

05.23.01

E552

Контрольный
экземпляр

На правах рукописи



ЕЛСУКОВ ЕВГЕНИЙ ИГОРЕВИЧ

**МЕТОД НОРМИРОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ СПЛОШНОСТИ
СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ**

Специальности: 05.23.01 – "Строительные конструкции, здания и сооружения",
05.03.06 – "Технология и машины сварочного производства"

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск

2002

Работа выполнена на кафедре «Строительные конструкции и инженерные сооружения» Южно-Уральского государственного университета.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Рафкат Галимович Губайдулин.

Научный консультант – кандидат технических наук, доцент
Александр Кириллович Тиньгаев.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Константин Иванович Еремин;
кандидат технических наук, доцент
Алексей Васильевич Пуйко.

Ведущая организация – ЗАО «Трест Коксохиммонтаж», г. Москва.

Защита состоится «30» октября 2002 г., в 12 ч, на заседании диссертационного совета ДМ 212.298.08 в Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, главный корпус, ауд. 710.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Просим направить Ваш отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью, по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, Ученый совет.

Автореферат разослан «26» сентября 2002 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук
профессор



Трофимов Б.Я.

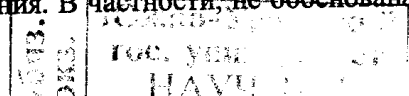
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. На территории СНГ эксплуатируется около 5 млн. тонн резервуарных конструкций, среди которых стальные вертикальные резервуары (РВС) составляют 72,6%. Фактический риск крупных аварий резервуарных конструкций вырос за последние годы в два раза, при этом тяжесть наносимого ущерба и материальные потери от аварий имеет тенденцию роста. Практика эксплуатации РВС показала, что их прочность и надежность в значительной степени определяются качеством сварных соединений. В тоже время, существующие нормы допустимых дефектов и объемы контроля не в полной мере соответствуют требованиям обеспечения надежности РВС, не отражают особенностей производства, контроля и эксплуатации сварных соединений. Все это является следствием отсутствия четкой стратегии и методологии управления надежностью сложных технических систем в сложившихся экономических условиях.

Анализируя современные концепции обеспечения работоспособного состояния сложных технических систем, отметим, что в последние годы в отечественной и зарубежной литературе основное внимание уделяется развитию концепции конструкционной безопасности, основанной на понятии приемлемого риска. Фундаментальные положения проблемы конструкционной безопасности сформулированы и рассмотрены в работах В.В. Болотина, Н.П. Мельникова, Н.А. Махутова, К.В. Фролова, В.В. Москвичева, А.М. Freudenthal, O. Ditlevsen, Hasofer & Lind. Решения проблемы конструкционной безопасности в вероятностном аспекте изложены в работах В.В. Болотина, Б.В. Гнеденко, А.Р. Ржаницына, С.А. Тимашева, В.Д. Райзера, А.М. Лепихина, P. Thoft-Cristensen, M.J. Baker, M. Matousek и др.

Для металлоконструкций резервуаров критическим видом отказа, переводящим объект в предельное состояние, является развитие трещиноподобных дефектов сварных соединений и последующее хрупкое разрушение. Предложенные в работах В.В. Панасюка, А.Е. Андрейкива, Е.М. Морозова, В.И. Махненко, D. Broek критериальные соотношения механики разрушения позволяют с достаточной для практики точностью оценивать надежность участка сварного соединения с трещиной при известных свойствах материала и нагрузке. Однако прогнозировать надежность сооружения в целом не представляется возможным из-за трудностей обнаружения и идентификации трещиноподобных сварочных дефектов, а так же высокого коэффициента вариации характеристик трещиностойкости материала.

Управление конструкционной безопасностью возможно лишь при построении критериальных уравнений предельного состояния конструкции на базе объединения вероятностной модели надежности и детерминированных соотношений механики разрушения. Предложенные на сегодняшний день методики хотя и достаточно полно охватывают некоторые теоретические аспекты проблемы оценки и управления надежностью, но не обеспечивают возможности их инженерного применения. В частности, не обоснована воз-



возможность использования статистических методов при исследовании сварочных процессов изготовления резервуаров. Не до конца решена задача идентификации дефектов сварного соединения по данным неразрушающего контроля. Отсутствие дифференциации критериальных соотношений предельного состояния на основе присущих каждому виду дефектов моделей развития процессов разрушения приводит к представлению всех дефектов в виде эквивалентных эллиптических трещин нормального отрыва, а, следовательно, и к крайней консервативности норм. Кроме того, в отличие от задачи прогнозирования надежности, задача обоснования комплекса нормативных требований к качеству сварного соединения в общем виде до сих пор не решена.

Целью настоящей работы является совершенствование системы нормативных требований к качеству сварных соединений РВС на базе аппарата теории надежности механических систем.

Научная новизна работы состоит:

- в усовершенствовании модели для оценки надежности сварного соединения с дефектом сплошности металла шва;
- в разработке алгоритма комплексного нормирования показателей качества (дефектности, механических свойств и объема неразрушающего контроля) сварных соединений РВС на базе аппарата теории надежности механических систем;
- в обосновании вероятностных моделей технологической дефектности сварных соединений РВС, изготавливаемых методом рулонирования;
- в установлении закономерностей влияния исправления дефектных участков шва на свойства металла сварного соединения.

Практическая ценность работы.

1. Получены параметры вероятностных моделей распределения дефектов для сварных соединений рулонных заготовок РВС.
2. Определены критические величины дефектности сварных соединений РВС с позиций сопротивляемости вязкому и квазихрупкому разрушению.
3. Получены уравнения зависимости ударной вязкости металла шва от количества ремонтов и температуры эксплуатации конструкции, позволяющие принимать обоснованные частные решения в реальной производственной ситуации.
4. Изучена достоверность рентгенографического контроля сварных соединений РВС, определены поправочные функции к отображению дефекта на снимке.

Внедрение. Результаты работы нашли отражение в рекомендациях по обоснованию требований к качеству сварных соединений вертикальных цилиндрических резервуаров, изготавливаемых методом рулонирования, для ЗАО «Завод Анкер» и технических условиях на изготовление резервуаров объемом 2500 и 20 000 м³ резервуарного парка НПС «Атырау» (Казахстан) нефтепровода Тенгиз – Новороссийск.

Апробация работы.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались:

- на международной научной конференции "Проблемы современного материаловедения" (Днепропетровск, ПГАСиА, 1998 г.);
- на четвертой международной научно - технической конференции "Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте" (Санкт-Петербург, ПГУПС, 1998 г.);
- на научно - технической конференции "Архитектура и строительство" (Томск, ТГАСУ, 1999 г.);
- на восемнадцатой научно - технической конференции сварщиков Урала "Сварка Урала – в XXI век" (Екатеринбург, УГТУ, 1999 г.);
- на международной научно - технической конференции "Эксплуатация, ремонт и реконструкция резервуаров для нефти и нефтепродуктов" (Самара, СамГАСА, 1999 г.);
- на девятнадцатой научно - технической конференции сварщиков Урала "Сварка – контроль. Итоги XX века" (Екатеринбург, 2000.);
- на ежегодных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава ЮУрГУ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 работ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка литературы и приложения. Работа содержит 260 страниц текста, в том числе 72 иллюстрации, 54 таблицы, 154 наименования списка литературы и 2 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность рассматриваемой темы и освещены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведена классификация РВС, изложены технология изготовления и особенности напряженно-деформированного состояния, описаны случаи аварий и разрушения резервуаров. Рассмотрены существующие подходы к расчету надежности конструкций и методы нормирования дефектности. Дан анализ действующих нормативных документов по

качеству сварных соединений, указаны существенные расхождения между ними при изготовлении конструкций одного класса.

В отличие от общестроительных металлоконструкций, резервуары относят к категории опасных объектов с потенциально высоким риском хрупкого разрушения. Это подтверждается анализом отказов РВС, при которых практически всегда складывалась неблагоприятная комбинация трех факторов: дефектное состояние, ухудшение пластических характеристик и повышенная местная нагруженность сварного соединения. Поскольку значительная доля ресурсных отказов так или иначе связана со сварными соединениями, то вполне правомерно предположить, что сварные соединения являются "критичными элементами" и работоспособность резервуара определяется состоянием именно сварного соединения. Систематические исследования по вопросу влияния технологических дефектов на прочность сварных соединений начались лишь в 40...50 гг. и были связаны с экспериментальными работами Г.А. Николаева, И.И. Макарова, В.В. Шеверницкого, Н.О. Ожерблома. Теоретические аспекты проблемы прочности сварного соединения с дефектами еще не были в должной мере освещены, поэтому вполне закономерно было принятие метода эмпирического назначения в качестве нормативного для определения требований по допустимой дефектности. Объективная потребность в пересмотре нормативных требований к качеству сварных соединений, а также интенсивное развитие прикладных разделов механики разрушения в конце шестидесятых – начале семидесятых годов определяют новый этап в решении рассматриваемой проблемы. Среди работ, опубликованных в 70-80 годах, хорошо просматриваются два направления. В трудах Г.П. Карзова, В.И. Махненко, М.В. Шахматова и В.В. Ерофеева, В.С. Гиренко, В.В. Касаткина, К.И. Еремина, Н.А. Клыкова, Р.Г. Губайдулина и А.К. Тиньгаева в качестве объекта исследования определено предельное состояние сварного соединения с дефектом, которое реализовано в детерминированном виде. Авторы предполагают, что при известном уравнении предельного состояния и входящих в него параметров процедура нормирования представляет собой решение обратной задачи относительно характерного размера дефекта с учетом соответствующего коэффициента запаса. Однако использование методов механики разрушения в практике обоснования нормативных требований сдерживается рядом объективных обстоятельств, а именно: необходимостью определения характеристик трещиностойкости сварных соединений; составлением типовых расчетных схем и правил схематизации несплошностей.

Второе направление, это в основном работы В.Н. Волченко и В.В. Касаткина, основано на том, что сплошной неразрушающий контроль на практике не всегда осуществим и нормирование дефектов сварных соединений необходимо вести с позиций вероятностной природы их появления. Положительным моментом работ В.Н. Волченко является то, что он предлагает не ограничиваться вопросом оценки работоспособности сварного соедине-

ния (эксплуатационная задача), а рассматривать его совместно с вопросом о приемлемом объеме ремонта дефектных соединений (технологическая задача).

Последние 10-15 лет исследования по нормированию дефектов сварных соединений были направлены на поиск новых решений эксплуатационной задачи. В частности, в работах В.В. Болотина, В.В. Москвичева, А.М. Лепихина, В.А. Прохорова в качестве предельного состояния сварного соединения предлагается рассматривать не характеристики прочности, а параметры надежности. Несомненным достоинством такого подхода являются объединение детерминированной и вероятностной моделей, что позволяет учитывать реальные возможности производства, а также прогнозировать поведение конструкции в целом. Однако следует отметить и недостатки предложенных моделей. Во-первых, обеспечение прочности и долговечности сварных соединений в рамках существующих методов свелось, по сути, к определению нормативных требований к технологическим дефектам. Развитие норм только в этом направлении не позволяет на практике реализовать более эффективных решений, которые могут быть получены при комплексном рассмотрении требований к дефектам сплошности металла шва, характеристикам механических свойств, виду подготовки кромок, способу и технологии сварки. Во-вторых, не принимается во внимание такой мощный и отлаженный инструмент, как неразрушающий контроль, достоверность которого обязательно следует учитывать, поскольку оценить можно только то, что обнаружено. В третьих, выявленные дефектные участки швов в существующих моделях автоматически заменяются годными, хотя опыт проведения ремонтных работ говорят о повышенном риске возникновения на данных участках локальных разрушений за счет снижения пластичности шва. Таким образом, для корректного нормирования показателей качества сварного соединения РВС необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать общие принципы, методику и алгоритм расчетного обоснования нормативных требований к технологическим дефектам, характеристикам механических свойств и объему неразрушающего контроля сварных соединений РВС по показателям их надежности.
2. Разработать критериальные уравнения предельного состояния сварного соединения с дефектом из условия прочности.
3. Исследовать статистические данные о параметрах технологической дефектности сварочных процессов при изготовлении РВС, разработать вероятностные модели показателей дефектности.
4. Исследовать влияние ремонтных работ на механические свойства металла сварного соединения.
5. Разработать рекомендации по нормированию требований к механическим свойствам, дефектности и объему неразрушающего контроля сварных соединений на основе решения критериальных уравнений прочности и надежности сварного соединения с дефектом.

Вторая глава посвящена разработке критериальных уравнений предельного состояния сварного соединения с дефектом в вероятностной и детерминированной постановке, а также метода нормирования дефектности по заданной надежности сооружения и известным параметрам технологического процесса сварки.

При проектировании РВС вполне приемлем вероятностно - детерминистический подход, который в общем случае можно представить в виде:

$$\begin{cases} P(a_c) \geq R_n \\ \sigma(a_c) \leq \sigma_c \end{cases} \quad (1)$$

где $P(a_c)$ – вероятность отсутствия в сварном соединении технологических дефектов больше критической величины; R_n – нормативное значение надежности сварного соединения; $\sigma(a_c)$ – величина растягивающих напряжений действующих в сварном соединении; σ_c – величина разрушающих напряжений.

Для разработки вероятностной модели надежности сварного соединения в качестве базовой принята модель В.В. Болотина, которая основана на пуассоновских свойствах потока дефектов в процессе сварки. В развитие модели предложено разделять неконтролируемые, контролируемые и подвергнутые ремонту участки сварного соединения, при этом взаимодействие участков сварного шва соответствует схеме с последовательным соединением элементов и его надежность можно рассчитать по формуле

$$P(a_c) = P_{nc} P_c P_{cr} \quad (2)$$

где P_{nc} , P_c , P_{cr} – вероятность неоявления дефектов критического размера на каждом из вышеперечисленных участков.

Регламентируя процедуру ремонтно-восстановительных работ, можно принять $P_{cr} = P_c$ и включить исправленные участки сварного шва в состав проконтролированных бездефектных, тогда вероятность отсутствия на проконтролированных участках шва недопустимых дефектов после разбраковки снимка связана, в основном, с достоверностью используемого метода контроля, которую можно выразить через условную вероятность обнаружения дефекта размером больше a_c , при условии, что он точно есть на контролируемом участке – $P(D/a_c)$. Если учитывать объем контролируемых участков V в относительных единицах, то получим выражение для надежности сварного соединения в виде вероятности отсутствия в нем дефектов больше критической величины:

$$P(a_c) = \exp - \sum_{i=1}^n \left[\frac{\mu_{o,i} (1 - V \cdot P(D/a_{c,i}))}{M_0} \int \int_{M a_{c,i}}^{\infty} f(a_{c,i}) da dM \right], \quad (3)$$

где $P(a_{c,i})$ – надежность при критическом размере дефекта $a_{c,i}$, M – мера длины шва, μ_0 – интенсивность потока дефектов, $f(a_{c,i})$ – плотность распределения размеров дефектов типа i .

При оценке несущей способности сварных соединений резервуаров с обнаруженными дефектами наиболее удобной для инженерной практики является возможность определения предельной величины номинальных напряжений. Решение задачи сводится к установлению связи между предельной характеристикой материала в окрестности концентратора напряжений и соответствующей этому моменту величиной номинального напряжения в стенке резервуара и может быть найдено исходя из анализа НДС в окрестности концентратора напряжений. На основании работ С.И. Губкина, М.В. Сторожева и В. Вейса получена зависимость между номинальными напряжениями и интенсивностью упругопластических напряжений в зоне предразрушения:

$$\sigma_n = \frac{\sigma_i}{3K^{2m/(1+m)}} \left[\frac{3 - \nu_\sigma}{\sqrt{3 + \nu_\sigma^2}} + \Pi \right], \quad (4)$$

где σ_i – интенсивность напряжений, m – коэффициент деформационного упрочнения, K_i – коэффициент концентрации напряжений в упругой области, ν_σ – показатель Лоде, Π – показатель жесткости напряженного состояния.

Определение критических напряжений для различных схем напряженного состояния при упругопластической работе материала представляет значительные сложности, поэтому предпочтительнее в качестве предельной характеристики материала использовать интенсивность упругопластических деформаций. Данный деформационный критерий разрушения, как показано в работах А.С. Куркина, может быть использован для описания хрупкого, вязко-хрупкого и вязкого разрушения. Выразив интенсивность напряжений через интенсивность деформаций и определив, опираясь на работу В.Т. Трошенко, локальный предел текучести, выражение (4) для предельного случая, когда $\varepsilon_i = \varepsilon_c$, примет вид

$$\sigma_c = \frac{(C\sigma_i)^{1-m} E^m \varepsilon_c^m}{3K^{2m/(1+m)}} \left[\frac{3 - \nu_\sigma}{\sqrt{3 + \nu_\sigma^2}} + \Pi \right], \quad (5)$$

где ε_c – критическая деформация, определяемая согласно работе А.К. Тиньгаева и Е.А. Пожидаева по выражению

$$\varepsilon_c(\Pi) = \ell n(1 - \psi)^{-1} \exp \left[\frac{\ell n \Delta}{2\Pi_{кр}} (\Pi - 1) \right]. \quad (6)$$

Расхождение между экспериментальными и расчетными значениями разрушающих напряжений, в среднем, составляет 10%, причем во всех случаях последние являются нижней границей экспериментальных значений разрушающих напряжений, что позволяет рекомендовать его для расчета σ_c .

В работе показано, что наиболее эффективное решение задачи нормирования показателей качества сварного соединения заключается в регламентации требований к материалу при установившемся стабильном технологическом процессе. Решая выражение (3) относительно a_c , можно получить критический размер дефекта, вероятность превышения которого при заданных параметрах технологии не выше требуемой, т.е. надежность соединения не ниже нормативной. Прочность сварного соединения в этом случае обеспечивается за счет регламентации пластических свойств, в частности ударной вязкости и относительного сужения металла шва:

$$a_v = \frac{(1 - \nu^2) \cdot K_I^2}{2k \cdot E \cdot [1 - (\sigma_n / \sigma_c)^4]}, \quad (7)$$

$$\psi_c = 1 - \frac{1}{\exp(\varepsilon_c)}, \quad (8)$$

где a_v – ударная вязкость, K_I – коэффициент интенсивности напряжений, k – безразмерный коэффициент пропорциональности, ε_c – критическая деформация, рассчитываемая по формуле

$$\varepsilon_c = \sqrt[m]{\frac{3\sigma_n(t - a_c)K^{2m/(1+m)}}{\sigma_t^{1-m} t E^m C^{1-m} \left(\frac{3 - \nu_\sigma}{\sqrt{3 + \nu_\sigma^2}} + \Pi \right)}}, \quad (9)$$

Сложность использования подобной методики связана с трудностью фактического обеспечения расчетных свойств металла шва при реальном производственном процессе. Наиболее приемлемым в сложившихся условиях производства является подход, связанный с нормированием критического размера дефекта (глубины непровара и диаметра включения) при известных номинальных напряжениях и гарантированных механических свойствах металла шва:

$$a_c = t \left[1 - \frac{3\sigma_n t K^{2m/(1+m)}}{(C\sigma_t)^{1-m} E^m \varepsilon_c^m \left(\frac{3 - \nu_\sigma}{\sqrt{3 + \nu_\sigma^2}} + \Pi \right)} \right] \quad (10)$$

В случае необходимости определения длины трещиноподобного дефекта можно воспользоваться известным соотношением механики разрушения.

При регламентации показателей дефектности сварных соединений следует различать их критические и нормативные значения. Нормативное значение показателя дефектности должно выполнять не только функцию критерия предельного состояния, включающего необходимые коэффициенты запаса, но и быть интегральным показателем состояния технологического процесса. Оно является "браковочным" критерием не для конкретного снимка, а для партии продукции в целом и может определяться из соглашения между поставщиком и потребителем с учетом допустимых рисков.

В третьей главе приведены результаты исследования управляемости процессов сварки рулонных заготовок РВС, достоверности радиографического контроля, структуры технологической дефектности сварных соединений.

Проведена проверка однородности техпроцессов. Выявлено, что необходима дифференциация процессов по маркам стали и толщинам. Анализ стабильности процессов производился в соответствии с требованиями ГОСТ 50779.42, 50779.44 с помощью контрольных карт Шухарта.

Установлено, что в целом техпроцесс сварки рулонных заготовок находится в управляемом состоянии, но для корректного применения вероятностных методов нормирования дефектности необходимо наличие на предприятии-изготовителе действующей системы качества.

Для повышения надежности оценки состояния процессов и разбраковки выявляемых дефектов производилась оценка достоверности радиографического контроля. С целью учета влияния на выявляемость как глубины, так и ширины раскрытия дефекта был изготовлен канавочный эталон, разработанный в ЦНИИПроектстальконструкции им. Мельникова, который использовался при просветке образцов с искусственно смоделированными дефектами.

Просвеченные образцы подвергались вскрытию и шлифовке, после чего со снимков и с проявившихся на шлифе дефектов снимались их геометрические характеристики. Сравнению подвергались следующие пары выборок: глубина непровара, определенная по эталону ГОСТ 7512-82 и эталону ЦНИИПСК, глубина непровара, определенная по эталонам и по результатам вскрытия, длина непровара и диаметр пор по снимку и по результатам вскрытия. Установлено, что статистически значимое отличие наблюдается только между длиной непровара, определенной по снимку и по результатам вскрытия.

Методом регрессионного анализа подобрана линейная модель зависимости между истинной и видимой при контроле длиной непровара, имеющая наилучшую статистику R^2 в сравнении с квадратичной или логарифмической моделями:

$$l \approx 0.985 + 1.04 * l(D), \quad (11)$$

где $l(D)$ – длина непровара на снимке.

Для практического применения методов оценки надежности и нормирования дефектов, разработанных во второй главе, необходимо изучить состав и структуру технологической дефектности сварных соединений. Установлено, что преобладающим видом дефекта для данного процесса являются поры и шлаковые включения (табл. 1, табл. 2), непровары и подрезы встречаются достаточно редко, а появление трещины есть исключительное событие.

Таблица 1

Результаты анализа состояния дефектности сварных стыковых соединений РВС, выполненных авт. сваркой под слоем флюса

Марка стали	Толщина, мм	Среднее число дефектов, шт./к.уч	Число дефектов по видам, шт./к.уч.			
			A	B	D	F
СтЗсп	4-6	1.1	0.95	0.1	0.03	0.02
	8-12	0.41	0.21	0.14	0.06	—
09Г2С	4-6	0.88	0.75	0.08	0.04	0.01
	8-12	0.45	0.26	0.15	0.014	0.018

Примечания: А – поры, В – включения, D – непровары, F – подрезы.

Таблица 2

Размеры обнаруженных дефектов

Вид дефекта	Среднее, мм	Наименьший размер, мм	Наибольший размер, мм	Стандарт, мм
Пора (А)	0.64	0.4	2	0.24
Включение (В)	2.5	0.4	12.5	2.4
Непровар (D)	26.5	3	100	26.1

Распределение междефектных расстояний на достаточно высоком уровне значимости сходится к экспоненциальному, что является достаточно сильным подтверждением правильности принятой во второй главе предпосылки о пуассоновском характере потока дефектов.

Для расчета надежности сварного соединения массивы данных по размерам выявленных дефектов аппроксимировались теоретическими распределениями. Статистическими критериями установлено, что диаметры и площади пор и шлаковых включений достаточно сложно описать каким-либо из известных типов распределений, в связи с чем целесообразно произвести консервативную оценку, например, логарифмически нормальным распределением (рис. 1). Длина трещиноподобного дефекта типа непровар достаточно хорошо описывается как логарифмически нормальным, так и экспоненциальными распределениями (рис. 2).

При сравнении "хвостов" распределений выявлено, что использование логарифмически нормального распределения, дает более консервативную

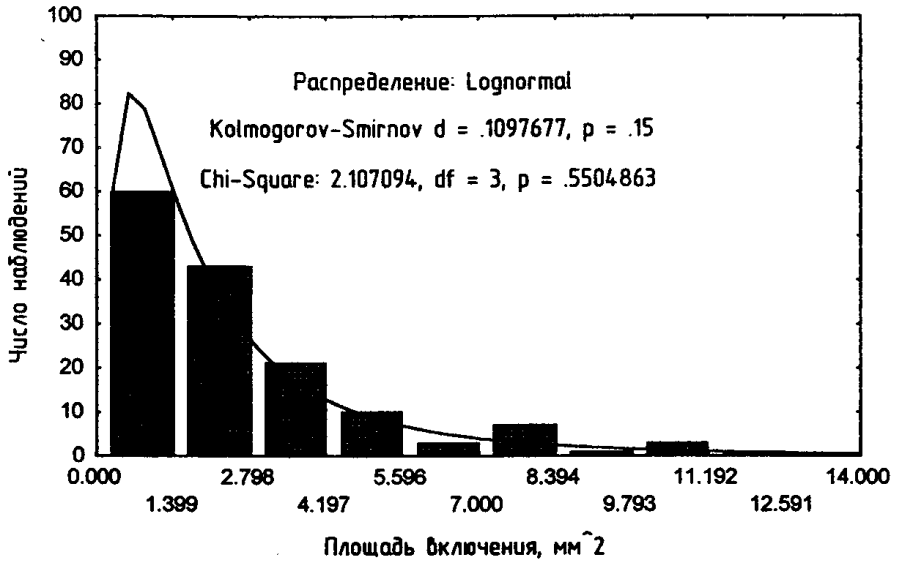


Рис. 1. Аппроксимация площадей включений логарифмически нормальным распределением

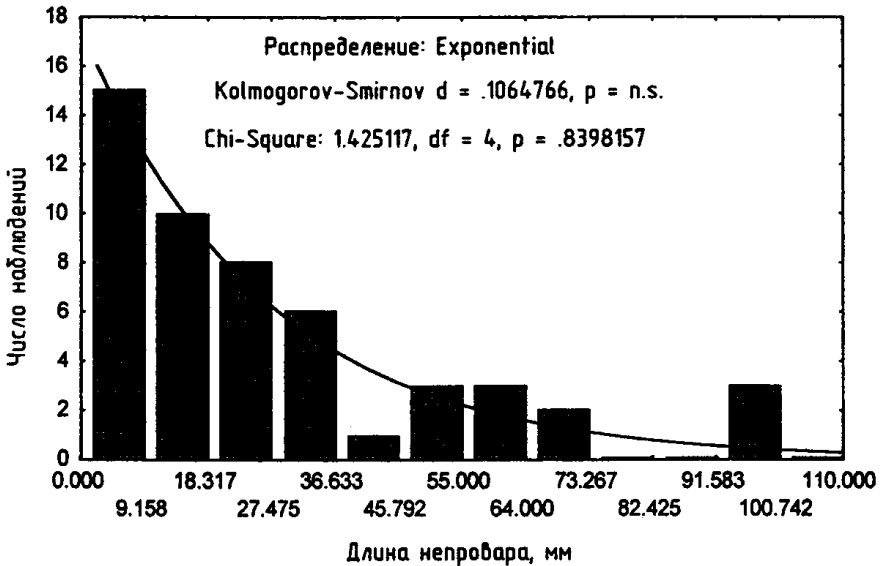


Рис. 2. Аппроксимация длины непровара экспоненциальным распределением

оценку. Параметры всех распределений, аппроксимирующих геометрические характеристики дефектов, представлены в таблице 3.

Таблица 3.

Параметры аппроксимирующих распределений для сварочных дефектов

Вид дефекта	Тип распределения	Параметры
Диаметр пор	Lognorm (μ, σ)	(0.51; 0.11)
Длина включений	Exponent (λ)	(0.45)
Площадь включений	Lognorm (μ, σ)	(0.51; 0.87)
Глубина непровара	Lognorm (μ, σ)	(0.01; 0.24)
Длина непровара	Exponent (λ)	(0.038)
Длина непровара	Lognorm (μ, σ)	(2.81; 1.02)
Междефектные расстояния	Exponent (λ)	(0.12)
Количество дефектов	Exponent (λ)	(0.29)

Показано, что корректное использование результатов исследования технологической дефектности возможно только в комплексе с оценкой стабильности процесса, поскольку среднее число дефектов на контрольном участке, принятое многими авторами за показатель "качества" процесса, не является достаточной характеристикой для сравнения и управления процессом и сильно зависит от объема выборки. Наименее "засоренный" процесс может оказаться неуправляемым и рассчитанные для него нормативные требования к дефектам и объемам выборочного контроля не гарантируют надежность конструкции в эксплуатации.

Четвертая глава посвящена результатам экспериментального исследования влияния технологических операций при ремонте дефектных участков сварного шва на механические свойства сварного соединения.

Негативное влияние исправления дефектных участков на надежность сварного соединения известно уже давно (А.С. Волков, В.И. Панов, В.А. Батманов и др.), однако количественное оценивание снижения трещиностойкости сварного шва РВС после проведения ремонта до сих пор не производилось. Для оценки этого снижения были выполнены испытания на ударную вязкость заваренных и отремонтированных по типовой технологии сварных соединений разной толщины и марки стали при климатических температурах. План эксперимента типа B_k представлен в таблице 4.

Обработка результатов показала, что на величину ударной вязкости значимо влияют эффект температуры, а также линейный и квадратичный эффекты ремонта. Получены уравнения для прогнозирования снижения ударной вязкости от количества проведенных ремонтов при температуре эксплуатации, где температура (T) в градусах Цельсия, а ремонты (R) в раз:

$$KCV_{12} = 0.428 + 4.32 \cdot (T + 20) - 0.36 \cdot (R - 2) + 0.025 \cdot (R - 2)^2; \quad (12)$$

$$KCV_6 = 0.489 + 4.0 \cdot (T + 20) - 0.4 \cdot (R - 2) + 0.02 \cdot (R - 2)^2. \quad (13)$$

Значения уровней факторов

№	Фактор	X_i	F_i
1	Температура	-40	-1
		-20	0
		0	1
2	Число ремонтов	0	-1
		2	0
		4	1

Сравнение между собой зависимостей коэффициента снижения ударной вязкости от температуры и числа ремонтов, полученных для разных толщин, показало, что влияние ремонтных работ неодинаково для металла разной толщины и более опасно для резервуаров, изготовленных из стали Ст3сп5 толщиной 5-6 мм.

На основании проведенных исследований по изменению ударной вязкости, а также прочности при растяжении и пластичности при статическом изгибе рекомендовано проведение не более двух ремонтов одного участка шва.

В пятой главе выявлены факторы, наиболее сильно влияющие на надежность резервуара, произведен расчет критических размеров дефектов для рулонизируемых РВС из условий прочности и надежности, изложен метод и приведен пример определения нормативного размера дефекта по имеющемуся объему контроля и требуемой достоверности оценки уровня качества процесса, проанализированы действующие нормативные документы на изготовление резервуаров с точки зрения их удобства для производителя, предложены новые нормативные требования к показателям дефектности сварных соединений РВС, обоснованы необходимость аттестации и управления технологическими процессами в рамках внедрения Системы Качества на предприятии – изготовителе резервуаров.

Для выявления факторов, оказывающих значимое влияние на надежность сварного соединения резервуара, был проведен дисперсионный анализ надежности типового резервуара объемом 2000 м^3 по критериальному уравнению (3), в котором в качестве предельного состояния принято достижение хотя бы одним дефектом критического размера. Установлено, что на надежность сварного соединения резервуара достаточно сильное влияние оказывают интенсивность потока дефектов и свойства материала (рис. 3), представленные через критический размер дефекта.

Как и следовало ожидать, надежность соединения падает с увеличением числа дефектов и повышается с ростом их критической длины. Увеличение объема неразрушающего контроля в два раза относительно нормативного не оказывает значимого влияния на надежность резервуара, однако при

Main Effects Plot for Reliab

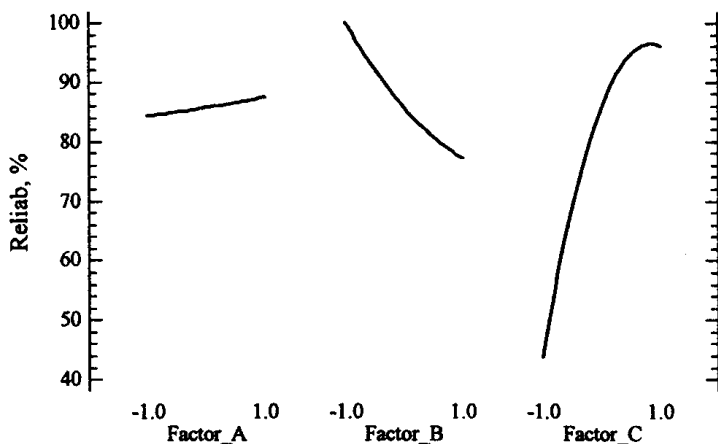


Рис. 3. График главных эффектов: "А" – объем контроля, "В" – интенсивность потока дефектов, "С" – критическая величина дефекта

уменьшении критического размера дефекта это влияние несколько увеличивается. Это связано с тем, что при уменьшении критического размера дефекта увеличивается математическое ожидание количества дефектов, а, следовательно, и значимость неразрушающего контроля как фактора отбраковки дефектных участков.

При разной критической длине дефекта наблюдается отличие во влиянии количества дефектов на надежность резервуара. В частности, при большом критическом размере дефекта увеличение их количества практически не влияет на надежность резервуара, а при малом размере, т.е. низкой трещиностойкости материала, влияние качества технологического процесса становится решающим.

С целью определения критических размеров дефектов было проанализировано напряженно-деформированное состояние сварных соединений РВС. Показано, что для расчета $\varepsilon_c(II)$ напряженное состояние в стенке резервуара можно считать одноосным, поскольку второе главное напряжение является сжимающим, что способствует снижению жесткости напряженного состояния.

При оценке локального напряженного состояния в окрестности дефекта показатели концентрации, жесткости и вида напряженного состояния были получены на основании результатов работ А.И. Лурье и В.И. Оботурова и вошли в выражение (10) для определения критического размера дефекта. Если принять, что предельным состоянием для сварного соединения с порами является момент образования макротрещины на контуре поры, то выражение (10) примет вид:

$$d = t \left[1 - \frac{\sigma_n (\sigma_t / \sigma_t) (2,04)^{2m/(1+m)}}{\sigma_t^{1-m} E^m \varepsilon_c^m} \right]. \quad (14)$$

Для непровара, разрушение от которого происходит в две стадии, предельная глубина определится как:

$$d = t \left[1 - \frac{5\sigma_n (\sigma_t / \sigma_t) (62)^{2m/(1+m)}}{3(2,5\sigma_t)^{1-m} E^m \varepsilon_c^m} \right]. \quad (15)$$

Учитывая рекомендации ПБ 03-381-00 по выбору сталей и температурному диапазону их применения, на основании (14) и (17) получены расчетные зависимости предельных размеров дефектов от величины номинальных напряжений в стенке резервуара:

Предельные диаметры пор:

$$\begin{aligned} d &= t [1 - 0,002\sigma_n] - \text{СтЗсп, } -40^\circ \text{С} \\ d &= t [1 - 0,003\sigma_n] - \text{09Г2С, } -70^\circ \text{С} \end{aligned} \quad (16)$$

Предельная глубина непровара:

$$\begin{aligned} h &= t [1 - 0,004\sigma_n] - \text{СтЗсп, } -40^\circ \text{С} \\ h &= t [1 - 0,005\sigma_n] - \text{09Г2С, } -70^\circ \text{С} \end{aligned} \quad (17)$$

Предельная длина непровара:

$$\ell = \frac{2409}{\sigma_n^2}, \quad -\text{СтЗсп, } -40^\circ \text{С, } \text{09Г2С, } -70^\circ \text{С.} \quad (18)$$

Точность полученных решений проверялась путем сравнения расчетных разрушающих напряжений для образцов с известной геометрией дефекта с результатами экспериментальных работ Л.А. Копельмана и А.Р. Даффи. Отклонения расчетных значений от экспериментальных данных не превышают 3%. Такая высокая точность, скорее всего, обусловлена небольшим объемом экспериментальных выборок, но она однозначно подтверждает пригодность предложенных критериальных уравнений для инженерных расчетов.

На основании предложенных критериальных уравнений прочности (16, 17, 18) и надежности (3) сварного соединения с дефектом рассчитаны предельные значения геометрических характеристик внутренних дефектов для типовых проектов рулонизируемых резервуаров, изготавливаемых по действующим нормативным документам.

Для определения оптимальной структуры нормативного документа были проанализированы потоки забракованных участков шва по действующим отечественным и зарубежным нормам. Показано, что при разбраковке по всем рассмотренным документам есть признаки неуправляемости процессов, что связано с ярко выраженным уклоном в сторону ужесточения требований к какому-либо виду дефекта в каждом из рассмотренных документов. Предложено сформировать новые требования к качеству сварных

Категории ответственности сварных соединений РВС

Категории ответственности сварных соединений рулонных полотнищ стенки резервуара III-го класса ответственности по ПБ 03-381-00.			
Зона стенки резервуара	III	II	I
Вертикальные сварные соединения			
а) 1, 2 пояса	–	–	+
б) 3, 4 пояса	–	+	–
в) остальных поясов	+	–	–
Горизонтальные сварные соединения между поясами:			
а) 1 – 3	–	+	–
б) 3 – 5	+	–	–
в) остальными	+	–	–

Таблица 6

Рекомендуемые параметры дефектности сварных соединений РВС

Наименование дефекта	Регламентируемый параметр	Пределы допустимой дефектности по категориям ответственности		
		III	II	I
Пористость и газовые поры	Максимальный размер совокупности спроецированных зон с порами	4 %	2 %	1 %
	Максимальный размер поры для: – стыковых швов – угловых швов но не более	$d \leq 0,5 s$ $d \leq 0,5 a$ 5 мм	$d \leq 0,4 s$ $d \leq 0,4 a$ 4 мм	$d \leq 0,3 s$ $d \leq 0,3 a$ 3 мм
Твердые включения (кроме медных)	Максимальный размер ширины (высоты) короткого включения для: – стыковых швов – угловых швов но не более	$h \leq 0,5 s$ $h \leq 0,5 a$ 4 мм	$h \leq 0,4 s$ $h \leq 0,4 a$ 3 мм	$h \leq 0,3 s$ $h \leq 0,3 a$ 2 мм
	Непровары	Глубина Длина	$h \leq 0,5 s$ 80 мм	$h \leq 0,3 s$ 50 мм
Обозначения принятые в табл.5: s – толщина стыкового шва; a – толщина углового шва, равная $k / \sqrt{2}$, где k – катет углового шва.				

соединений РВС на основе решения уравнений прочности и надежности. Для этого целесообразно, аналогично ГОСТ 23118-99 и ASME Section VIII, ввести категории ответственности сварных соединений (табл. 5, табл. 6).

На основании проделанной работы по комплексному изучению технологической дефектности и влияющих на нее факторов указывается на необходимость предварительной аттестации сварочных процессов, показывающей принципиальную возможность обеспечения Изготовителем расчетно-обоснованных нормативных требований к качеству сварных соединений резервуаров. Приведены примеры зарубежных и отечественных нормативных документов других отраслей промышленности, в которых успешно реализованы требования к аттестации сварочных процессов и на базе которых целесообразна разработка правил аттестации технологии изготовления резервуаров. Обращено внимание на необходимость внедрения методов управления процессами, которое позволит поддерживать на должном уровне продемонстрированные во время аттестации возможности по обеспечению качества конструкций резервуара.

Практическая реализация результатов настоящей работы состоит в разработке рекомендаций по обоснованию требований к качеству сварных соединений вертикальных цилиндрических резервуаров, изготавливаемых методом рулонирования, для ЗАО «Завод Анкер», которые уже были успешно использованы в технических условиях на изготовление резервуаров объемом 2500 и 20000 м³ резервуарного парка НПС «Атырау» (Казахстан) нефтепровода Тенгиз – Новороссийск.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Вертикальные цилиндрические резервуары относятся к объектам повышенной опасности, разрушение которых связано с большими экономическими и экологическими последствиями. Высокая интенсивность отказов резервуаров, основным видом которых является развитие трещин, связана с несовершенством действующих нормативных требований к качеству сварных соединений.

2. Установлено, что несовершенство действующих нормативных документов вызвано противоречием между вероятностной природой технологической дефектности и детерминированным характером действующих методов расчета допустимых параметров дефектов, свойств металла шва и объемов неразрушающего контроля.

3. Для снятия этого противоречия усовершенствован алгоритм оценки надежности сварных соединений рулонизируемых резервуаров на основе аппарата теории надежности механических систем, разработана методика нормирования показателей технологической дефектности и механических свойств сварных соединений по заданному уровню надежности резервуара.

4. Проведен статистический анализ качества сварки на заводах резервуарных конструкций. Установлено, что поток дефектов в процессе сварки

подчиняется закону Пуассона, преобладающим видом дефектов являются поры и шлаковые включения. Трещины при соблюдении технологии не возникают. В целом технологический процесс производства рулонных заготовок является установившимся и может управляться статистическими методами. Геометрические характеристики дефектов аппроксимированы теоретическими распределениями, что позволяет производить расчет надежности и нормирование показателей качества сварного соединения по разработанной методике.

5. Исследована достоверность радиографического контроля рулонных заготовок. Выявлено, что достоверность выявления трещиноподобных дефектов зависит от длины дефекта. Получена зависимость реальной длины непровара от видимого на снимке изображения. Показано, что для нетрещиноподобных дефектов результаты радиографического контроля обычно превышают размеры вскрытых дефектов, поэтому разбраковка идет в запас прочности.

6. Получена регрессионная зависимость снижения ударной вязкости сварного соединения от числа произведенных ремонтных работ. Установлено, что уже после 2-го ремонта пластичность шва существенно понижается, что должно учитываться жесткой регламентацией технологии ремонтных работ.

7. Исследовано влияние конструктивно - технологических факторов на надежность сварных соединений резервуара. Установлено, что наибольшее влияние на уровень надежности оказывают показатели технологической дефектности; увеличение объема неразрушающего контроля в пределах, не вызывающих удорожания резервуара, слабо влияет на его надежность.

8. Проведен расчет критических размеров дефектов сварных соединений типовых резервуаров из условий прочности и надежности. Предложены новые значения нормативных требований к характеристикам дефектов, в большей степени удовлетворяющие требованиям Заказчика и Изготовителя резервуара.

9. На основании комплексного изучения показателей дефектности, механических свойств и процедур неразрушающего контроля сварных соединений резервуаров показана необходимость проведения аттестации процессов сварки и внедрения методов управления процессами на базе стандартов серии ISO-9000.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Определение требований к ударной вязкости конструкционных сталей. / Губайдулин Р.Г., Тиньгаев А.К., Елсуков Е.И., Пожидаев Е.А // Тез.

- докл. международной науч.-техн. конф. "Проблемы современного материаловедения". – Днепропетровск: ПГАСА, 1998.
2. Определение коэффициентов интенсивности напряжений для трещиноподобных дефектов двусторонних стыковых сварных соединений. / Губайдулин Р.Г., Тиньгаев А.К., Елсуков Е.И., Пожидаев Е.А // Тез. докл. IV международной науч.-техн. конф. "Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте". – Санкт-Петербург, 1999.
 3. Учет влияния эксплуатационно-технологических воздействий при определении критического коэффициента интенсивности напряжений / Губайдулин Р.Г., Тиньгаев А.К., Елсуков Е.И., Пожидаев Е.А. // Тез. докл. науч.-техн. конф. "Архитектура и строительство". – Томск, 1999.
 4. К вопросу о нормировании дефектов сварных соединений / Губайдулин Р.Г., Тиньгаев А.К., Елсуков Е.И., Пожидаев Е.А. // Сварка Урала – в XXI век: Тез. докл. 18 науч. -техн. конф. сварщиков Урала. – Екатеринбург, 1999.
 5. Обеспечение сопротивления хрупкому разрушению сварных соединений вертикальных резервуаров / Губайдулин Р.Г., Тиньгаев А.К., Елсуков Е.И., Пожидаев Е.А. // Эксплуатация, ремонт и реконструкция резервуаров для нефти и нефтепродуктов: Тез. докл. международной науч.-техн. конф. – Самара: СамГАСА, 1999. –С.15.
 6. Тиньгаев А.К., Губайдулин Р.Г., Елсуков Е.И. // Особенности вероятностного подхода при нормировании технологических дефектов сварных соединений // Сварка –контроль. Итоги XX века: Тез. докл. 19 науч.-техн. конф. сварщиков Урала. – Екатеринбург, 2000.
 7. Совершенствование нормативных требований к качеству сварных соединений стальных конструкций. Сообщение 1. Состояние проблемы. / А.К. Тиньгаев, Р.Г. Губайдулин, Е.И. Елсуков// Сварочное производство.– 2000. – №11. – С. 30–34.
 8. Совершенствование нормативных требований к качеству сварных соединений стальных конструкций. Сообщение 2. Классификация сварных соединений и нормирование их технологических дефектов. / А.К. Тиньгаев, Р.Г. Губайдулин, Е.И. Елсуков// Сварочное производство.– 2000. – №12. – С. 24–28.
 9. Совершенствование нормативных требований к качеству сварных соединений стальных конструкций. Сообщение 3. Определение требований к характеристикам механических свойств. / А.К. Тиньгаев, Р.Г. Губайдулин, Е.И. Елсуков// Сварочное производство.– 2001. – №3. – С. 18–25.