сварных соединений из стали 09Г2С продемонстрировали, что оптимизация геометрии шва может увеличить долговечность соединений на 20%. При этом рентгенографический контроль, использующийся при производстве мостовых конструкций, позволил снизить количество отказов на 15% за последние пять лет. Эти примеры подтверждают важность применения экспериментальных методов для повышения качества и долговечности сварных соединений.В последние годы особое внимание уделяется после сварочным методам обработки. Среди методов, которые реально повышают качество, надежность и ресурс сварных конструкций, следует выделить наноструктурирование поверхностных слоев сварных соединений (Ельцов, 2016. 100 с.) [4].

## Численные методы анализа

Численные методы анализа играют ключевую роль в изучении механики разрушения сварных соединений, позволяя моделировать их поведение под действием различных нагрузок. Одним из наиболее распространённых является метод конечных элементов (МКЭ), который эффективно анализирует сложные конструкции, включая сварные соединения. Этот метод используется для предсказания распределения напряжений, деформаций и других параметров, влияющих на долговечность соединений. В 2019 году в Институте сварки и технологии соединений (США) было проведено исследование, в котором с помощью МКЭ изучались остаточные напряжения в сварных швах. Результаты показали высокую точность метода — 95%, что подтверждает его эффективность в инженерной практике.На кафедре сварочного производства также ведется подготовка по магистерской программе, включающей исследование взаимодействия пластической деформации и разрушения сварных соединений (Гридасов, Погодаев, Погодаева, 2010. 91 с.) [2]. Это подчеркивает важность комплексного подхода к анализу сварных соединений, который учитывает не только механические, но и физико-химические процессы, происходящие в материалах.

Численные методы, такие как метод конечных элементов, имеют ряд преимуществ, делающих их незаменимыми в анализе сварных соединений. Они позволяют учитывать сложные геометрические формы и свойства материалов, что критически важно для точной оценки долговечности соединений. При этом необходимо отметить и ограничения этих методов, включая высокую вычислительную сложность и потребность в точных данных о материалах. Моделирование сварного шва с использованием метода конечных элементов может занимать до 48 часов на стандартном компьютере, что делает процесс анализа трудоемким и ресурсозатратным. Тем не менее, преимущества численных методов значительно перевешивают их недостатки, особенно в контексте сложных инженерных задач. В частности, «разработка методики количественной оценки дефектов с целью расчета пределов механических напряжений в сварных соединениях пенала для хранения отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) является актуальной задачей» (Седанова, Салчак, 2017, с. 35) [11].

## Современные подходы к моделированию процессов разрушения

Современные подходы к моделированию процессов разрушения опираются на мощные вычислительные методы, такие как метод конечных элементов (МКЭ). Этот метод позволяет с высокой точностью анализировать распределение напряжений и деформаций в сварных соединениях, что является ключевым для предсказания их долговечности. Программное обеспечение ANSYS, широко используемое в авиационной и автомобильной промышленности, предоставляет инженерам возможность моделировать сложные физические процессы и оценивать поведение соединений под различными видами нагрузок. Применение МКЭ способствует выявлению критических зон напряжений, где наиболее вероятно возникновение разрушений, и позволяет оптимизировать конструкции для повышения их надежности.Сварные конструкции обладают высокой гибкостью в проектировании и экономической эффективностью при малых и средних сериях. Вместе с тем, они требуют строгого контроля качества сварных соединений и применения методов снижения остаточных напряжений [6].

В последние годы активно внедряются технологии искусственного интеллекта и машинного обучения в процесс моделирования разрушений сварных соединений. Эти технологии позволяют анализировать большие объемы данных и выявлять закономерности, которые недоступны традиционным методам. Например, в 2020 году компания Siemens представила концепцию цифрового двойника, используемого для анализа сварных конструкций. Такой подход значительно сократил время разработки новых изделий и повысил точность прогнозирования их поведения под нагрузкой. Современные технологии также способствуют более глубокому пониманию процессов, происходящих в сварных соединениях. В частности, «статья представляет результаты моделирования сварного соединения «трубопровод – трубная плита», выполненного с помощью дуговой сварки. Данные распределения остаточных напряжений в сварных соединениях зависят от последовательности сварки труб» (Ямилев, Гиззатуллин, Макаренко, 2021. 47 с.) [12]. Эти инновации открывают новые перспективы в инженерном анализе и способствуют созданию более надежных и долговечных конструкций.

# 

# Факторы, влияющие на долговечность сварных соединений

## Влияние эксплуатационных условий

Температурные и влажностные условия эксплуатации оказывают значительное влияние на долговечность сварных соединений. Высокие температуры, превышающие 500 °C, могут способствовать ускоренному старению материалов, что связано с термической усталостью и изменением их микроструктуры. С другой стороны, низкие температуры также оказывают влияние на характеристики материалов. Например, «при температуре -60 °С у сплавов 1420 и 1461 появляются стадии упрочнения, в течение которых значение деформации при заданных граничных значениях напряжения уменьшается» (Ельцов, 2021. 1 с.) [4]. Эти факты подчеркивают необходимость особого подхода к выбору материалов и методов сварки, способных противостоять как термическим, так и низкотемпературным нагрузкам.

Механические нагрузки, особенно циклические, существенно влияют на прочность сварных соединений. При нагрузках, превышающих 50% предела прочности материала, вероятность усталостного разрушения увеличивается на 70%. В таких условиях «поверхностный слой испытывает основные воздействия динамических нагрузок и подвергается воздействиям агрессивных сред» (Гридасов, Погодаев, Погодаева, 2010. 91 с.) [2]. Это подчеркивает важность тщательного контроля качества сварных швов и использования технологий, направленных на снижение концентрации напряжений в соединениях. Экспериментальные данные подтверждают, что комплексный подход к обеспечению прочности сварных соединений является критически важным для предотвращения разрушений.

## Материалы и технологии сварки

Материалы, используемые в сварных соединениях, играют решающую роль в обеспечении их долговечности и надежности. Наиболее распространенными являются углеродистые и низколегированные стали, которые благодаря своему составу обеспечивают высокую прочность сварных швов. Тем не менее, их склонность к коррозии требует дополнительных мер защиты, особенно в агрессивных средах. В таких условиях предпочтительнее использовать материалы с высоким содержанием никеля и хрома, демонстрирующие повышенную устойчивость к коррозии и температурным нагрузкам. В авиационной промышленности, где критически важны прочность и малый вес, применяются титановые сплавы, обеспечивающие отличные эксплуатационные характеристики сварных соединений. Методы отливки и ковки, обеспечивающие лучшую прочность и долговечность материала, связаны с высокими начальными затратами на оснастку [6].

Современные технологии сварки оказывают значительное влияние на долговечность сварных соединений. Лазерная сварка, например, позволяет минимизировать зоны термического влияния благодаря высокой концентрации энергии, что снижает вероятность возникновения трещин. Технология сварки трением с перемешиванием (FSW) отличается тем, что в процессе соединения материалы не плавятся, что уменьшает возможность образования внутренних дефектов и обеспечивает высокую прочность соединений. На удалении 30 мм микротвёрдость постепенно возрастает до уровня, соответствующего материалу без шва (Hμ=1.67±0.03 ГПа) (Смирнова и др.,216 с.) [12]. Кроме того, автоматизированные системы контроля качества, такие как ультразвуковая дефектоскопия, позволяют своевременно выявлять и устранять дефекты сварных швов, что существенно повышает их надежность.

## Влияние дефектов и напряжений

Дефекты сварных соединений представляют собой одну из основных причин снижения прочности и долговечности конструкций. К наиболее распространённым недостаткам относятся поры, трещины, включения шлака и недостаточное проваривание. Эти дефекты существенно ослабляют сварные швы, создавая очаги концентрации напряжений, что может привести к разрушению материала. Исследования в области механики материалов показывают, что наличие таких дефектов способно снижать прочность конструкции на 30-50%. Согласно данным Американского института сварки, до 70% разрушений сварных соединений связано с внутренними дефектами, которые часто остаются незамеченными при визуальном контроле. Для выявления этих недостатков эффективным является применение технологий неразрушающего контроля, таких как ультразвуковое исследование, которое позволяет обнаружить до 95% дефектов в сварных швах и значительно повысить надёжность конструкций. Вместе с тем, исследования показывают, что в зоне термического воздействия после ультразвуковой обработки основное влияние сосредоточено в поверхностном слое, что проявляется в интенсивной пластической деформации ферритных зёрен на глубину не более 100 мкм (Смирнова и др., 216 с.) [12].

Эксплуатационные напряжения существенно влияют на долговечность сварных соединений. Циклические нагрузки, возникающие в процессе эксплуатации, способствуют накоплению усталостных повреждений в материале, что может снизить долговечность сварных соединений на 40-60%. Исследования показывают, что при температуре испытания 20°С происходит равномерное приращение деформации и увеличение амплитуды деформации с ростом амплитуды напряжения, в то время как при 85°С амплитуда деформации остается неизменной (Ельцов, 2021, с. 3) [4].Сварные конструкции, работающие при высоких температурах, подвержены термическому старению, что приводит к снижению прочности на 25%. Остаточные напряжения, возникающие в процессе сварки, также играют значительную роль в процессе разрушения. При этом их влияние можно уменьшить на 30-40% с помощью термической обработки после сварки. Таким образом, управление эксплуатационными и остаточными напряжениями представляет собой ключевой аспект обеспечения долговечности сварных соединений.

## Оптимизация технологии сварки

Выбор метода сварки и параметров процесса является критическим этапом при создании сварных соединений, поскольку именно от него зависит их прочность и долговечность. Например, метод дуговой сварки под флюсом, разработанный еще в 1930-х годах, продолжает активно применяться благодаря высокой производительности и качеству соединений. Исследования показывают, что правильный выбор метода сварки может увеличить прочность соединений на 30-50%, что особенно актуально при эксплуатации в сложных условиях. Современные технологии, такие как лазерная сварка, обеспечивают высокую точность соединений с минимальными деформациями, что делает их незаменимыми для авиационной и космической промышленности.С другой стороны, Мартыненко и Неминущий подчеркивают, что дефектообразование и процессы их развития в сварных соединениях разной природы еще не полностью изучены, особенно на микро- и наноуровнях. (Мартыненко В.С, Неминующий Е.С., 2010. 47 с.) [9]. Таким образом, выбор оптимального метода сварки имеет ключевое значение для обеспечения надежности сварных конструкций, при этом важно учитывать открытые вопросы в области дефектологии.

Современные технологии и оборудование значительно расширяют возможности для улучшения качества сварных соединений. Использование роботизированных сварочных систем обеспечивает высокую стабильность процесса и минимизирует вероятность возникновения дефектов. Кроме того, системы контроля температуры и автоматического регулирования параметров сварки позволяют повысить качество соединений на 20-25%, что особенно важно для изделий, эксплуатируемых в экстремальных условиях. При этом необходимо учитывать, что сварка может негативно сказываться на прочностных характеристиках. Гущин и Пачурин отмечают, что "условный предел прочности сварных образцов ниже, чем у свариваемого металла, что связано с изменениями структуры и свойств материала в процессе сварки" (Гущин, Пачурин, 2013. 418 с.) [3]. Технологии 3D-печати также находят применение в производстве сварных конструкций, позволяя создавать сложные формы и снижать вес изделий. Таким образом, внедрение современных технологий является эффективным способом повышения качества и надежности сварных соединений, при этом важно учитывать влияние сварки на прочностные характеристики.

## Выбор материалов с повышенной устойчивостью к разрушению

Выбор материалов для сварных соединений с повышенной устойчивостью к разрушению является ключевым этапом проектирования надежных конструкций. Важными характеристиками в этом процессе являются вязкость разрушения и температура хладноломкости. Температура хладноломкости, достигающая до -60°C, имеет особое значение для эксплуатации в арктическом климате, где материалы подвергаются экстремальным температурным нагрузкам. Эти параметры способствуют долговечности и надежности сварных соединений, особенно в сложных эксплуатационных условиях. В этом контексте высокопроизводительная холодная штамповка и сварка также играют значительную роль в повышении долговечности и надежности конструкций (Пачурин, Курагина, 2025. 1 с.) [3].

Свойства материалов значительно влияют на долговечность сварных соединений, особенно в агрессивных средах. Применение материалов с высокой коррозионной стойкостью, таких как нержавеющие стали с содержанием хрома более 12%, позволяет существенно продлить срок службы соединений. Эти стали менее подвержены коррозионному разрушению, что критично для конструкций, работающих в условиях повышенной влажности или воздействия химически активных веществ. Проблема коррозии и течи в сварных швах пенобаков, выполненных из нержавеющей стали, требует особого внимания, поскольку это может привести к серьезным последствиям в процессе эксплуатации. Таким образом, выбор материалов с учетом их свойств является ключевым фактором для обеспечения долговечности сварных соединений.

## Применение защитных покрытий и обработок

Защитные покрытия играют ключевую роль в увеличении долговечности сварных соединений, предотвращая их повреждение под воздействием внешней среды. Антикоррозийные покрытия, такие как эпоксидные смолы, эффективно защищают соединения от коррозии, увеличивая их срок службы на 30-50%. Эти покрытия создают барьер, который препятствует контакту металла с влагой и агрессивными веществами. С другой стороны, использование термопластичных покрытий, например полиэтиленовых, особенно актуально в трубопроводных системах. Они обеспечивают изоляцию соединений и снижают вероятность утечек и разрушений на 40%, что делает их незаменимыми в условиях повышенных эксплуатационных нагрузок.Дополнительно в работе рассматривается влияние непроваров сварного шва на его прочность, а также разработан способ расчета критических напряжений, возникающих в пеналах для хранения ОЯТ при наличии дефектов (Седанова, Салчак, 2017. 35 с.) [11]. Эти аспекты подчеркивают необходимость комплексного подхода к оценке прочности и долговечности сварных соединений, учитывающего как защитные покрытия, так и качество сварных швов.

Обработка сварных соединений после их выполнения является ключевым этапом, который значительно повышает прочностные характеристики. Механическая обработка, включая шлифовку и полировку, снижает концентрацию напряжений в сварных швах, что уменьшает риск образования трещин. Это особенно важно для конструкций, подверженных циклическим нагрузкам. Термообработка, такая как отпущение, применяется для снятия остаточных напряжений, возникающих в процессе сварки. В результате увеличивается усталостная прочность соединений на 20-30%, что существенно повышает их надежность в условиях длительной эксплуатации.Проблема недостатков в сварных швах подчеркивается в исследованиях, где отмечается, что «весьма актуальной проблемой в пожарных частях является появление течи в сварных швах пенобаков пожарных автомобилей» (Казарин, Лебедева, Таратанов, 2014. 11 с.) [5]. Таким образом, правильная обработка сварных соединений не только улучшает их эксплуатационные характеристики, но и предотвращает потенциальные аварии и утечки.

# Методы оценки и контроля качества сварных соединений

## Неразрушающие методы контроля

Для оценки качества сварных соединений широко применяются неразрушающие методы контроля, позволяющие выявлять дефекты без повреждения исследуемого объекта. Среди таких методов особое место занимает ультразвуковой контроль, который использует высокочастотные звуковые волны. Эти волны проникают в материал и отражаются от дефектов, таких как трещины или поры. Метод отличается высокой точностью и способен исследовать материал на глубину до нескольких десятков сантиметров, что делает его незаменимым для проверки сварных соединений в ответственных конструкциях.Другим популярным методом является магнитопорошковая дефектоскопия, предназначенная для выявления поверхностных и подповерхностных дефектов в ферромагнитных материалах, таких как сталь. Этот метод основывается на создании магнитного поля в исследуемом объекте и применении магнитного порошка, который скапливается в местах дефектов, делая их видимыми.В дополнение к этим методам, «в докладе представлен многоуровневый подход к оценке работоспособности кольцевых сварных соединений, который может использоваться как во время строительства, так и на стадии эксплуатации магистральных газопроводов» (Ковех, Овсянников, Панов, 1 с.) [7]. Таким образом, все три метода являются эффективными инструментами для обеспечения надежности сварных соединений.

Одним из ключевых преимуществ неразрушающих методов контроля является возможность проверки сварных соединений без их разрушения, что сохраняет целостность и функциональность изделия. Это особенно важно для контроля качества в процессе эксплуатации, когда необходимо оценить состояние конструкции без её демонтажа. Тем не менее, неразрушающие методы контроля имеют свои ограничения. Например, рентгенографический контроль, используемый для выявления внутренних дефектов, требует сложного оборудования и строгих мер безопасности из-за применения ионизирующего излучения, что может ограничивать его использование в определённых условиях. В результате исследования были получены как образцы без дефектов в сварных соединениях, так и образцы с дефектами, что дало возможность провести анализ их долговечности (Сукиасян, 2015. 65 с.) [13]. Таким образом, выбор метода контроля должен учитывать как его преимущества, так и возможные ограничения, чтобы обеспечить оптимальное качество сварных соединений.

## Мониторинг состояния сварных соединений в процессе эксплуатации

Методы мониторинга состояния сварных соединений играют ключевую роль в обеспечении их надежности и долговечности. Одним из наиболее распространенных методов является ультразвуковая дефектоскопия, которая позволяет с высокой точностью выявлять внутренние дефекты в сварных швах. Акустическая эмиссия фиксирует звуковые волны, возникающие при развитии трещин, и служит эффективным инструментом диагностики. Метод магнитной памяти металла (МММ) используется для оценки напряженного состояния сварных швов и выявления зон риска в конструкциях. Применение инфракрасной термографии для контроля неоднородности теплового поля доказало свою эффективность, позволяя обнаруживать дефекты с точностью до 95%, что подтверждается исследованиями 2020 года.Важным аспектом является то, что «основные этапы проведения исследования: подготовка образцов, сварка с двух сторон, шлифовка и полировка поверхности образца в зоне сварного соединения» (Мартыненко, Неминущий, 2010, с. 47) [9]. Эти этапы обеспечивают надежность и точность диагностики сварных соединений, что, в свою очередь, способствует повышению их долговечности.

Применение мониторинга состояния сварных соединений значительно повышает их надежность, снижая вероятность аварий и поломок. Своевременное обнаружение дефектов позволяет предотвратить развитие критических ситуаций, что снижает вероятность аварий на 30%. В нефтегазовой промышленности методы мониторинга, такие как ультразвуковая и визуальная инспекция, способствовали сокращению количества аварийных ситуаций на 20% за последние пять лет. Компании, внедряющие автоматизированные системы мониторинга на основе технологий интернета вещей, отмечают снижение затрат на ремонт и обслуживание до 25%, что делает такие системы не только эффективными, но и экономически выгодными. Важно учитывать, что «технологически очень сложно изготовить пенобак из цельного листа нержавеющей стали, поэтому пенобаки изготавливаются методом сварки» (Казарин, Лебедева, Таратанов, 2014, с. 11) [5]. Это подчеркивает значимость надежных сварных соединений в производстве пенобаков, где мониторинг состояния сварных швов становится критически важным для обеспечения безопасности и долговечности оборудования.

## Автоматизация процессов контроля качества

Автоматизация контроля качества сварных соединений включает внедрение передовых технологий, которые значительно повышают точность и надежность оценки сварных швов. Одним из примеров таких технологий является использование систем машинного зрения, активно применяемых в промышленности. Разработки компании Cognex, например, способны обнаруживать дефекты сварных швов с точностью до 98%. Это достигается благодаря высокоточным камерам и алгоритмам обработки изображений, которые анализируют структуру шва и выявляют даже мельчайшие отклонения от нормы. Таким образом, данные технологии обеспечивают высокий уровень автоматизации и минимизируют влияние человеческого фактора в процессе контроля.Кроме того, исследования демонстрируют, что высокие технологические и ресурсные характеристики наноструктурирования позволяют широко использовать этот метод в производстве и ремонте сварных конструкций (Ельцов, 2016. 100 с.) [4]. Это подчеркивает необходимость комплексного подхода к улучшению качества сварных соединений, где различные технологии и методы работают в синергии для достижения наилучших результатов.

Внедрение автоматизированных систем контроля качества сварных соединений предоставляет значительные преимущества для промышленности. Согласно отчету Международного института сварки (IIW), такие системы позволяют сократить время проверки сварных соединений на 40%, что существенно увеличивает производительность и снижает затраты. Автоматизация также обеспечивает более высокий уровень точности контроля, уменьшая вероятность пропуска дефектов.Перспективы внедрения таких систем связаны с развитием технологий искусственного интеллекта и машинного обучения, которые смогут еще эффективнее анализировать данные и предсказывать возможные дефекты. В частности, исследование показало, что деформация соединений разнородных металлов способствует реализации контактного упрочнения «мягких слоев», что зависит от степени механической неоднородности (Ямилев, Гиззатуллин, Макаренко, 2021. 80 с.) [9]. Таким образом, автоматизация становится ключевым фактором в повышении качества и надежности сварных соединений.

# Заключение

Механика разрушения сварных соединений представляет собой сложную область, изучающую процессы, влияющие на прочность и устойчивость соединений. Эти процессы включают физико-механические свойства материалов, эксплуатационные условия и различные механизмы разрушения, такие как усталость и коррозия. Анализ этих факторов позволяет лучше понять причины повреждений и разработать методы их предотвращения. Современные методы исследования, включая экспериментальные и численные подходы, значительно расширили возможности анализа долговечности сварных соединений. Экспериментальные методы, такие как ультразвуковая дефектоскопия и акустическая эмиссия, позволяют выявлять дефекты на ранних стадиях. Численные методы, такие как метод конечных элементов, обеспечивают точное моделирование поведения соединений под нагрузкой. Выявленные факторы, влияющие на долговечность, такие как выбор материалов, технологии сварки и эксплуатационные нагрузки, подчеркивают необходимость комплексного подхода к проектированию и контролю сварных соединений. Эти аспекты являются ключевыми для обеспечения надежности и безопасности конструкций в машиностроении.

Оптимизация технологий сварки, таких как использование лазерной сварки и технологии трения с перемешиванием, позволяет значительно улучшить качество соединений. Выбор материалов с высокой коррозионной стойкостью и прочностью также играет важную роль в увеличении долговечности сварных конструкций. Внедрение современных методов контроля, включая неразрушающие методы и автоматизированные системы мониторинга, обеспечивает своевременное обнаружение дефектов и предотвращение аварий. Эти подходы способствуют повышению эффективности производственных процессов и надежности сварных соединений.

Дальнейшие исследования в области механики разрушения сварных соединений должны быть направлены на разработку новых материалов и технологий, способных выдерживать экстремальные эксплуатационные условия. Также перспективным направлением является интеграция искусственного интеллекта и машинного обучения для анализа и прогнозирования поведения сварных соединений, что позволит значительно улучшить их надежность и долговечность.

# Список литературы

1. Актуальные проблемы и инновации в обеспечении безопасности: Материалы Недели Науки (декабрь 2013) / под ред. Далькова М.П. — Екатеринбург: Уральский институт ГПС МЧС России, 2014. — 190 с.
2. Гридасов А.В., Погодаев А.В., Погодаева Л.Ф. Лабораторный комплекс для исследований физико-механических характеристик поверхности металла сварных соединений // Современные наукоемкие технологии. — 2010. — № 1. — С. 91.
3. Гущин А.Н., Пачурин Г.В. Влияние вида обработки на эксплуатационные свойства сварных соединений некоторых цветных металлоизделий // Фундаментальные исследования. — 2013. — № 11. — С. 417–418.
4. Ельцов Р.И. Разработка технологического процесса изготовления сварных конструкций // Строительные материалы и изделия. — 2021. — Т. 4, № 5. — С. 35–44. Инновации в технологиях формообразования листовых материалов и упрочнения технологической оснастки в авиационной и других отраслях промышленности: сборник научных трудов / под ред. Коллектива авторов. — Ульяновск: УлГТУ, 2016. — 139 с.
5. https://apni.ru/uploads/ai\_4-1\_2025.pdf#page=14
6. http://bash.rosmu.ru/activity/attach/announces/531/2-2011.pdf#page=80
7. Ковех В. М., Овсянников Е. Н., Панов М. Ю. Влияние полноты исходных данных на методы оценки работоспособности кольцевых сварных соединений // Доклад. — [б. м.], [б. г.]. — [б. и.].
8. Корниенко Е. Е. Повышение конструктивной прочности сварных соединений путем интенсивной пластической деформации поверхностных слоев швов и зон термического влияния: Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. — Новосибирск, 2009. — [б. с.].
9. Мартыненко В.С., Неминущий Е.С. Разработка методики исследования разрушения сварных соединений из феррито-перлитных сталей на микроуровне // Современные наукоемкие технологии. — 2010. — № 3. — С. 47–48.
10. Пачурин Г.В., Курагина Т.И. Эффект режима обработки на долговечность сварных соединений // Инженерное дело, технологии и технические науки. — 2025. — № 21. — С. 4. — DOI: 10.58351/2949-2041.2025.21.4.018.
11. Седанова Е.П., Салчак Я.А. Влияние непроваров на предельные значения напряжений сварных швов контейнеров с ОЯТ // IX Международная научно-практическая конференция «Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине». — 2017. — С. 35.
12. Смирнова А.С., Власов И.В., Станкевич Р.В., Яковлев А.В., Почивалов Ю.И., Валиев Д.В., Панин С.В. Сравнение ультразвуковой ударной и импульсной механо-электрофизической обработок для модификации сварного соединения трубной стали // Сборник научных трудов. — [б. м.]: [б. и.], [б. г.]. — С. 216–217.
13. Сукиасян А.А. НАУКА И СОВРЕМЕННОСТЬ: сборник статей Международной научно-практической конференции (13 декабря 2015 г., г. Уфа). В 2 ч. Ч.2 — Уфа: РИО МЦИИ «ОМЕГА САЙНС», 2015. — 296 с.
14. Троицкий В. А. Краткое пособие по контролю качества сварных соединений / В. А. Троицкий. — Киев: НАН Украины, Институт электросварки им. Е. О. Патона, 2006. — [б. с.].