Л. М. Гуревич, В. Ф. Даненко, А. А. Истрати

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
КОЛЬЦЕВОГО СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ С НЕПРОВАРОМ**

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: mv@vstu.ru

Проведено компьютерное моделирование изменения напряжений и деформаций в условиях осевого растяжения труб с кольцевым механически неоднородным сварным соединением с дифференцированными механическими свойствами шва, зоны термического влияния и основного металла. В сварном соединении имеются дефект типа непровара различных геометрических размеров. Показано, что при осевом растяжении максимальные напряжения развиваются в зоне непровара, являющегося концентратором напряжений. Определены величины концентрации напряжений при различной протяженности дефекта. Исследовано распределение напряжений и деформаций в сварных швах при различных величинах дефекта.

Ключевые слова: труба, сварное соединение, шов, зона термического влияния, конечно-элементное моделирование, растяжение, деформация, напряжение, непровар.

L. M. Gurevich, V. F. Danenko, A. A. Istrati

**SIMULATION OF THE STRESSED-DEFORMED STATE
OF A RING WELDED CONNECTION WITH LACK OF FUSION**

Volgograd State Technical University

Computer modeling of changes in stresses and strains under axial tension of pipes with a ring mechanically inhomogeneous welded joint was carried out. Annular mechanically inhomogeneous welded joint had an different mechanical properties of the joint, heat-affected zone and base metal. A defect of the type of lack of fusion of various geometric sizes is present in the welded joint. The maximum stresses during axial tension develop in the zone of lack of penetration, which is a stress concentrator. The stress concentration values for various extent of the defect are determined. The distribution of stresses and strains in welds at various defect values is investigated.

Keywords: tube, welded joint, seam, heat-affected zone, finite element simulate, elongation, deformation, stress, lack of fusion.

Образцы сварных соединений характеризуются наличием концентраторов напряжений, связанных с формой шва, технологическими дефектами, остаточными напряжениями, неоднородностью микроструктуры и физико-механических свойств в областях шва, зоны термического влияния и основного металла [1].

В нормативных документах установлены требования к качеству сварных соединений, допустимости наличия и величины дефектов. Например, согласно ГОСТ 34347–2017 «Сосуды и аппараты стальные сварные. Общие технические условия» допускаются местные подрезы в стальных сосудах 3, 4 и 5-й групп, предназначенных для работы при температуре выше 0 °С. При этом их глубина не должна превышать 5 % толщины стенки, но не более 0,5 мм, а протяженность – 10 % длины шва. В сварных соединениях не допускаются следующие внутренние дефекты: трещины всех видов и направлений, в том числе микротрещины, выявленные при металлографическом исследовании; свищи; смещение основного и плакирующего слоев в сварных соединениях двухслойных сталей выше норм, предусмотренных стандартом; непровары (несплавления), расположенные в сечении сварного соединения; поры, шлаковые и вольфрамовые включения, выявленные радиографическим методом, выходящие за пределы норм, установленных допустимым классом дефектности сварного соединения по ГОСТ 23055.

Существующие нормативные документы, основанные на инженерных методиках или накопленном опыте эксплуатации сварных конструкций с различными дефектами, позволяют оценивать их остаточный ресурс, но, по мнению ряда авторов, они иногда предъявляют завышенные требования, запрещая эксплуатацию опасных технических устройств, которые могли бы успешно эксплуатироваться в течение значительного срока. Поэтому необходимы методы оценки опасности дефектов, учитывающие особенности работы сосудов и трубопроводов, их конструкцию, размер и ориентацию дефектов.

Авторы [2] считают, что вследствие случайной природы дефектов, статистической структурно-механической неоднородности металла, разброса характеристик механических свойств, пульсации рабочих давлений необходима вероятностная постановка задачи оценки опасности дефектов. При многообразии типо-

размеров труб, методов монтажа, используемых видов неразрушающего контроля, условий эксплуатации, внешней среды наиболее эффективным методом ее решения является численное вероятностное моделирование предельных состояний сварных соединений. Предлагаемый подход, по мнению авторов, позволяет проводить оценки надежности сварных соединений трубопроводов на основе статистических расчетов трещиностойкости с учетом случайной природы нагруженности и дефектности.

В статье [3] выполнено моделирование образования дефектов типа цепочки пор при диффузионной сварке. Методами математического моделирования показано, что ориентация таких дефектов в области сварки существенно влияет на циклическую долговечность соединения. Моделирование частично подтвердило предположение, что распространение трещины затруднено в образце, обладающем неоднородной структурой, по сравнению с однородным образцом из «мягкого» материала. Авторы считают, что результаты моделирования могут стать основой для настройки диагностического оборудования по оценке качества и ресурса высоконагруженных изделий.

Авторы [4] экспериментально показали, что наличие в сварном шве трещиноподобных дефектов с размерами, в разы превышающими нормативный допуск, приводит к снижению прочности соединения не более чем на 20 % по сравнению с бездефектным металлом. В случаях, когда величина дефекта соответствует нормам, значение снижения разрушающего напряжения относительно временного сопротивления основного металла составляет порядка 9 %. Проведение более детальных исследований в этой области, по мнению авторов, позволит подробно изучить вопрос влияния дефектов на прочностную надежность сварных соединений и разработать дополнительные критерии и методики количественной оценки качества таких соединений для стальных сосудов и аппаратов с учетом специфики условий их эксплуатации. Оценка опасности сварочных дефектов, основу которой составят экспериментальные исследования, даст возможность несколько смягчить требования допустимой дефектности, что приведет к снижению объема работ и соответствующих затрат как на стадии изготовления, так и при проведении периодических освидетельствований эксплуатируемого оборудования.

В работе [5] в результате проведенного анализа в упругопластической постановке конструкций, содержащих дефекты несплошности, уточнен универсальный критерий, позволяющий с достаточной точностью оценить реальную опасность дефекта, не прибегая к сложному численному упругопластическому моделированию напряженно-деформированного состояния конструкции в зоне дефекта. Для оценки опасности несплошности в сварном шве при статическом нагружении использована информация о ее относительном размере и данных о прочностных характеристиках основного и наплавленного металла.

В статье [6] на основе подходов механики разрушения получено решение оценки опасности углового концентратора в сварных соединениях, которое учитывает глубину данного дефекта и угол его раскрытия. Учитывая проведенный анализ опасности углового концентратора по сравнению с трещиной, необходимо отметить, что при равных номинальных напряжениях и глубине дефекта острый угловой концентратор до значений угла раскрытия $\beta \leq 45^\circ$ работает практически как трещина; при $\beta > 45^\circ$ необходимо учитывать снижение опасности рассматриваемого концентратора по сравнению с трещиной коэффициентом R , который при $\beta = 45^\circ$ равен 1,054.

В статье [7] с помощью моделирования нестационарных процессов в сварных соединениях трубопроводов определено влияние нематаллических включений на изменение напряжений в металле шва, теоретический коэффициент концентрации напряжений равен 1,3. Вблизи включений на границе раздела с матрицей напряжения растут из-за различия физических характеристик стальной матрицы и нематаллических включений. Максимальные значения напряжений создаются на границе перехода основного металла к усилению корня шва с коэффициентом концентрации напряжений 1,8.

Авторами [8] проведено 2D моделирование методом конечных элементов с помощью пакета SIMULIA/Abaqus поведения при осевом растяжении плоского образца сварных соединений с различными видами дефектов сварного шва, определена их прочность при варьировании формы и положения дефекта. Наибольшее снижение величины деформации, при котором начиналось разрушение, характерно для подре-

зов у облицовочного шва. Моделированием показано, что в зоне усиления шва напряжения значительно ниже, чем в остальных участках сварного шва.

В настоящей статье приведены результаты компьютерного 3D моделирования изменения напряжений и деформаций в трубопроводе из теплостойкой стали 15X5M с кольцевым механически неоднородным сварным соединением в условиях нагружения постепенно повышающимся растягивающим усилием.

Моделирование процесса одноосного растяжения сварного соединения из труб с внутренним диаметром $\varnothing 151$ мм с кольцевым сварным швом методом конечных элементов проводилось с использованием модуля Abaqus/Explicit программного комплекса SIMULIA/Abaqus. Расчет проводился с использованием модели Мизеса. Для обеспечения необходимой точности расчетов размер сторон кубической ячейки конечно-элементной сетки в цилиндрических деталях выбирался равным 0,4 мм. При моделировании свойств труб, одностороннего шва с узкой разделкой (угол разделки 15°) и зоны термического влияния (ЗТВ) использовались значения, полученные при экспериментальном исследовании свойств однородного сварного соединения из стали 15X5M [9–11]. Упрочнение стали в процессе пластического деформирования учитывали по кривым упрочнения.

Толщина стенок труб составляла 10 мм, а длина моделируемого фрагмента – 40 мм. Толщина зоны термического влияния – 5 мм. Ширина валика усиления шва 20 мм, высота валика усиления шва 4,0 мм, высота усиления корня шва 1,0 мм. При соединении зон термического влияния с трубами и швом использовался вариант Tie, при котором прочность равна прочности соединяемых материалов. При моделировании глубина непровара равнялась 2 мм, радиус закругления равен 0. Изменялись в процессе моделирования исходные углы раскрытия непроваров и их протяженность. На рис. 1 представлен общий вид сварного соединения в сборе. Образцы сварного соединения подвергались осевому растяжению со скоростью 3 мм/с. Опасность дефекта определяли сравнением получаемых локальных деформаций и напряжений с аналогичными величинами в бездефектном соединении при тех же величинах растяжения.

Рис. 1. Моделируемое сварное соединение:
1 – трубы; 2 – зоны термического влияния; 3 – шов; 4 – непровар

В процессе моделирования фиксировалось изменение осевого усилия, напряжений и пластических деформаций в различных участках сварного соединения при варьировании величины растяжения.

Протяженность непровара в сварном соединении с углом раскрытия дефекта равным 30° при различных вариантах моделирования приведены в таблице. Визуализация полученных при моделировании распределений напряжений

Мизеса в стенках трех вариантов сварного соединения при величинах осевого растяжения показана на рис. 2.

Протяженность непровара
при различных вариантах моделирования

Протяженность непровара градус, мм	Вариант моделирования			
	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i>
60	52,3	7	3	отсутствует
мм		6,1	3,5

Рис. 2. Визуализация распределений напряжений Мизеса в стенках различных вариантов сварного соединения в средней части дуги непровара:
a – вариант *a*; *б* – вариант *б*; *в* – вариант *в*; при величинах осевой деформации 1–6; 2–9; 3–12 и 4–15 %, соответственно

Как видно из рис. 2, непровар с протяженностью 3° практически не влияет величину напряжений Мизеса в сварном соединении, а максимальные значения напряжений локализуются только в вершине непровара даже при величине осевой деформации 15 %. Увеличение длины дуги непровара до 7° приводит к формированию локальной зоны повышенных напряжений, начинающихся от вершины угла непровара уже при осевой деформации 12 %, а при 15 % осевой деформации эта зона с величиной напряжений 700–800 МПа выходит практически на внеш-

нюю поверхность зоны термического влияния.

При длине дуги непровара 60° напряжения величиной 700–800 МПа формируются практически на всей внешней цилиндрической поверхности ЗТВ при осевой деформации 12 %, а при 15 % эквивалентные напряжения достигают 900–1000 МПа.

На рис. 3 и 4 показано распределение в осевом направлении эквивалентных напряжений Мизеса и пластической деформации на внутренней поверхности сварного соединения по середине непровара.

Рис. 3. Распределение напряжений Мизеса на внутренней поверхности сварного соединения в середине непровара, при различных длинах дуги:
а – 3° ; б – 7° ; в – 60° при средней осевой деформации 1 – 9,4 %; 2 – 16,9 %; 3 – 22,5 %

Рис. 4. Распределение пластических деформаций на внутренней поверхности сварного соединения в середине непровара, при различных длинах дуги:
 $a - 3^\circ$; $б - 7^\circ$; $в - 60^\circ$ при средней осевой деформации 1 – 9,4 %; 2 – 16,9 %; 3 – 22,5 %

Увеличение дины дуги непровара заметно увеличивает величину пластической деформации в зоне дефекта и ширину деформируемой зоны при одних и тех же параметрах осевого деформирования. При моделировании намеренно не вводились критерии разрушения, однако достигнутые значения пластической деформации в вершине непровара 84 и 140 % при суммарной осевой деформации 16,9 и 22,5 %, соответственно, свидетельствует о высокой вероятности зарождения трещин.

Сравнение полученных диаграмм «осевое усилие растяжение – осевая деформация» (рис. 5) для моделируемых сварных соединений с различными размерами непровара показало, что в вариантах $б$ и $в$ диаграммы практически не имеют отличия от диаграммы для бездефектного варианта $а$, а при наличии непровара протяженностью 60° усилие, необходимое для сопоставимой деформации, снижается на 1,0–1,5 %.

Рис. 5. Диаграмма «осевое усилие растяжение – осевая деформация» для варианта с непроваром протяженностью 3° (1) и коэффициент К (2), показывающий снижение необходимого усилия при сопоставимых деформациях при наличии подреза протяженностью 60°

Выводы

1. Проведенное компьютерное моделирование изменения напряжений и деформаций в кольцевом сварном механически неоднородном соединении фрагментов труб из стали 15Х5М в условиях нагружения постепенно повышающимся осевым усилием показало, что непровар с длиной дуги 3° практически не влияет распределение эквивалентных напряжений Мизеса в сварном соединении, максимальные значения которого локализуются только в вершине непровара. При длине дуги непровара 60° напряжения величиной 700–800 МПа формируются практически на всей внешней цилиндрической поверхности ЗТВ при осевой деформации 12 %, а при 15 % эквивалентные напряжения достигают 900–1000 МПа.

2. Сравнение полученных диаграмм «осевое усилие растяжение – осевая деформация» для моделируемых сварных соединений с различными размерами непровара показало, что непровар протяженностью 7° практически не влияет на диаграмму, а при протяженности непровара 60° усилия, необходимые для сопоставимой деформации, снижаются на 1,0–1,5 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Плешанов, В. С. Мезомасштабный механизм локализации деформации при растяжении поликристаллов низкоуглеродистой стали с линейными концентраторами напряжений / В. С. Плешанов, В. Е. Панин, С. А. Кобзева, Н. А. Лебедева, А. В. Козлов // Физическая мезомеханика. – 2001. – Т. 4. – № 6. – С. 95–104.
2. Лепихин, А. М. Вероятностное моделирование предельных состояний и оценка ресурса и надежности трубо-

проводов / А. М. Лепихин, Е. В. Москвичев // Вычислительные технологии. – 2008. – Т. 13. – № S2. – С. 47–51.

3. Темис, Ю. М. Моделирование влияния дефектов диффузионной сварки на малоцикловую усталость неоднородных материалов / Ю. М. Темис, Х. Х. Азметов, Д. С. Тимофеев // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. – 2012. – № 2. – С. 145–156.

4. Захаров, М. Н. Оценка влияния дефектов сварных соединений на прочностную надежность стальных сосудов и аппаратов / М. Н. Захаров, В. А. Насонов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2013. – № 4. – С. 68–72.

5. Рыжиков, И. Н. Уточнение критерия оценки прочности сварных соединений с дефектами / И. Н. Рыжиков, К. А. Вагнер // Baikal Letter DAAD. – 2019. – № 1. – С. 73–77.

6. Шахматов, Д. М. Оценка опасности угловых концентраторов в сварных соединениях из хрупких материалов / Д. М. Шахматов, М. В. Шахматов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. – 2012. – № 39 (298). – С. 148–149.

7. Шестаков, А. П. Моделирование нестационарных процессов в сварном соединении трубопровода / А. П. Шестаков // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». – 2011. – № 5. – С. 376–387.

8. Гуревич, Л. М. Моделирование разрушения сварного соединения при растяжении / Л. М. Гуревич, В. М. Букин, А. А. Григорян // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 12 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – С. 83–87.

9. Тришкина, И. А. Микроструктуры хромомолибденовых сталей, используемых в нефтепереработке / И. А. Тришкина, Л. Е. Ватник, Ю. П. Трыков, Л. М. Гуревич // Прочность неоднородных структур : тез. III Евразийской науч.-практич. конф. – М., 2006. – С. 36.

10. Ватник, Л. Е. Структура хромомолибденовых сталей змеевиков технологических печей нефтеперерабатывающих установок / Л. Е. Ватник, Л. А. Тришкина, Ю. П. Трыков, Л. М. Гуревич // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2007. – № 5. – С. 48–53.

11. Гуревич, Л. М. Моделирование напряженно-деформированного состояния в сварных сосудах с кольцевым сварным соединением / Л. М. Гуревич, В. Ф. Даненко, А. А. Истрати, В. А. Соннова // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – С. 35–42.