

На правах рукописи

Насонов Виктор Андреевич

**ОЦЕНКА ДОПУСТИМОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СОСУДОВ ДАВЛЕНИЯ
С ДЕФЕКТАМИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

Специальность 05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2015

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
ЗАХАРОВ Михаил Николаевич,
МГТУ им. Н.Э.Баумана, заведующий кафедрой

Официальные оппоненты: доктор технических наук (05.02.10)
ДУБРОВСКИЙ Владимир Анатольевич,
НПП «ВЕЛД», директор

кандидат технических наук (05.02.10)
Пономарева Ирина Николаевна,
НУЦ «Качество», заместитель директора

Ведущая организация: **ФГБОУ ВПО «Донской государственный
технический университет»**

Защита диссертации состоится «26» ноября 2015 года в 14:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.01 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим выслать на имя ученого секретаря диссертационного совета по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>

Телефон для справок: (499) 267-09-63

Автореферат разослан «___»_____2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д. т. н., доцент

А.В. Коновалов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. При диагностическом обследовании эксплуатируемого оборудования нефтегазовых производств нередко случаи выявления сварочных дефектов нетрещиноподобного типа (газовые и твердые неметаллические включения), размеры которых превышают нормативно допустимые. Как правило, причинами такого несоответствия является ужесточение требований регламентирующей документации в ходе ее совершенствования, а также обнаружение дефектов в местах, ранее не подвергаемых контролю. В подобном случае для руководителей на местах встает непростая проблема принятия решения о возможности дальнейшей эксплуатации объекта, ведь, несмотря на наличие в изделии недопустимого дефекта, имеет место факт безотказной работы конструкции с момента начала ее эксплуатации.

Традиционно принятие решения о допустимости дефекта осуществляется путем сравнения его размеров с нормативно установленными предельными значениями. Так, применительно к сосудам, работающим под давлением, внутренние несплошности металла сварного шва гладкой формы размерами выше нормативных допусков строго неприемлемы для конструкции и должны быть устранены. Однако проблема заключается в том, что на сегодняшний день для оценки допустимости сварочного дефекта на эксплуатируемом оборудовании применяются те же жесткие нормы, что и при его изготовлении. Эти технологические нормы не учитывают влияние дефекта на прочностную надежность сварного соединения и установлены исходя из существующего уровня развития сварочного производства и средств неразрушающего контроля. Очевидно, что взамен консервативного принятия решения по отбраковке конструкции с дефектом целесообразнее будет применить некоторую дифференцированную оценку ее прочности. Результатами такой оценки могут стать предписания по ограничению рабочей нагрузки для аппарата, назначение дополнительного периодического контроля дефектной зоны, и как следствие отказ от проведения затратных ремонтно-восстановительных работ в условиях действующего производства, когда простой аппаратуры влечет за собой немалые убытки.

Вопросы оценки прочности и проблемы нормирования дефектности в отношении сварных соединений рассматриваются в работах следующих исследователей: Бакши О.А., Винокуров В.А., Волченко В.Н., Ерофеев В.В., Карзов Г.П., Коновалов Н.Н., Куркин С.А., Леонов В.П., Лепихин А.М., Лукьянов В.Ф., Макаров И.И., Марголин Б.З., Николаев Г.А., Шахматов М.В. и др.

Цель работы – разработка метода оперативной оценки допустимости дальнейшей эксплуатации сосудов давления со сварочными дефектами размером выше нормативно допустимого.

Задачи исследования:

- провести комплексный анализ возможных повреждений и существующих методов контроля сварных соединений на действующем оборудовании;
- рассмотреть существующие подходы в области нормирования дефектности оборудования нефтегазохимии и выявить их недостатки;
- провести экспериментальные исследования прочности сварных соединений с дефектом гладкой формы в металле шва;
- разработать критерий разрушения сварных соединений при наличии нетрещиноподобного дефекта в металле шва;

- разработать алгоритм оценки допустимости сварочного дефекта на действующем оборудовании.

Научная новизна:

- разработана методика и проведено экспериментальное моделирование поведения сварных соединений с внутренними сварочными дефектами гладкой формы при критических нагрузках;

- получены новые экспериментальные данные о сравнительной прочности основного металла и сварного шва для наиболее часто используемой в производстве сварных сосудов давления низколегированной стали 09Г2С;

- предложен алгоритм перехода от дефекта произвольной формы к эквивалентной трещине, позволяющий достаточно точно выполнить оценку прочности сварного соединения с дефектом по двухпараметрическому критерию механики разрушения;

- путем проведения численного эксперимента (с использованием МКЭ) определен характер распределения напряжений в зоне дефекта на момент разрушения сварного соединения и получен рабочий критерий разрушения, позволяющий оперативно оценить работоспособность оборудования со сварочным дефектом на этапе эксплуатации.

Теоретическая значимость работы заключается в доказанной необходимости совершенствования методических подходов при оценке технического состояния оборудования, поскольку проведенные эксперименты показали консервативность существующих норм допустимой дефектности, применяемых на этапе эксплуатации оборудования.

Практическая значимость данной работы состоит в том, что основным ее результатом является разработанная методика оперативной оценки возможности дальнейшей эксплуатации оборудования при выявлении на нем сварочного дефекта, размер которого превосходит существующие нормативные допуски.

Методология проводимых исследований заключалась в проведении серии экспериментов по разрушению сварных соединений с реальными дефектами с целью установления общих закономерностей прочности таких соединений и в последующем численном анализе напряженно-деформированного состояния моделей испытанных образцов при экспериментально определенной разрушающей нагрузке. Совместное применение этих двух методов исследования позволяет произвести не только качественную, но и количественную оценку прочности сварного соединения с дефектом и, в конечном итоге, получить соответствующую аналитическую зависимость в универсальном виде.

Достоверность результатов исследования вытекает из обоснованности использованных теоретических положений и математических методов, подтверждена численными экспериментами по оценке сходимости и точности разработанных алгоритмов, а также сравнительным анализом расчетных результатов с экспериментальными данными.

Апробация результатов исследования осуществлялась путем их регулярного представления в виде докладов на научных конференциях: 66-ой Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ - 2012» (г. Москва, 2012г.); 67-ой Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ - 2013» (г. Москва, 2013г.); 68-ой Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ - 2014» (г. Москва, 2014г.); X-ой Всероссийской конференции молодых

ученых, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности» (г. Москва, 2013г.); IX-ой Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России» (г. Москва, 2012г.); X-ой Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России» (г. Москва, 2014г.). Результаты диссертационной работы приняты к внедрению в ОАО «ВНИИНЕФТЕМАШ» и ОАО «Гипрогазоочистка».

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 10 печатных работах, из которых 4 научные статьи [1-4] в журналах, рекомендованных ВАК, и 6 материалов научных конференций [5-10].

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов и результатов, списка литературы из 97 наименований. Работа изложена на 124 страницах, содержит 29 рисунков и 10 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранного направления исследований, определена их цель и задачи, а также сформулированы положения, определяющие научную новизну и практическую ценность работы.

В первой главе проводится анализ ситуации с надежностью сварных соединений в нефтегазовом оборудовании. Показано, что, с одной стороны, процесс сварки неизбежно ведет к снижению прочностной надежности конструкции за счет неблагоприятных превращений в металле, дополнительной концентрации напряжений, а также в связи с вероятным допущением дефектов, напрямую ухудшающих прочность сварного соединения. С другой стороны, выявление на действующем оборудовании сварочных дефектов недопустимого размера происходит довольно часто (Таблица 1). При этом дефект сварки образуется на этапе изготовления или проведения ремонтных (монтажных) работ и в случае своей реальной опасности проявляется в виде разрушения уже на начальной стадии эксплуатации оборудования. В случае же отсутствия условий для развития дефекта в ходе эксплуатации можно говорить о его неопасности для данной конструкции.

Обзор существующих методов контроля качества сварных соединений показал, что для практической диагностики эксплуатируемого оборудования имеются широкие возможности, не нарушая целостности конструкции, получить достаточно полные сведения об имеющихся дефектах.

При рассмотрении существующих в отечественной практике подходов к нормированию дефектности оборудования нефтегазохимии, выявлено следующее:

во-первых, согласно действующим нормативам, допустимыми дефектами сварных соединений в стальных сосудах являются только дефекты гладкой формы, в частности поры и неметаллические включения, размерами не выше предельных допусков. Сварочные дефекты трещиноподобного типа недопустимы;

во-вторых, при оценке величины дефекта допустимой формы на стадии эксплуатации решение по отбраковке принимается с использованием консервативных технологических норм допустимой дефектности. Эксплуатационные нормы, как таковые, отсутствуют, что делает целесообразным разработку расчетных методов оценки опасности дефекта, учитывающих влияние последнего на прочностную надежность конструкции.

Таблица 1.

Результаты обследования аппаратов переработки и хранения газа

Оборудование	Число единиц	Количество выявленных дефектов сплошности сварного шва	
		допустимых	недопустимых
Колонны	10	123	16
Емкости	63	373	62
Сепараторы	24	174	66
Теплообменники	14	85	17
Холодильники	2	16	1
Испарители	9	65	18
Разделители	3	27	3
Воздухосборники	13	34	12

Вторая глава посвящена экспериментальным исследованиям прочности стыкового сварного соединения, ослабленного внутренним дефектом гладкой формы.

В соответствии с задачами проводимого исследования первоначально были изготовлены два так называемых исходных сварных соединения (ИСС), каждое из которых представляет собой две стальные пластины (сталь 09Г2С-15), сваренные между собой ручной дуговой сваркой (электроды УОНИ-13/55) с умышленным допущением в шве внутренних дефектов. При этом в сварном шве первого ИСС намерено допущены дефекты в виде шлаковых включений, а сварной шов второго ИСС имел два характерных участка по длине: на одном получены дефекты в виде газовых пор, а другой участок представляет собой высококачественный сварной шов без каких-либо наружных и внутренних дефектов. Качество полученных сварных швов отражается в результатах проведенного радиографического контроля (Рисунок 1).

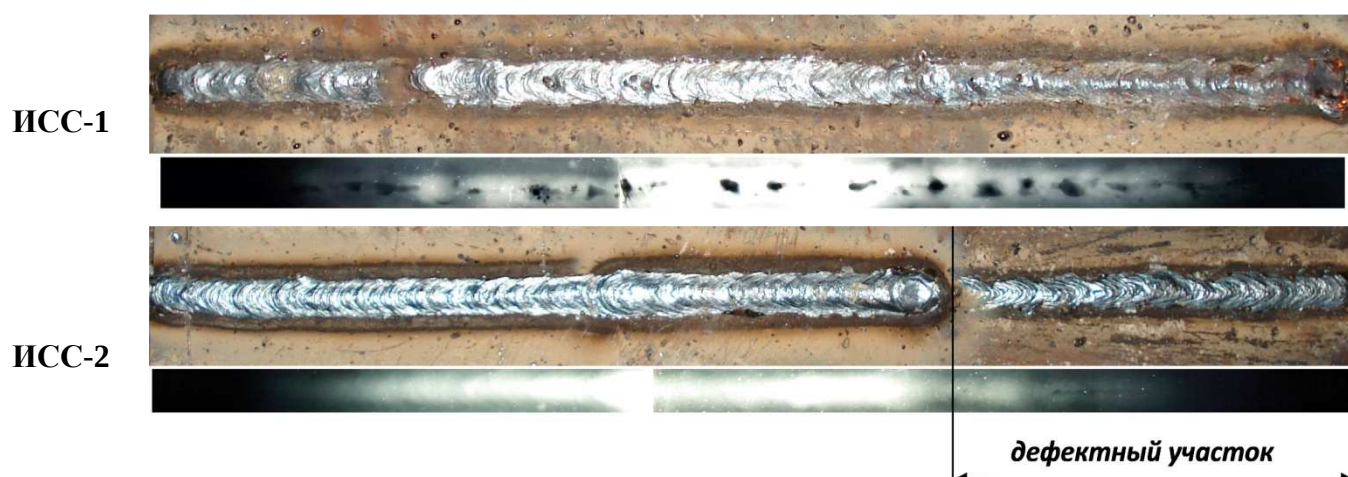


Рисунок 1. Фотографии и радиогаммы полученных сварных швов

Экспериментальные исследования проводились в два этапа.

Целью первого этапа являлось определение механических характеристик основного металла (ОМ) и металла сварного шва (МШ), для чего испытаниям на растяжение были подвергнуты соответствующие цилиндрические образцы. При этом образцы металла шва были выточены из бездефектного участка ИСС-2.

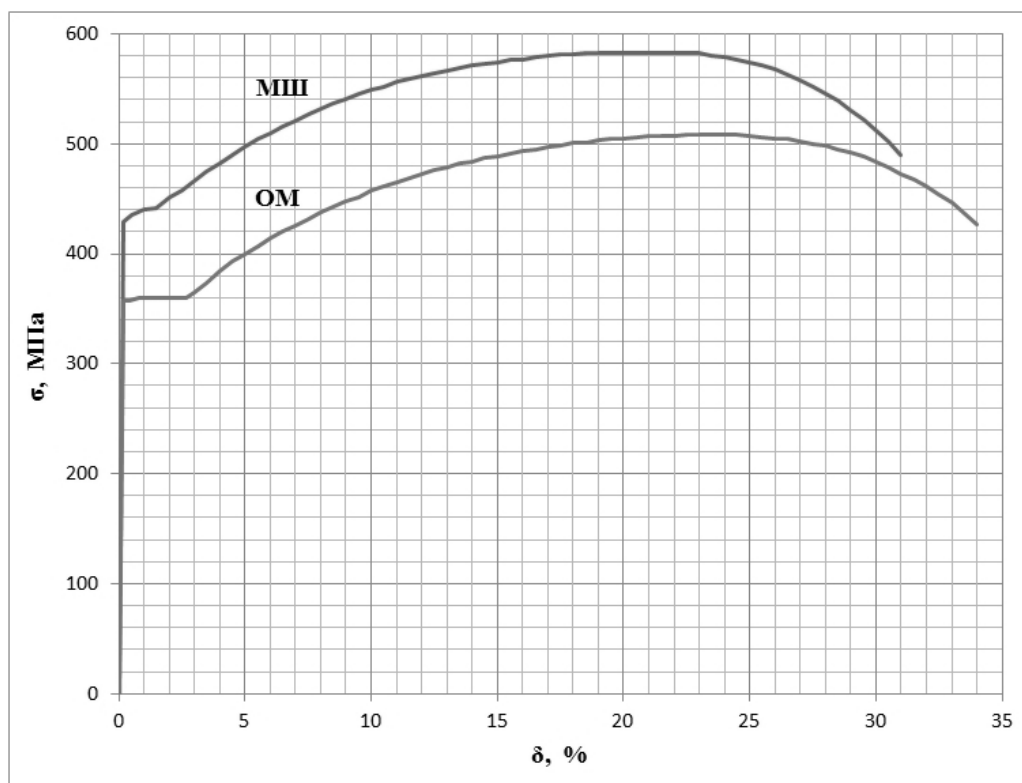


Рисунок 2. Усредненные диаграммы растяжения цилиндрических образцов

Полученные значения механических свойств (Рисунок 2) для основного металла хорошо согласуются с данными сопроводительного сертификата, представленного сталепрокатным заводом на поставляемую продукцию, согласно которому используемая сталь 09Г2С имеет следующие характеристики: $\delta = 35\%$, $\sigma_{\text{в}} = 510$ МПа, $\sigma_{\text{т}} = 350$ МПа. Испытания образцов МШ показали, что прочность металла шва в полученном сварном соединении выше прочности основного металла на 15%. При этом полученные значения предела текучести $\sigma_{\text{т}}^{(\text{ОМ})} = 360$ МПа и $\sigma_{\text{т}}^{(\text{МШ})} = 430$ МПа свидетельствуют о том, что металл сварного шва несколько менее пластичен.

На втором этапе проводимых исследований растяжению до разрушения подвергались плоские образцы стыкового сварного соединения с дефектом, вырезанные из ИСС. Всего было получено 68 образцов, для каждого из которых предварительно производилось обмеривание, в том числе в зоне дефекта (Рисунок 3).

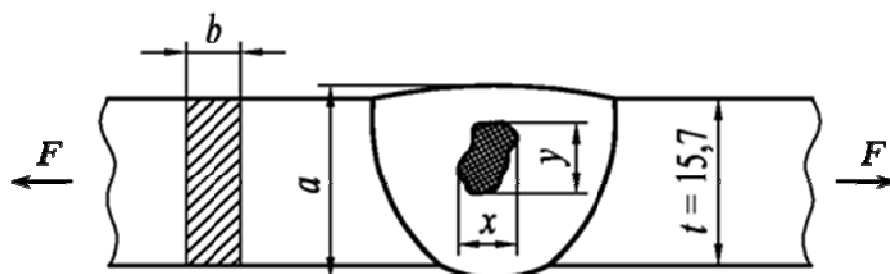


Рисунок 3. Эскиз образца стыкового сварного соединения с внутренним дефектом

По результатам испытаний для каждого образца вычислялось разрушающее брутто-напряжение $\sigma_{\text{бт}}$, определяемое отношением максимальной нагрузки к исходной площади сечения в области разрыва без учета дефекта.

Из всей партии по сварочному дефекту разрушилось 26 образцов. Из них в дальнейшее рассмотрение были приняты только те образцы, дефект которых представлял собой единичную некраевую сквозную несплошность сварного шва, т.е. 18 образцов (Таблица 2). Как видно из Рисунка 4, совокупность экспериментальных точек для данной группы образцов весьма неплохо описывается линейной зависимостью с множественным коэффициентом детерминации $R^2 = 0,95$, что свидетельствует о высокой степени тесноты связи между $\sigma_{бр}$ и относительным размером дефекта y/a . Пропорциональное снижение прочности металла шва с увеличением размера дефекта, а также вязкий характер разрушения, свидетельствуют о так называемой нечувствительности материала сварного соединения к рассматриваемому типу дефектов. Дефект в данном случае выступает в качестве фактора, уменьшающего рабочее сечение детали, и не является острым концентратором напряжений. В таком случае ослабление сечения шва может быть восполнено высотой валика (усилением), а прочность сварного соединения при размерах дефекта ниже некоторой критической величины будет определяться прочностью основного металла.

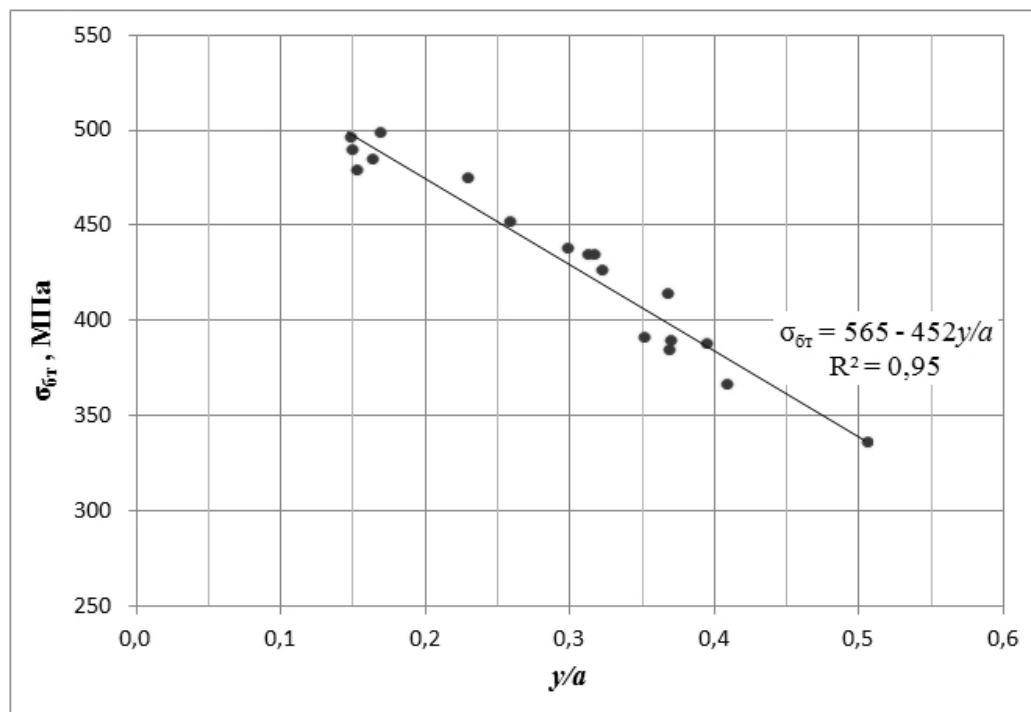


Рисунок 4. Зависимость разрушающего брутто-напряжения от относительного размера дефекта

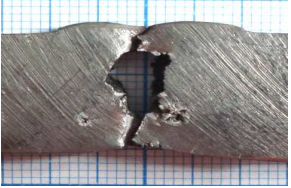
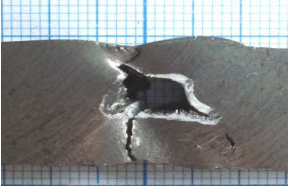
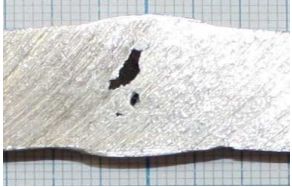
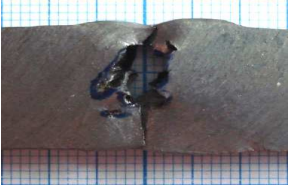
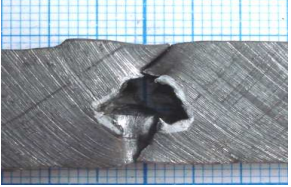
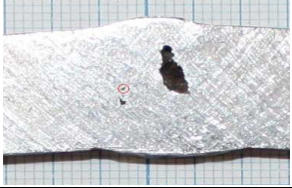
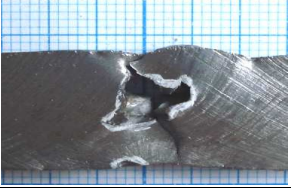
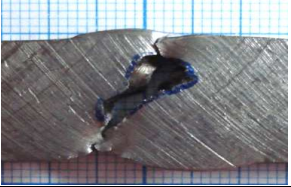
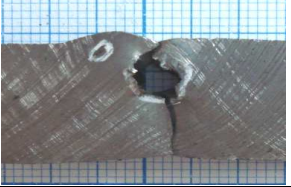
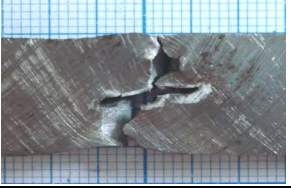
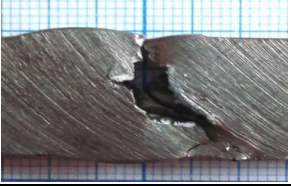
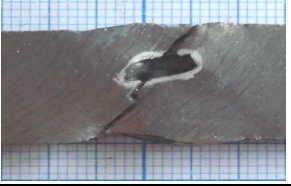
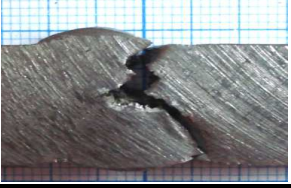
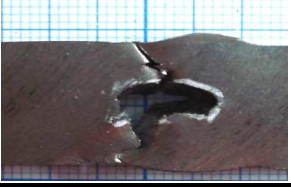
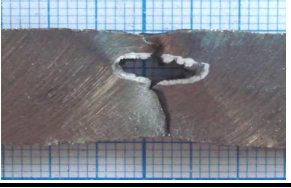
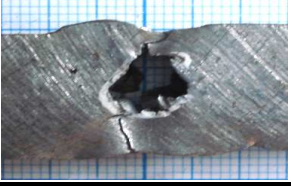
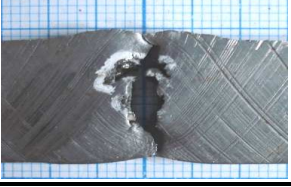
Как показали проведенные испытания (Рисунок 5), наличие в сварном шве несплошности величиной менее 17% от высоты шва не вызывает видимого снижения прочности соединения и, как правило, локализует разрушение в основном металле вдали от шва.

Указанное пороговое значение $y/a = 0,17$ соответствует дефекту размером приблизительно 2,5 мм. При этом для свариваемых деталей толщиной 16 мм нормативно допустимым является дефект размером не более 1,5 мм.

Таким образом, полученные данные могут быть использованы для разработки критерия разрушения, учитывающего влияние размера нетрещиноподобного дефекта на прочность сварного соединения.

Таблица 2.

Фотографии сварных образцов, разрушившихся по дефекту

Фото шва ДО испытаний	Фото шва ПОСЛЕ испытаний	Фото шва ДО испытаний	Фото шва ПОСЛЕ испытаний
			
			
			
			
			
			
			
			
			

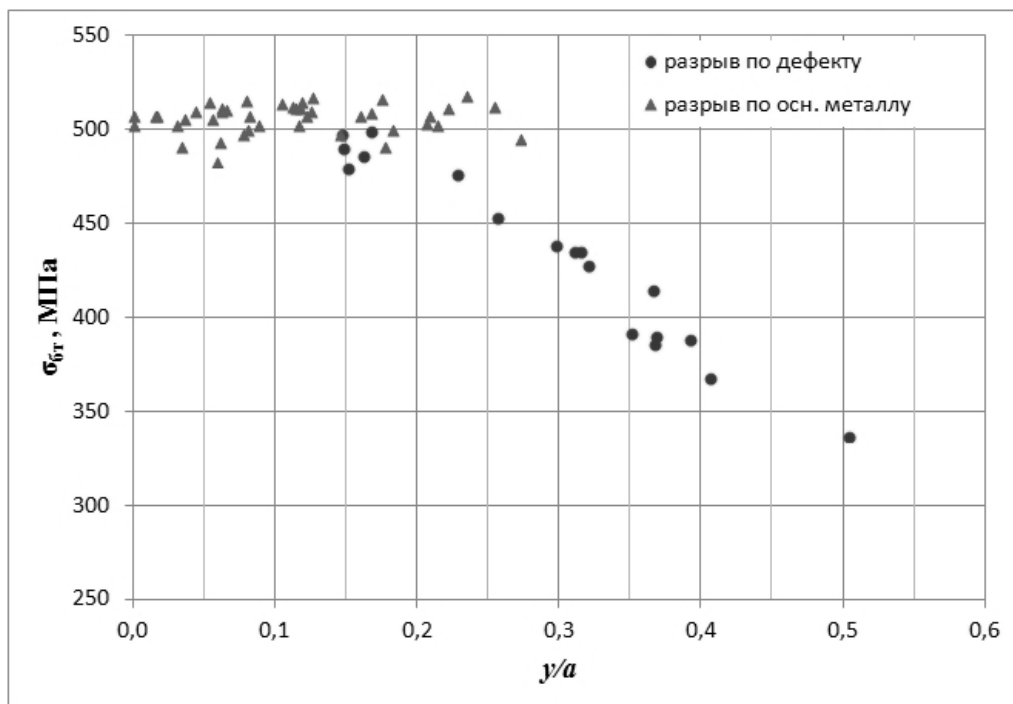


Рисунок 5. Прочность сварных образцов с нетрещиноподобным дефектом в шве

Третья глава посвящена разработке универсального критерия разрушения стыковых сварных соединений с внутренним нетрещиноподобным дефектом. Для этого первоначально был проведен анализ полученных результатов с позиций механики разрушения, т.к. на практике при недостатке сведений о форме внутреннего дефекта удобно всякий дефект принимать в виде трещины. С этой целью для каждого дефекта была определена длина эквивалентной ему трещины (Рисунок 6).

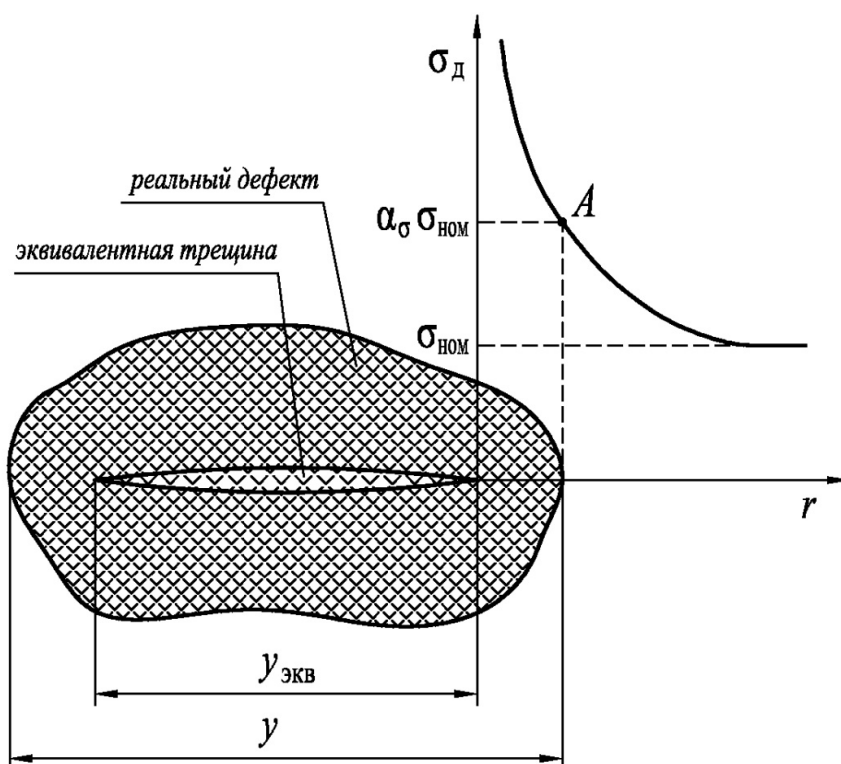


Рисунок 6. Схема определения длины эквивалентной трещины

Для точки A на Рисунке 6 имеем: с одной стороны, для дефекта гладкой формы напряжения в ней будут превышать номинальные в α_σ раз, где α_σ – коэффициент концентрации напряжений; с другой стороны, можно подобрать такую трещину, перед вершиной которой эпюра распределения действительных напряжений пройдет через точку A . Для трещины отрыва эта эпюра описывается следующим уравнением:

$$\sigma_d = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \quad , \quad (1)$$

где коэффициент интенсивности напряжений (КИН) K для случая одноосного растяжения пластины конечной ширины a с некраевой трещиной длиной $y_{\text{экв}}$ определяется по следующей формуле:

$$K = \sigma_{\text{ном}} \sqrt{\pi \frac{y_{\text{экв}}}{2}} \sqrt{\sec\left(\frac{\pi y_{\text{экв}}}{2a}\right)} \quad . \quad (2)$$

Тогда для точки A справедливо равенство (3), из которого и находится значение длины эквивалентной трещины.

$$\sqrt{\frac{y_{\text{экв}}}{2(y-y_{\text{экв}})}} \sec\left(\frac{\pi y_{\text{экв}}}{2a}\right) = \alpha_\sigma \quad . \quad (3)$$

После перехода от реальных дефектов к эквивалентным трещинам для образцов, разрушившихся по дефекту, вычислены значения предельного КИН путем подстановки в формулу (2) вместо $\sigma_{\text{ном}}$ разрушающего брутто-напряжения. Полученные значения нанесены на поле графика Рисунка 7, из которого видно, что через экспериментальные точки может быть построена предельная диаграмма трещиностойкости, описываемая соответствующим уравнением из механики разрушения при $K_c = 55 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ и $q = 2,3$, что говорит о возможности применения предложенного подхода.

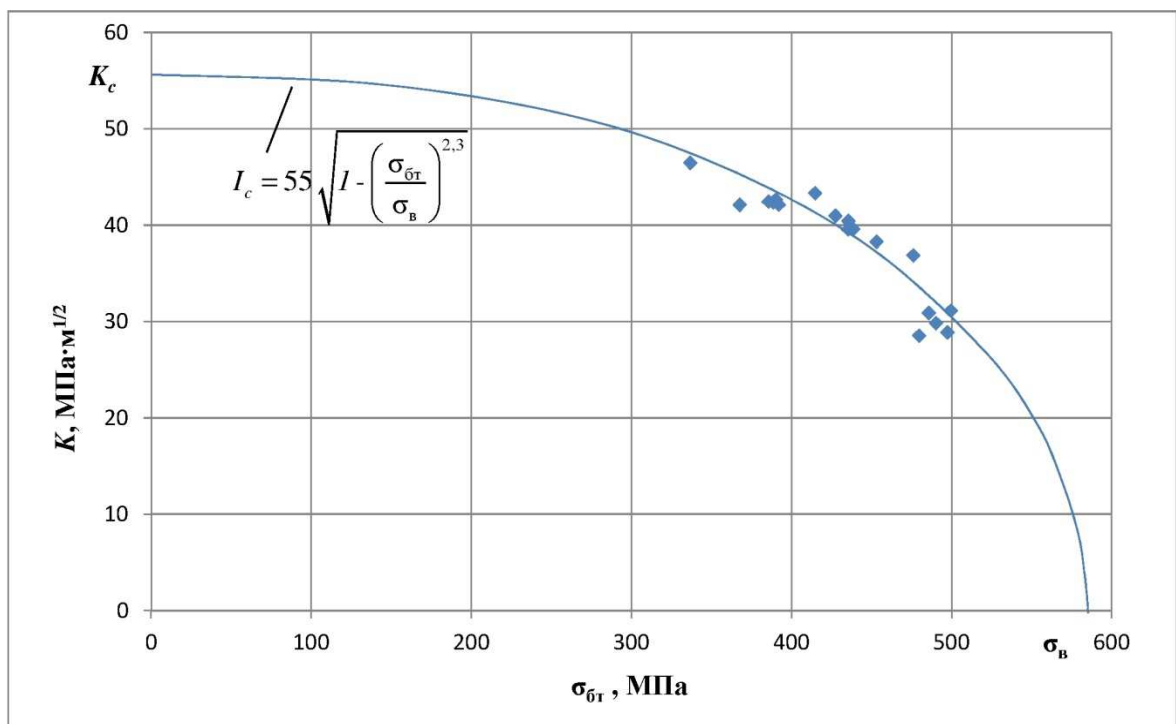


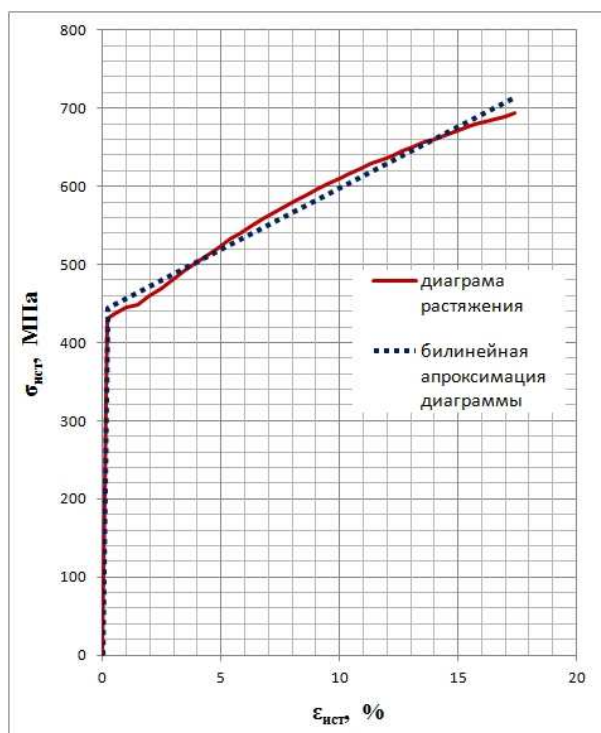
Рисунок 7. Предельная диаграмма трещиностойкости для эквивалентных трещин

Однако, на практике пользоваться двухпараметрическим критерием не совсем удобно, учитывая необходимость построения диаграммы трещиностойкости по предварительно определенным значениям K_c , q и σ_b в каждом конкретном случае. Поэтому решено от методов механики разрушения перейти к оценке прочностной надежности исследуемых образцов с позиций классических теорий прочности.

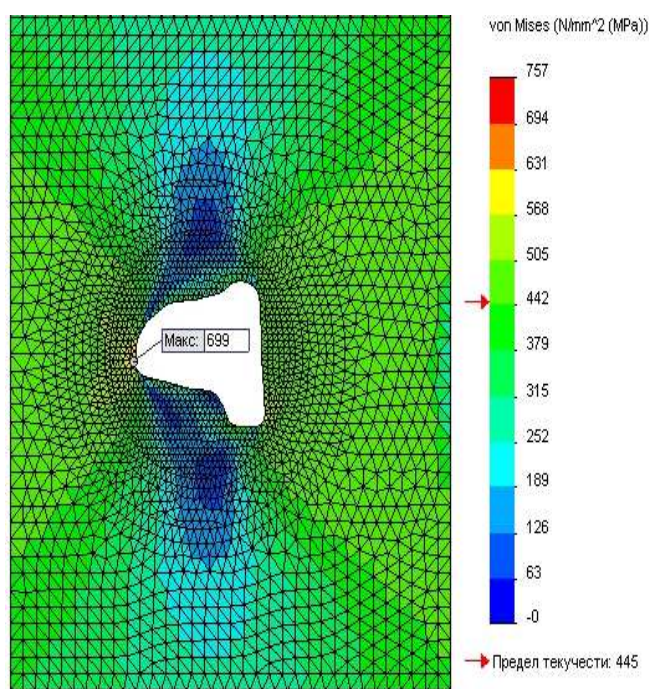
Для разработки однопараметрического критерия разрушения был выбран методологический подход, основанный на численном анализе напряженно-деформированного состояния (НДС) сварного шва в зоне дефекта при экспериментально определенном усилии разрыва.

Задача численного анализа решалась в упругопластической постановке с помощью метода конечных элементов в программном комплексе SW Simulation. Сварной образец с дефектом был представлен в виде 2-мерной модели в плоском напряженном состоянии в соответствии с условиями эксперимента. Ширина расчетной модели принята в соответствии с геометрией образца в месте его фактического разрыва. Для описания механических свойств материала в программу была заложена кривая растяжения металла сварного шва в истинных координатах (Рисунок 8а). В целях оптимизации расчета она была представлена в виде билинейной зависимости.

В ходе численного анализа подбиралась такая нагрузка, при которой максимальные эквивалентные напряжения в модели достигнут значения предела прочности материала шва (Рисунок 8б). Полученная расчетная силовая нагрузка при этом оказалась в среднем на 20 % меньше экспериментально определенного значения. Это показывает, что оценку опасности рассматриваемого типа сварочных дефектов можно вести по классическим теориям прочности, решая соответствующую задачу нагружения в полной упругопластической постановке.



а



б

Рисунок 8. Моделирование сварного образца с дефектом: а – истинная диаграмма растяжения МШ; б – поля эквивалентных напряжений на момент разрушения

Однако, с точки зрения практики, такой подход нецелесообразен, поскольку в каждом случае сводится к детальному численному анализу исследуемой конструкции, что в производственных условиях трудновыполнимо. Поэтому идея разработки критерия разрушения заключалась в установлении математической зависимости между геометрией сварного соединения с дефектом, механическими свойствами зон металла и разрушающей нагрузкой. Для этого полезно обратиться к эпюрам распределения осевых напряжений по сечению образца на момент разрушения (Рисунок 9).

Выражение для критического напряжения $\sigma_{кр}$ в бездефектной области может быть получено из равенства площадей под эпюрами:

$$\sigma_{кр} a = \sigma_{т}^{(мш)} (a - y) + (\sigma_{в ист.}^{(мш)} - \sigma_{т}^{(мш)}) (a - y) \alpha, \quad (4)$$

где: α – некоторый коэффициент, учитывающий кривизну эпюр.

Как уже отмечалось, по результатам проведенных экспериментов прочность металла шва оказалась выше чем у основного металла на 15% , т.е. можно записать:

$$\frac{\sigma_{в}^{(мш)}}{\sigma_{в}^{(ом)}} - 1 = 0,15. \quad (5)$$

В случае с нетрещиноподобным дефектом это говорит о том, что уменьшение рабочего сечения за счет несплошности на 15% и менее полностью компенсируется повышенными прочностными характеристиками шва и не приведет к снижению прочности конструкции в целом. В настоящих исследованиях размер критической несплошности оказался близок к этому значению и составил 17% (Рисунок 5).

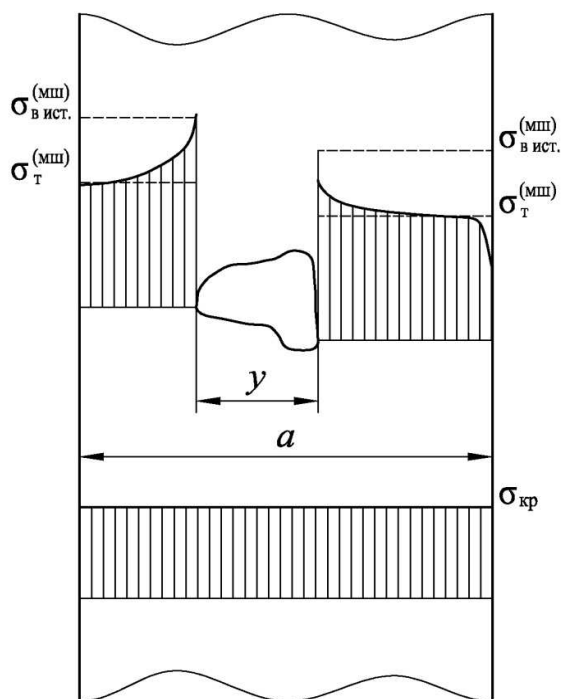


Рисунок 9. Эпюры осевых напряжений в зоне дефекта и бездефектной области на момент разрушения образца

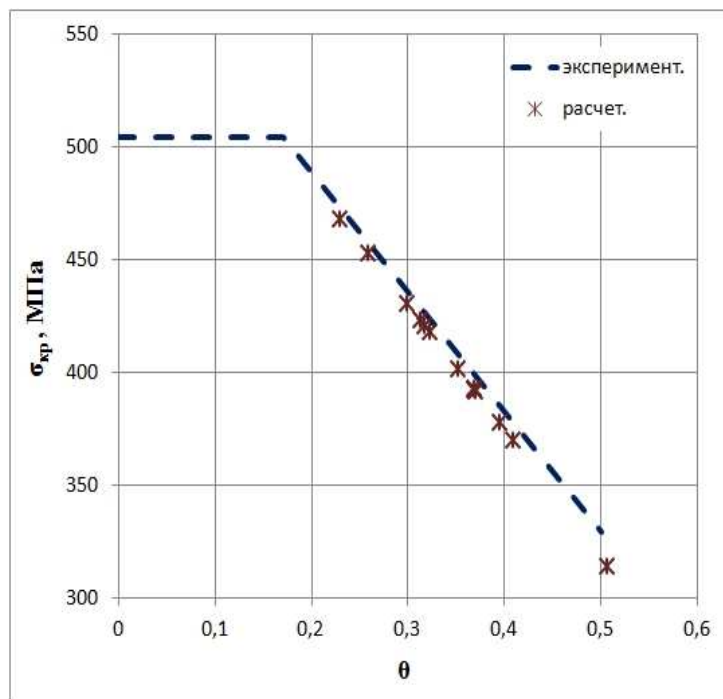


Рисунок 10. Сравнительная оценка экспериментальных и расчетных значений $\sigma_{кр}$

С учетом вышеизложенного, на основе уравнения (4) окончательно предложено следующее общее выражение для $\sigma_{кр}$:

$$\sigma_{кр} = \begin{cases} \sigma_B^{(OM)} & \text{при } \theta \leq \frac{\sigma_B^{(MШ)}}{\sigma_B^{(OM)}} - 1 \\ \sigma_T^{(MШ)}(1-\theta) + (\sigma_B^{(MШ)} - \sigma_T^{(MШ)})(1-\theta)(1+0,65\theta) & \text{при } \theta > \frac{\sigma_B^{(MШ)}}{\sigma_B^{(OM)}} - 1 \end{cases}, \quad (6)$$

где $\theta = y/a$ – относительный размер дефекта.

При этом критерий разрушения запишется в традиционном виде:

$$\sigma_{раб} \geq \sigma_{кр}. \quad (7)$$

Для оценки точности полученного выражения (6) рассчитанные по нему значения напряжений для партии испытанных образцов нанесены на поле графика экспериментальной зависимости прочности сварных образцов (Рисунок 10).

Четвертая глава посвящена применению разработанного критерия для оценки работоспособности оборудования со сварочными дефектами. Предложенный алгоритм оперативной оценки опасности дефектов сварных соединений, выявляемых при диагностическом обследовании оборудования, включает в себя 8 этапов.

Этап 1. Для ознакомления с конструктивными и эксплуатационными особенностями оборудования, характером его износа, объемами и причинами выполненных ремонтов проводится анализ эксплуатационно-технической документации.

Этап 2. Проводится диагностическое обследование аппарата, по результатам которого могут быть получены сведения об имеющихся дефектах в сварных швах.

Этап 3. В случае выявления внутреннего дефекта в сварном шве, необходимо провести его качественную и количественную оценку. Если дефект является трещиноподобным, то опасность такого дефекта будет высока и оценку его допустимости придется вести с использованием специальных методик. Для оценки по предлагаемой методике дефекта гладкой формы необходимо получить сведения о его размере.

Этап 4. Проводится оценка фактических механических свойств металла в зоне расположения дефекта с использованием прямых либо косвенных методов.

Этап 5. С использованием выражения (6) вычисляется значение критических напряжений $\sigma_{кр}$ для конструкции с учетом дефекта.

Этап 6. Определяются параметры НДС в зоне расположения дефекта от воздействия эксплуатационных нагрузок. При этом рабочие напряжения $\sigma_{раб}$ должны оцениваться без учета несплошности в виде существующего дефекта.

Этап 7. Выполняется проверка условия прочности по критерию (7). Фактический коэффициент запаса будет определяться следующим образом:

$$n = \frac{\sigma_{кр}}{\sigma_{раб}}. \quad (8)$$

Этап 8. Для удобства с использованием выражения (6) строится билинейная зависимость предельных напряжений в конструкции от размера дефекта с учетом допустимого запаса прочности n_b (Рисунок 11). Т. А – малозначительный дефект ($n > n_b$). Т. В – дефект значительный, конструкция находится в предельном состоянии ($n = n_b$). Т. С – дефект критический, сосуд находится в аварийном

состоянии ($n < n_B$), необходимо устранение дефекта либо снижение рабочих нагрузок, как минимум, до вычисленного уровня предельно допустимых напряжений (т. В). В последнем случае необходимо выполнить повторную оценку опасности дефекта, вернувшись на 6-й этап.

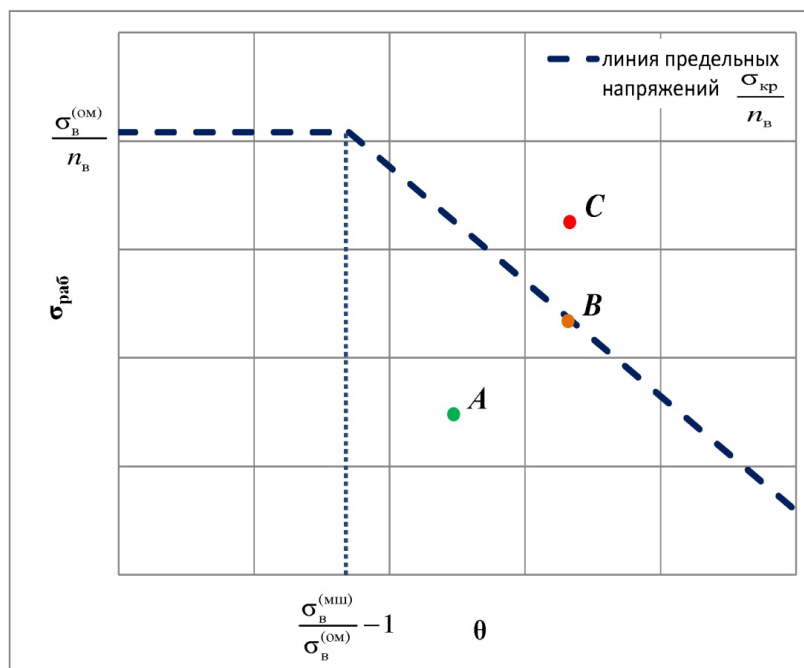


Рисунок 11. Оценка допустимости дефекта по разработанному критерию

По предложенному алгоритму была произведена оценка работоспособности эксплуатируемого аппарата, в сварных швах которого при диагностическом обследовании были выявлены внутренние поры (Рисунок 12).

Нормативно допустимой в данном случае будет являться внутренняя пора диаметром не более 2,5 мм. Используя приведенный выше алгоритм, оценим влияние наиболее опасного дефекта «П2» на работоспособность обследуемого десорбера.

Значения фактических механических характеристик металла в зоне дефекта определим по имеющимся замерам твердости (HV) с использованием эмпирических зависимостей, полученных по результатам широких практических исследований для сталей на объектах нефтехимии с учетом их длительной эксплуатации (Таблица 3):

$$\sigma_T = 3,65HV - 296; \quad \sigma_B = 3,26HV - 43.$$

Таблица 3.

Механические характеристики металла в окрестности дефекта «П2»

Материал	Твердость, HV	σ_T , МПа	σ_B , МПа
ОМ	144	313	494
МШ	169	404	573

Поскольку $\theta = \frac{6,2}{26} = 0,24 > \frac{\sigma_B^{(МШ)}}{\sigma_B^{(ОМ)}} - 1 = \frac{573}{494} - 1 = 0,16$, то критическое значение

напряжений будет рассчитываться по второй строке формулы (6) и составит: $\sigma_{кр} = 455$ МПа.

Для поры в продольном стыковом сварном шве цилиндрической обечайки основным силовым фактором, определяющим прочность конструкции, будут являться кольцевые напряжения от действия внутреннего давления в аппарате.

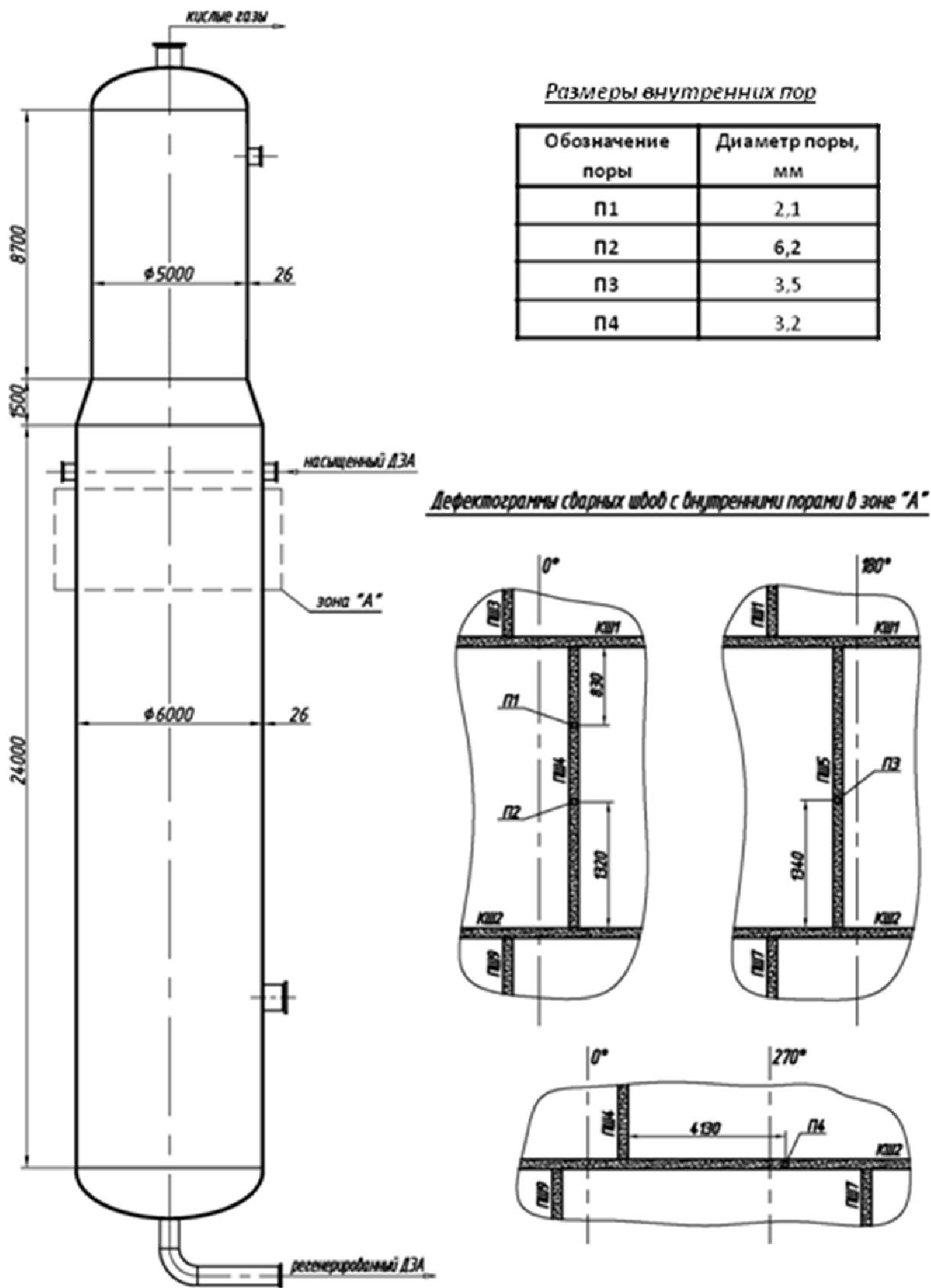


Рисунок 12. Эскиз десорбера с выявленными порами

Значение расчетного давления составляет 0,78 МПа. Тогда:

$$\sigma_{\text{раб}} = \frac{0,78 \cdot 6000}{2 \cdot 26} = 90 \text{ МПа}.$$

Фактический коэффициент запаса прочности составит: $n = 5,1$.

Для бездефектной области: $n_{\text{max}} = \frac{\sigma_{\text{в}}^{(\text{ом})}}{\sigma_{\text{раб}}} = 5,5$.

При проектировании сосудов давления, как правило, принимают: $n_{\text{в}} = 2,4$.

Таким образом, выявленная пора «П2» нормативно недопустимого размера действительно снижает прочность конструкции. Однако, учитывая фактические данные об исполнительной толщине стенки аппарата, максимально допустимой рабочей нагрузке, а также фактические прочностные характеристики материала, запас прочности для данного сосуда остается на уровне выше проектного. Следовательно, можно говорить об отсутствии влияния рассматриваемого дефекта на работоспособность аппарата и возможности его дальнейшей эксплуатации без проведения ремонтно-восстановительных работ.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Проведенный анализ дефектности нефтегазового оборудования показал, что в реальных условиях аппараты со сварочными дефектами размерами выше нормативных допусков продолжают находиться в работоспособном состоянии, в связи с чем возникает необходимость оценки реальной опасности таких дефектов.
2. Полученные данные о механических свойствах материала характерных зон сварного соединения показали, что металла сварного шва в среднем на 15% прочнее основного металла (для стали 09Г2С, сваренной электродами УОНИ-13/55).
3. Экспериментальные исследования образцов, моделирующих дефектное сварное соединение, показали, что за счет усиления и повышенной прочности наплавленного металла технологический дефект сварного шва снижает общую прочность конструкции в меньшей степени, чем аналогичный дефект в основном металле.
4. Показано, что оценку прочности сварных соединений с дефектом нетрещиноподобного типа можно производить по двухпараметрическому критерию механики разрушения, приводя характерный размер дефекта к длине эквивалентной трещины.
5. На основе анализа распределения напряжений в зоне дефекта, полученных численным методом (МКЭ), предложен критерий разрушения стыковых сварных соединений, позволяющий определять предельно допустимое значение рабочих напряжений в зависимости от характерных размеров сварного соединения с дефектом и фактических прочностных характеристик основного и наплавленного металла.
6. Разработан алгоритм оперативной оценки реальной опасности сварочного дефекта размером выше нормативно допустимого в случае выявления его на действующем оборудовании. Работоспособность предложенного алгоритма проиллюстрирована на примере оценки прочностной надежности десорбера по результатам его диагностического обследования на этапе эксплуатации.
7. Применение разработанного метода оценки работоспособности оборудования на практике позволит в ряде случаев осуществлять существенную экономию материально-временных ресурсов за счет обоснованного отказа от проведения ремонтно-восстановительных работ в условиях действующего производства.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Захаров М.Н., Насонов В.А. Оценка влияния дефектов сварных соединений на прочностную надежность стальных сосудов и аппаратов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2013. №4. С. 68-72. (0,6 п.л./0,15 п.л.).
2. Захаров М.Н., Насонов В.А. Экспериментальное моделирование поведения сварных соединений с дефектами несплошности при критических нагрузках // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2014. №2. С. 65-71. (0,9 п.л./0,5 п.л.).
3. Захаров М.Н., Насонов В.А., Морозов Е.М. Критерий разрушения сварных стыковых соединений с внутренними дефектами // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2014. №7. С. 76-82. (0,9 п.л./0,3 п.л.).
4. Захаров М.Н., Насонов В.А. Оценка прочности эксплуатируемых сварных сосудов давления по результатам неразрушающего контроля // Нефть, газ и бизнес. 2014. №7. С. 56-60. (0,6 п.л./0,25 п.л.).
5. Насонов В.А. Необходимость совершенствования методических подходов при оценке технического состояния оборудования нефтегазопереработки и нефтехимии / Сборник тезисов IX-ой Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России», М.: Изд. центр РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2012. Ч. II. С. 35-36. (0,06 п.л./0,06 п.л.).
6. Насонов В.А. Необходимость совершенствования методических подходов при оценке технического состояния оборудования нефтегазопереработки и нефтехимии / Сборник тезисов 66-ой Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ – 2012» Секция 13. М.: Изд. центр РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2012. С. 28. (0,06 п.л./0,06 п.л.).
7. Насонов В.А. О возможности смягчения нормативных требований к качеству сварных соединений для стальных сосудов и аппаратов / Сб. тезисов 67-ой Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ – 2013» Секция 12. М.: Изд. центр РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2013. С.60. (0,06 п.л./0,06 п.л.).
8. Насонов В.А. Оценка прочности сварного соединения с дефектом сплошности металла шва на основе численного моделирования / Сборник тезисов 68-ой Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ – 2014» Секция 4. М.: Изд. центр РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2014. С. 62. (0,06 п.л./0,06 п.л.).
9. Насонов В.А., Захаров М.Н. Прочность сварного соединения с внутренним дефектом несплошности металла шва / Сборник тезисов X-ой Всероссийской конференции молодых ученых, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности» Секция 6. М.: Изд. центр РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2013. С. 15. (0,06 п.л./0,04 п.л.).
10. Насонов В.А., Захаров М.Н. Расчетно-экспериментальная оценка прочностной надежности сварных соединений с нетрещиноподобными дефектами / Сборник тезисов X-ой Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России», М.: Изд. центр РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2014. С. 236. (0,06 п.л./0,02 п.л.).