УДК: 621.791: 519.876.5

DOI: 10.35211/1990-5297-2020-4-239-35-42

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

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
В СВАРНЫХ СОСУДАХ С КОЛЬЦЕВЫМ СВАРНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ**

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: mv@vstu.ru

Проведено компьютерное моделирование изменения напряжений и деформаций в условиях нагружения постепенно повышающимся внутренним давлением цилиндрических сварных сосудов с кольцевым механически неоднородным сварным соединением с дифференцированными механическими свойствами зон шва, термического влияния и основного металла. Показано, что при нагружении внутренним давлением максимальные напряжения развиваются в крышках сосудов, а кольцевые швы являются слабонагруженными. Исследовано распределение напряжений и деформаций в сварных швах при различных конструктивных параметрах сосудов.

Ключевые слова: сосуд, сварное соединение, шов, зона термического влияния, конечно-элементное моделирование, давление, деформация, напряжение.

© Гуревич Л. М., Даненко В. Ф., Истрати А. А., Соннова В. А., 2020.

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

MODELING THE WORK OF THE HEAD OF A HYDROMECHANICAL EXPANDER FOR WELDED PIPES OF A LARGE DIAMETER

Volgograd State Technical University

Finite element simulation of changing stresses and strains under loading by gradually increasing internal pressure of cylindrical welded vessels was carried out. The vessels had an annular mechanically inhomogeneous welded joint with different mechanical properties of the joint, heat-affected zone, and base metal. Maximum stresses developed in the caps of the vessels, and the annular joint is lightly loaded. The distribution of stresses and strains in joint at various design parameters of the vessels is investigated.

Keywords: vessel, welded joint, seam, heat-affected zone, finite element modeling, pressure, deformation, stress.

Образцы сварных соединений характеризуются наличием иерархии концентраторов напряжений различного масштаба, 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 результате влияния этих факторов в материалах со сварными соединениями в условиях эксплуатации могут происходить многоуровневые процессы деформации и накопления повреждений, которые в итоге приводят к разрушению конструкции.

В нормативных документах установлены требования к качеству сварных соединений, причем особое внимание уделяется наличию и величине дефектов. Например, согласно ГОСТ Р 52630–2012 и ГОСТ 23055–78 для стальных сосудов и аппаратов наиболее распространенных групп (1–3) при толщине основного металла 16 мм максимально допустимый размер поры или включения в шве равен 1,5 мм (по 4-му классу дефектности). При этом даже для наименее опасного 7-го класса указанная величина не превышает 3 мм, что составляет порядка 20 % толщины свариваемых элементов. При проведении очередной диагностики опасных технических устройств с обнаруженными дефектами сварного шва встает проблема принятия решения о возможности дальнейшей эксплуатации объекта, поскольку несмотря на наличие в изделии дефекта с размерами, превышающими допустимые по нормативам значения, конструкции безаварийно эксплуатировались в течение межремонтного периода, несмотря на присутствие в конструкции сварочных дефектов с момента изготовления. Таким образом, возникает необходимость экспериментальных и расчетных исследований фактической прочности ослабленных сварных соединений.

Существующие нормативные документы, основанные на инженерных методиках или накопленном опыте эксплуатации сварных кон-

струкций с различными дефектами, позволяют оценивать их остаточный ресурс, но они в ряде случаев предъявляют завышенные требования, запрещая эксплуатацию опасных технических устройств, которые могли бы успешно эксплуатироваться в течение значительного срока. Следовательно, актуальной является проблема создания и развития методов анализа сварных конструкций с имеющимися дефектами форм или сварного соединения.

Авторы статьи [2] проводили исследования на растяжение до разрушения плоских образцов сварного соединения, содержащих дефекты в сварном шве. Проведенные эксперименты показали, что металл сварного шва прочнее основного металла на 15 %. Действительное снижение прочности сварного соединения наблюдается при размере внутреннего дефекта свыше 30% толщины свариваемых деталей. При этом, согласно нормативным документам, это значение не должно превышать 20 %. Таким образом, оценку допустимости отмеченных дефектов для уже эксплуатируемых объектов рационально вести с использованием данных о критическом размере несплошности, наличие которой действительно приводит к снижению прочности конструкции. По мнению авторов статьи пропорциональное снижение прочности металла шва с увеличением размера дефекта, а также вязкий характер разрушения наплавленного металла свидетельствуют о нечувствительности материала сварного соединения к дефектам несплошности типа «сквозная несплошность металла шва». Дефект выступал в качестве фактора, уменьшающего рабочее сечение детали, а не как острый концентратор напряжений [3]. В свою очередь, в сварных соединениях, не чувствительных к дефектам, ослабление сечения шва может быть восполнено высотой валика усиления. Вследствие этого прочность таких изделий при размерах дефекта ниже некоторой величины будет определяться прочностью основного металла.

В работе [4] сделана попытка выработать универсальный критерий, позволяющий достаточно точно оценить реальную опасность дефекта, не прибегая к сложному численному упругопластическому моделированию напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции в зоне дефекта в каждом конкретном случае. Предполагалось, что разрушение конструкции, содержащей дефект сварного соединения, произойдет в случае, если действующие напряжения σ от внешних нагрузок превысят некоторое критическое значение $\sigma_{кр}$. численное значение этой величины должно определяться в зависимости от механических свойств материала и относительного размера несплошности. Для оценки опасности несплошности в сварном шве по мнению авторов достаточно информации о относительном размере дефекта и данных о стандартных прочностных характеристиках (S_T и S_B) основного и наплавленного металла в чистом виде.

Развитие методов конечно-элементного моделирования и возможностей компьютерной техники привело к попыткам их использования для оценки влияния дефектов сварных соединений на статическую и циклическую прочность. В статье [5] проведен численный конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния в зоне двух вариантов дефектов сварного шва вертикального цилиндрического резервуара в рамках деформационной теории упругопластичности (смещение кромок сварного шва и угловатость) и определены значения коэффициента концентрации напряжений в зависимости от величины дефекта и уровня нагрузки, которые сравниваются с данными, обобщающими результаты инженерных методик. Авторы использовали ряд допущений: выбиралось сечение в месте максимального смещения кромок вертикального сварочного шва резервуара, решалась задача о плоско-деформированном состоянии в рамках теории малых упругопластических деформаций. Зависимость значения коэффициентов концентрации напряжений от величины дефекта, полученная в ходе расчетов, качественно совпадала с кривыми натурных экспериментов, причем расчетные значения обычно оказывались ниже экспериментальных.

В статье [6] проведено моделирование нестационарных процессов в сварном соединении трубопровода и рассмотрено изменение напряженно-деформированного состояния в кольцевых сварных швах трубопровода. Максималь-

ные значения напряжений создаются на границе перехода основного металла к усилению корня шва. Теоретический коэффициент концентрации напряжений равен 1.8, который необходимо учитывать при расчете на циклическую прочность линейной части трубопроводов.

Использование метода 2D компьютерного моделирования позволило определить влияние дефектов стыкового сварного соединения с односторонним сварным швом на характер разрушения и изменение диаграммы «удлинение образца – усилие растяжения». Наибольшее снижение величины деформации, при котором начиналось разрушение, характерно для появления подрезов у облицовочного шва. Моделированием показано, что в зоне усиления шва напряжения значительно ниже, чем в остальных участках сварного шва [7].

Значительно меньшее внимание при моделировании уделяли изучению влиянию структурно-механической неоднородности сварного соединения, которая должна привести к неоднородности распределения упругопластических характеристик сплава по ширине сварного соединения, определяющих его прочность при механическом нагружении. В связи с этим интерес представляют исследования взаимосвязи структурной неоднородности и распределения значений упругих характеристик, а также создание методик расчета напряженно-деформированного состояния с учетом этих неоднородностей. В статье сотрудников Института машиноведения УрО РАН [8] методами компьютерного моделирования определены характеристики напряженно-деформированного состояния в разных зонах сварного соединения термически упрочняемого алюминиевого сплава 01420 с учетом изменения упругих свойств, обусловленных структурной неоднородностью. Исходные данные для моделирования были получены в результате исследования сваренных газовым CO_2 -лазером листовых заготовок толщиной 1.5 мм из сплава 01420Т в состаренном состоянии.

В материалах со сварными соединениями особую роль играют границы раздела. В работе [9] методами моделирования исследованы процессы эволюции пластического течения в сварных образцах с градиентным и скачкообразным изменением механических свойств в зоне термического влияния и показано, что зарождение и развитие макролокализованной пластической деформации в сварных образцах зависит от соотношения концентраций напряжений, обу-

словленных геометрической кривизной поверхности образца и разницей механических свойств в зонах шва, термического влияния и основного металла. В случае сварного соединения, характеризующегося скачкообразным изменением механических свойств в зоне термического влияния, геометрически обусловленные напряжения у захватов заметно превышают напряжения в зоне сварного шва. Это является причиной зарождения пластических сдвигов и формирования фронтов Людерса в области закругления галтелей. В случае плавного изменения механических свойств зоны термического влияния уровень напряжений вблизи границы с зоной переплава сравним с напряжениями в зоне закругления галтелей, и первые пластические сдвиги зарождаются в этих областях одновременно. Однако при последующем нагружении макроскопические фронты локализованной пластической деформации формируются на границе «зона термического влияния – основной металл», в то время как пластическое течение вблизи галтелей практически прекращает свое развитие.

Разработка методов оптимизации структуры и свойств сварных соединений, позволяющих минимизировать опасный уровень концентрации напряжений вблизи границ раздела, является актуальной инженерной и научной проблемой, требующей теоретических и экспериментальных исследований.

В настоящей работе приведены результаты компьютерного моделирования изменения напряжений и деформаций в цилиндрических сварных сосудах с кольцевым механически не-

однородным сварным соединением в условиях нагружения постепенно повышающимся внутренним давлением.

Моделирование процесса трехосного растяжения цилиндрических сосудов 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 сосуда и тетраэдрических ячеек в крышках сосуда выбирался равным 0,5 мм. При моделировании свойств цилиндрических деталей сосуда, крышек, 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 [10, 11]. Упрочнение стали в процессе пластического деформирования учитывали по кривым упрочняемости (рис. 1).

Толщина стенок цилиндрических деталей сосудов и криволинейных крышек составляла 10 мм. Толщина зоны термического влияния – 5 мм. Радиус галтели в зоне соединения крышек с цилиндрическими деталями сосудов – 20 мм. При соединении цилиндрического сосуда с крышкой используется вариант Tie, при котором прочность равна прочности соединяемых материалов. Размеры деталей сосудов при различных вариантах моделирования приведены в таблице и на рис. 2.

Рис. 1. Кривые упрочняемости стали 15X5M в различных участках сварного соединения: 1 – основа; 2 – ЗТВ; 3 – шов

Размеры цилиндрических деталей сосуда при различных вариантах моделирования

Размер, мм	Вариант моделирования		
	1	2	3
a	40	90	90
b	40	40	0

В процессе моделирования давление внутри сосуда поднималось до 21 МПа. В процессе моделирования фиксировалось изменение напряжений и пластических деформаций в различных участках сосуда при варьировании внутреннего давления. Визуализация полученных при моделировании распределений напряжений Мизеса в стенках трех вариантов сосуда при приложенных давлениях 9,0; 15,0 и 21 МПа показана на рис. 3.

Рис. 2. Размеры цилиндрических деталей сосуда при различных вариантах моделирования

Рис. 3. Визуализация распределений напряжений Мизеса в стенках различных вариантов сосуда:
а – вариант 1; б – вариант 2; в – вариант 3; при приложенных давлениях 9,0 (1); 15,0 (2) и 21 МПа (3)

Как видно на рис. 3, максимальные величины распределений Мизеса находятся в зоне галтелей верхних и нижних крышек сосудов, что вероятно связано с высокой жесткостью этой зоны. При 15 МПа крышки сосудов начинают пластически деформироваться что приводит перераспределению напряжений. Во всех моделируемых вариантах в зонах цилиндрических стенок, примыкающих к нижней и верхней крышкам, формируются кольцевые пояса с пониженным уровнем напряжений. Визуализация напряжений при всех вариантах моделирования показывает, что напряжения в сварном соединении (шве, ЗТВ и исходном металле вблизи ЗТВ) практически не отличаются по окраске от напряжений в близлежащих стенках

цилиндрических деталей сосудов. При большем масштабе увеличения визуализации видно, что распределение напряжений в сварном шве неоднородно: наименее нагруженной является усиление сварного шва, особенно в варианте моделирования 3, наибольшие напряжения в варианте 1 сосуда в ЗТВ вблизи внутренней поверхности (рис. 4, 5). Повышенный уровень напряжений в ЗТВ привел к развитию пластических деформаций в корне сварного шва в первом варианте моделируемого сосуда (рис. 6). В варианте 3, когда сварной шов соединяет цилиндрическую стенку сосуда с крышкой пластическая деформация в сварном соединении отсутствовала.

Рис. 4. Визуализация распределений напряжений Мизеса в сварном соединении различных вариантов сосуда:
а – вариант 1; б – вариант 2; в – вариант 3; при приложенных давлениях 9,0 (1); 15,0 (2) и 21 МПа (3)

Рис. 5. Распределение напряжений Мизеса на внешней поверхности сварного соединения при различных вариантах сосуда:
a – вариант 1; *б* – вариант 2; *в* – вариант 3; при приложенных давлениях 9,0 (1); 15,0 (2) и 21 МПа (3)

Рис. 5. Визуализация распределений пластических деформаций в сварном соединении первого (*a*) и второго (*б*) вариантов сосуда при приложенных давлениях 9,0 (1); 15,0 (2) и 21 МПа (3)

Выводы

1. Проведенное компьютерное моделирование изменения напряжений и деформаций в цилиндрических сварных сосудах из стали 15Х5М с кольцевым механически неоднородным сварным соединением в условиях нагружения постепенно повышающимся внутренним давлением показало, что наибольший уровень напряжений, приводящих к развитию пластических деформаций, развиваются в крышках сосуда. Уровень напряжений в сварном соединении не превышает напряжений в кольцевых стенках сосуда.

2. Изменение осевых размеров деталей сосуда при постоянстве его радиуса и толщины стенок приводит к значительным изменениям уровня напряжений в сварном шве при постоянстве приложенного внутреннего давления. Наиболее разгружен сварной шов, соединяющий цилиндрические стенки сосуда с галтелью в крышке.

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. Захаров, М. Н. Экспериментальное моделирование поведения сварных соединений с дефектами несплошности при критических нагрузках / М. Н. Захаров, В. А. Насонов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2014, № 2. – С. 65–71.
3. Проектирование сварных конструкций в машиностроении / под ред. С. А. Куркина. – М. : Машиностроение, 1975. – 376 с.
4. Захаров, М. Н. Критерий разрушения сварных стыковых соединений с внутренними дефектами / М. Н. Захаров, В. А. Насонов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2014. – № 7 (652). – С. 76–82.
5. Смирнова, И. Н. Численное моделирование дефектов стыковых сварных соединений типа угловатость и деформация / И. Н. Смирнова, Р. Ю. Банников // Вестник ПГТУ. Механика. – 2009. – № 1. – С. 72–78.
6. Шестаков, А. П. Моделирование нестационарных процессов в сварном соединении трубопровода / А. П. Шестаков [и др.] // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». – 2011. – № 5. – С. 376–387.
7. 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.
8. Смирнов, С. В. Структурная неоднородность сварного соединения алюминиевого сплава и моделирование его упругой деформации / С. В. Смирнов [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2014. – Т. 17. – № 1.
9. Романова, В. А. Моделирование зарождения и развития локализованной пластической деформации в стальных образцах со сварными соединениями / В. А. Романова, Р. Р. Балохонов // Физическая мезомеханика. – 2008. – Т. 11. – № 5.
10. 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. Евразийской науч.-практ. конф. – М., 2006. – С. 36.
11. Ватник, Л. Е. Структура хромомолибденовых сталей змеевиков технологических печей нефтеперерабатывающих установок / Л. Е. Ватник, И. А. Тришкина, Ю. П. Трыков, Л. М. Гуревич // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2007. – № 5. – С. 48–53.