M336609

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшее
техническое училище имени Н.Э.Баумана

НА ДОМ НЕ ВЫДАЕТСЯ

На правах рукописи

СИГАЕВ Анатолий Алексеевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ СОСУДОВ ДАВЛЕНИЯ И ТРУБОПРОВОДОВ ИЗ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ

(05.04.05 - Технология и машины сварочного производства)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 1979

Работа выполнена в Ростовском-на-Дону институте сельскохозяйственного машиностроения

Научный руководитель - профессор Н.М. БУДНИК

Научный консультант - канд. техн. наук, доцент В.Ф. ЛУКЬЯНОВ

Официальные оппоненты -

профессор, доктор техн. наук Л.С. ЛИВШИЦ

канд. техн. наук В.М. ХОВОВ

Ведущее предприятие - Всесоюзный научно-исследовательский институт строительства трубопроводов (ВНИИСТ).

Защита диссертации состоится " " _____ 1979 г.

на заседании специализированного Совета Д.053.15.07 по технологии и машинам сварочного производства Московского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшего технического училища им. Н.Э. Баумана по адресу: Москва, 107005, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по указанному адресу.

С[illegible]теке МВТУ им.

[illegible] 1979 г.

[illegible] СТЕКЛОВ О.И.

М336609

П[illegible]

Л-[illegible]аж 100 экз.

Ро[illegible]-я Бауманская 5.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана
1336609
Сигаев А.А. Исследование

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Рост габаритов и энергоемкости сварных сосудов давления путем интенсификации технологических параметров эксплуатации и использования материалов повышенной прочности увеличивает степень опасности их разрушения. Для успешного решения проблемы обеспечения надежной работы сварных листовых конструкций, работающих под давлением, (и в первую очередь - магистральных трубопроводов) необходимы всесторонние исследования причин и процесса разрушения сварных соединений, с целью обоснований требований к технологии и качеству.

Большинство известных исследований прочности указанных конструкций направлены на предотвращение "лавинных" разрушений. Однако, в настоящее время, задача предотвращения "локальных" разрушений становится не менее актуальной не только как способ исключения предпосылок для "лавинных" разрушений, но и в связи с большими убытками, вызываемыми загрязнением окружающей среды, при "локальных" разрушениях. Поэтому особую важность приобретает изучение механизма разрушения на его начальной стадии - зарождения и развития протяженных трещин, вызывающих разгерметизацию или самопроизвольное развитие разрушения.

Цель работы. Целью настоящей работы является выявление роли дефектов листового металла и сварных соединений в образовании крупных трещин в сосудах давления и трубопроводах.

Методы исследования, применяемые в работе, включали механические испытания при одноосном и двухосном растяжении в условиях статического и повторно-статического нагружения на элементах натурных конструкций, металлографический анализ, измерение деформаций методом тензометрирования, поляризационно-оптический метод и др. Для анализа напряженного состояния в области сварного соединения использовались методы теории упругости и строительной механики. Обработка результатов экспериментов производилась с использованием методов математической статистики и привлечением ЭВМ, М-222.

Научная новизна работы заключается в новом решении актуальной научной задачи, состоящей в установлении определяющего влияния геометрических искажений в области сварного шва на малоцикловую усталость сварного соединения; установлении закономерности снижения долговечности сварных спиральношовных труб под влиянием местного искривления кромок в зоне шва, позволяющей расчетным

путем установить допустимую величину дефекта типа "домик" для заданных условий эксплуатации; в представлении оценки комплексного влияния "домика" и смещения кромок на концентрацию напряжений в зоне шва, которая должна проводиться путем сложения изгибающих напряжений, вызванных каждым из дефектов в отдельности; в разработке метода оценки работоспособности спиральношовных труб магистральных трубопроводов путем испытания панелей, вырезанных из натурных труб.

Практическая ценность. Предложен способ расчета предельно-допустимой величины "домика" для конкретного изделия при заданных условиях эксплуатации, на основании которого разработаны рекомендации по допустимой величине "домика" при производстве спиральношовных труб. Разработано оборудование для испытаний сварных элементов крупногабаритных сосудов давления в условиях двухосного напряженного состояния при статических и повторностатических нагрузках.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались: на научном семинаре кафедры "Машины и автоматизация сварочных процессов" МВТУ им. Н.Э. Баумана (сентябрь, 1976 г.; июнь, 1978 г.); на научно-техническом семинаре "Методы оценки и пути повышения качества газонефтепроводных труб", г. Челябинск, (ноябрь, 1976 г.); на семинаре отдела сварки ВНИИГАЗ, г. Москва (сентябрь, 1976 г.); на зональных конференциях сварщиков Урала, в 1973-1977 г.; на XXIX итоговом совещании по производственным и научно-исследовательским работам в области сварки, выполненным в 1977 г., г. Ленинград, (июнь, 1978 г.).

Рекомендации по ограничению допустимой величины дефекта типа "домик" приняты к внедрению Волжским трубным заводом.

По теме диссертации имеется 1 авторское свидетельство и опубликовано 9 статей.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и общих выводов по работе, изложена на 192 страницах машинописного текста, в том числе 12 таблиц, 100 рисунков и библиография из 98 наименований.

В первой главе изложено состояние вопроса и сделана попытка определить возможные причины преждевременного разрушения сосудов давления и трубопроводов.

Анализ известных случаев разрушения позволяет заключить, что большинство аварий сосудов давления происходит при напряжениях

МВТУ
им. Н. Э. Баумана
ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ
БИБЛИОТЕКА

значительно ниже допускаемых, в интервале средних напряжений 0,2-0,7 от предела текучести материала. Наиболее вероятным источником разрушения являются участки сварных соединений. Так, по данным Ван дер Поста, Филлипса и Уорвика, в зоне шва и зоне термического влияния происходит свыше 80% разрушений. Аналогичные результаты получены в лаборатории Главнефтеснаба РСФСР.

Характерным для большинства случаев разрушения является весьма незначительная величина пластической деформации металла, предшествующая разрушению. Это может быть вызвано многими факторами: воздействием термомеханического цикла сварки, усложнением схемы напряженного состояния в локальном объеме и т.п. Однако, с позиций механики разрушения наиболее вероятным следует предполагать наличие исходной трещины, как источника разрушения, либо наличие дефекта, который при определенных условиях образует трещину. Расчеты, подтвержденные экспериментами на трубах 720х9 мм (А.Даффи), показывают, что критическая длина трещины, способная вызвать разрушение, находится в пределах 150÷400 мм, в зависимости от уровня рабочих нагрузок в момент разрушения. В работах М.П. Анучкина и Л.С. Лившица также указывается на существование в реальных трубопроводах трещин длиной 150÷300 мм, не послуживших источником разрушения. Учитывая, что трещины такой длины не могут быть пропущены технической службой завода-изготовителя, можно предположить следующие возможные причины появления в сосуде давления (трубопроводе) трещин критической длины: а) уменьшение критической длины трещины или снижение критического значения коэффициента интенсивности напряжений (K_c) за счет влияния термомеханического цикла сварки, либо вследствии понижения температуры при разгерметизации сосуда; б) подрастание трещины вследствии влияния коррозионных эффектов; в) появление и рост трещин за счет повторно-статических нагрузок в процессе транспортировки, монтажа и эксплуатации.

Следует отметить, что если исследование влияния первых двух причин получило развитие в работах М.П. Анучкина, В.А. Винокурова, О.Н. Винклера, С.А. Куркина, А.Н. Моношкова, Э.М. Гутмана, О.И.Стеклова и др., то механизм появления в трубопроводах трещин докритической длины за счет повторно-статических нагрузок изучен мало. До настоящего времени расчет магистральных трубопроводов не предполагает наличия циклических нагрузок. Тем не менее факты существования циклических нагрузок приводят к необходимости исследования их

влияния на работоспособность сосудов давления (трубопроводов) и, в первую очередь, их сварных соединений.

В настоящей работе были поставлены следующие задачи:

I. Разработка методики испытаний крупногабаритных образцов с максимальным приближением условий испытаний к реальным условиям работы конструкции.

2. Оценка возможности образования протяженных трещин от дефектов, пропущенных при контроле.

3. Разработка мероприятий, направленных на предотвращение причин, способствующих зарождению трещин.

Во второй главе изложена методика испытаний крупногабаритных элементов сосудов давления и трубопроводов.

Исходя из анализа существующих направлений экспериментальных исследований прочности сварных сосудов давления, в настоящей работе использовали способ испытания листовых образцов методом гидростатического выпучивания, основы и методологию которого разработали С.А. Куркин, Е.М. Кузмак, В.Ф. Лукьянов, Я.Б. Фридман и др. Основное преимущество способа: возможность испытания в лаборатории сварных соединений сосудов давления в условиях максимального приближения к условиям работы материала в реальной конструкции. Это достигается тем, что в качестве образца может быть использован сферический сегмент или цилиндрическая панель, вырезанная непосредственно из изделия. При нагружении такого образца давлением жидкости его рабочая часть испытывает двухосное напряженное состояние с соотношением компонент $\sigma_1/\sigma_2 = 1$ (сфера), или $\sigma_1/\sigma_2 = 2$ (цилиндр). Данный метод экспериментальных исследований является наиболее достоверным при оценке конструктивной прочности сосудов давления и при изучении механизма начальной стадии разрушения, поскольку позволяет учитывать технологические и конструктивные особенности получения сварного соединения в условиях массового производства.

Для возможности испытаний крупногабаритных образцов была спроектирована и изготовлена установка УДР-10*, мощностью 5000 тонн, позволяющая испытывать листовой металл (и его сварные соединения) толщиной от 4-х до 20-ти мм, то есть в наиболее распространенном диапазоне толщин, используемых при производстве крупногабаритных сварных сосудов давления и трубопроводов. Конструкция установки

* Авторское свидетельство № 254177 на имя Лукьянова В.Ф., Сигаева А.А., Крумбольдта М.Н., Будника Н.М.

позволяет проводить испытания цилиндрических панелей, вырезанных из натурных труб большого диаметра: от 630 мм до 1220 мм. Гидроэлектросхема обеспечивает нагружение образцов при статических и повторно-статических испытаниях.

Оценку прочностных свойств основного металла проводили при статическом нагружении образцов в условиях одноосного (стандартные образцы) и двухосного растяжения: выпучивание плоского листа через круглую матрицу $\varnothing$ 700 мм. Для испытаний при двухосном растяжении разработаны и изготовлены специальные приспособления, позволяющие измерять деформацию и кривизну в центральной части выпучины.

Основной объем исследований малоцикловой прочности сварных соединений проводили при испытаниях цилиндрических панелей, вырезанных из трубы 820х10 мм. Размеры панели: 950 мм по дуге и 900 мм - по образующей. Тензометрированием подтверждено, что окружные растягивающие напряжения в стенке панели при нагружении ее внутренним давлением не отличаются более чем на 5% от расчетных значений по известной формуле $\sigma_1 = PR/t$ (p - величина давления, R и t - радиус кривизны и толщина стенки).

В процессе повторно-статических нагружений цилиндрической панели наблюдения за поверхностью образца проводили визуально, а также с помощью оптической системы прибора РВП-52. За критерий долговечности принимали число циклов до нарушения герметичности стенки панели.

<u>В третьей главе</u> рассмотрены результаты экспериментальных исследований по определению относительного влияния дефектов сварного соединения в образовании протяженных трещин при малоцикловом нагружении.

Объектом исследования была выбрана спиральношовная труба сечением 820х10 мм, изготавливаемая Волжским трубным заводом из стали 17Г2СФ ($\sigma_{0,2} \geq 38$ кгс/мм^2, $\sigma_в \geq 55$ кгс/мм^2, $\delta = 23\%$) поставки Ново-Липецкого металлургического комбината.

Испытаниями основного металла установлено, что рулонная сталь 17Г2СФ обладает повышенной анизотропией механических свойств, особенно в термообработанном состоянии: в направлении поперек проката величины $\sigma_{0,2}$ и $\sigma_в$ превышают в 1,5 раза аналогичные показатели вдоль проката, при снижении пластичности более чем в 2 раза.

Прочность рулонной стали при двухосном растяжении соответствует ее пределу прочности, полученному при стандартных испытаниях

на одноосное растяжение. В то же время ее запас пластичности не всегда может быть реализован в натурной конструкции. Одной из причин снижения пластичности является наличие поверхностных закатов, ориентированных вдоль направления проката.

Сопротивляемость основного металла малоцикловому разрушению зависит от ориентации источника разрушения относительно направления проката. В одноосном поле напряжений усталостная трещина развивается перпендикулярно растягивающей силе, независимо от направления проката. В условиях двухосного растяжения ($\sigma_1/\sigma_2=2$) влияние анизотропии на траекторию усталостной трещины весьма существенно. Трещина, инициированная надрезом вдоль оси трубы, изменяет свое направление и развивается вдоль направления проката, под углом к направлению действия максимальных растягивающих напряжений. Процесс разрушения металла в надрезе идет путем одновременного зарождения и последующего объединения большого количества отдельных трещин. Поэтому, с увеличением протяженности надреза скорость развития разрушения конструкции возрастает. В связи с этим закаты большой протяженности, имеющиеся на поверхности металла, являются потенциальным источником зарождения протяженных трещин. Закалка стали 17Г2СФ с последующим высоким отпуском способствует повышению сопротивления зарождению разрушения в надрезе при малоцикловом нагружении, но влияния ее на скорость роста трещины не обнаружено.

Сопротивляемость циклическим нагрузкам сварных соединений спиральношовной трубы исследовали при испытаниях цилиндрических панелей, вырезанных таким образом, чтобы шов являлся осью симметрии рабочей поверхности панели. Все швы подвергались 100%-му ультразвуковому и рентгеновскому контролю.

Для испытаний были отобраны образцы с наиболее распространенными дефектами сварных швов: поры, шлаковые включения, непровар корня, подрезы на линии сплавления спирального шва, трещины в стыковом шве. С целью выяснения возможности развития разрушения от дефектов, пропущенных при контроле, размеры дефектов значительно превышали допускаемые требованиями СНиП и ТУ. Например, глубина подрезов, расположенных на линии сплавления составляла до 30% от толщины стенки; непровар - глубиной до 2-х мм. Для оценки влияния термообработки как фактора, повышающего сопротивляемость циклическим нагрузкам, ряд образцов вырезали из труб, прошедших закалку и отпуск по заводской технологии, и только отпуск для снятия остаточных напряжений.

Местное повышение напряжений в районе шва может быть обусловлено также искажением геометрической формы трубы в этой зоне. Для спиральношовных труб характерным является локальное искажение кривизны трубы в зоне шва, вызванное смещением кромок и "домиком" - угловыми искажениями кромок. Следует отметить, что если допускаемая величина смещения кромок оговаривается действующими требованиями СНиП, то ограничения по величине "домика" в технической документации отсутствуют. Величину "домика", определяемую как абсолютное поднятие кромки полосы на линии сплавления относительно средней поверхности трубы, оценивали на основании профилограмм поверхности. Измерения показали, что величина "домика" на спиральношовных трубах колеблется в пределах 0,5 - 3,5 мм на базе 160 мм.

Малоцикловые испытания показали, что долговечность образцов с различного рода недопустимыми дефектами находится в том же интервале, что и у образцов с качественным швом: 8000÷60000 циклов (рис. 1). Влияние термообработки на малоцикловую усталость выражено слабо. Среднее значение у термообработанных образцов (31000) выше, чем у нетермообработанных (16000), однако гарантированное значение долговечности с вероятностью 98% практически одинаково в обоих случаях.

Особенного внимания заслуживает тот факт, что ни один из названных дефектов сварного шва не явился источником разрушения. Развитие усталостной трещины на всех образцах начиналось на линии сплавления внутреннего шва и развивалось перпендикулярно поверхности стенки трубы, то есть перпендикулярно плоскости действия растягивающих напряжений.

Причиной, определившей характер разрушения, следует считать перераспределение напряжений по толщине стенки трубы, вызванное наличием "домика". В сочетании с концентрацией напряжений на линии перехода от основного к наплавленному металлу это привело к значительному увеличению напряжений на линии сплавления внутреннего шва. В то же время, в результате суммарного воздействия растягивающих (мембранных) напряжений и сжимающих от изгиба, вызванного "домиком", дефекты, расположенные в средней части сечения (корень шва) и в зоне наружнего шва, оказались в области действия меньших напряжений и не вызвали разрушения. Преимущественному влиянию "домика" способствует также его значительная протяженность. В процессе цик-

лического нагружения накопление пластических деформаций приводит к появлению отдельных, "зародышевых" трещин на тех участках линии сплавления, которые отличаются более резким радиусом перехода, микроподрезами и другими факторами, способствующими местному увеличению концентрации напряжений. Трещины, образовавшиеся в таких местах, ориентированы в одном направлении и расположены на одной линии (линии сплавления), что значительно ускоряет дальнейший процесс разрушения, в ходе которого за счет слияния отдельных трещин происходит образование магистральной трещины и быстрое ее развитие в глубину. Эксперименты показали, что долговечность образцов, в основном, определяется числом циклов до образования некоторого количества отдельных трещин, длиной 2÷5 мм, после чего нарушение герметичности наступает менее чем через 2÷3 тысячи циклов. При этом протяженность трещины на внутренней поверхности трубы составляла 300÷400 мм.

В четвертой главе проанализировано влияние искажений геометрической формы трубы в зоне шва на малоцикловую усталость.

В общем случае, концентрация напряжений на линии перехода от наплавленного к основному металлу, есть функция комплексного влияния:

$$\alpha_{\Sigma} = F(\alpha_{\phi}; \alpha_{см}; \alpha_{д}); \qquad (I)$$

где $\alpha_{\phi}, \alpha_{см}, \alpha_{д}$ - коэффициенты концентрации, отражающие влияние формы усиления шва, смещения кромок и "домика" (соответственно). Определение α_{ϕ} достаточно подробно исследовано в работах Г.А. Николаева, Д.И. Навроцкого, Г.А. Бельчука, И.И. Макарова и подтверждено большим количеством опытов. Необходимые для расчета α_{ϕ} геометрические параметры формы усиления шва определяли при 10-ти кратном увеличении фотографий макрошлифов поперечного сечения шва, вырезанных из 40 разных труб. Как показали измерения, эти параметры (ширина и высота усиления, радиус перехода от наплавленного к основному металлу) характеризуются высокой стабильностью, что является следствием тщательного соблюдения технологического режима сварки при производстве труб. Поэтому, значения α_{ϕ}, посчитанные по формуле Д.И. Навроцкого, изменялись в небольших пределах: 1,3÷1,5 при среднестатистическом значении $\bar{\alpha}_{\phi} = 1,42$.

Коэффициент концентрации напряжений, вызванной "домиком", определяли, как

$$\alpha_{д} = 1 + \frac{\sigma_{и(д)}}{\sigma_{р}}; \qquad (2)$$

где σ_p – средние растягивающие напряжения в стенке трубы; $\sigma_{u(g)}$ напряжения от изгиба, вызванного наличием "домика". Для определения $\sigma_{u(g)}$ использовали расчетную модель в виде кольца единичной толщины, имеющего начальную погибь в своей плоскости и нагруженного по внутреннему контуру равнораспределенной нагрузкой q. Смещение точек кольца от круговой формы задали в виде $\bar{\omega} = \omega + z$, где ω – начальное отклонение (погибь); z – перемещение точек кольца, вызванное нагрузкой. Начальное отклонение задавали функцией:

$$\omega = \begin{cases} f(\varphi), & |\varphi| \le \varphi_0 \\ 0, & |\varphi| > \varphi_0 \end{cases}; \qquad (3)$$

где $2\varphi_0$ – центральный угол, ограничивающий ту часть кольца, на которой имеет место отклонение его профиля от окружности; φ – текущая координата.

Исходное дифференциальное уравнение упругой линии для гибкого кольца, нагруженного равнораспределенной нагрузкой q, с учетом начального прогиба ω, имеет вид:

$$\frac{d^5 z}{d\varphi^5} + 2\frac{d^3 z}{d\varphi^3} + \frac{dz}{d\varphi} + \frac{qR^3}{EJ}\left(\frac{d^3 z}{d\varphi^3} + \frac{dz}{d\varphi}\right) = -\frac{qR^3}{EJ}\left(\frac{d^3\omega}{d\varphi^3} + \frac{d\omega}{d\varphi}\right). \qquad (4)$$

Его решение в рядах Фурье:

$$z = \sum_{K=2}^{\infty} (C_K \cdot \cos K\varphi + d_K \cdot \sin K\varphi). \qquad (5)$$

Используя общее выражение для момента:

$$M_u = EJ\frac{(z + z'')}{R^2}; \qquad (6)$$

получаем:

$$M_u = qR\sum_{K=2}^{\infty} \frac{a_K \cdot \cos K\varphi + b_K \cdot \sin K\varphi}{1 + qR^3/EJ(K^2 - 1)}. \qquad (7)$$

Расчет выполняли на ЭВМ М-222. Профиль начального отклонения задавали координатами точек с шагом φ_i =0,02 рад, полученных на основании профиллограмм спиральношовных труб. Результаты расчета показали, что максимальная величина $\sigma_{u(g)}$ при $\varphi_0 = const$ имеет весьма близкие значения при разных формах кривизны локального искажения и зависит только от $\omega_{max} = h$. Поэтому, в дальнейших расчетах при определении общих закономерностей влияния парамет-

ров "домика" на максимальные $\sigma_{u(g)}$ в зоне шва, функцию $f(\varphi)$ в выражении (3) задавали конхоидой:

$$\omega = \frac{A}{\cos\varphi} + B \quad ; \quad \omega_{max} = h . \tag{8}$$

На основании расчетов зависимость $\alpha_g = f(h)$ может быть представлена уравнением прямой:

$$\alpha_g = 1 + \beta_g \frac{h}{t} \quad ; \tag{9}$$

где β_g - коэффициент, учитывающий упругое перемещение стенки трубы, величина которого определяется жесткостью кольца и базой "домика". В общем случае β_g может принимать значения от нуля (минимальная жесткость при большой базе "домика") до β_g =6 (максимальная жесткость при малой базе "домика"). Для кольца сечением 820x10 мм при базе "домика" φ_o = 0,2 рад, - β_g = 3,4.

Методика расчета концентрации напряжений, вызванной смещением кромок (α_{cm}), для модели сварного соединения в виде стержня с шарнирным закреплением, нагруженного растягивающим усилием, разработана И.И. Макаровым. Однако, возможность ее использования в нашем случае не очевидна, так как схемы приложения нагрузок для стержня и оболочки, нагруженной давлением, принципиально различны. Поэтому, расчет α_{cm} производили, используя дифференциальное уравнение упругой линии для гибкого кольца, нагруженного равнораспределенной нагрузкой q и имеющего начальную погибь, то есть аналогично расчету α_g , с учетом разницы в геометрических параметрах "домика" и смещения кромок.

На основании расчета:

$$\alpha_{cm} = 1 + \beta_{cm} \frac{\Delta}{t} \tag{10}$$

где Δ - абсолютная величина смещения. В зависимости от жесткости кольца и базы смещения β_{cm} изменяется от 3-х до 6.

При оценке совместного влияния "домика" и смещения кромок на концентрацию напряжений в зоне шва исходили из того, что в обоих случаях увеличение напряжений вызвано появлением дополнительных изгибающих напряжений. Поэтому суммарный коэффициент концентрации напряжений:

$$\alpha_{(g+cm)} = 1 + \frac{\sigma_{u(g)}}{\sigma_p} + \frac{\sigma_{u(cm)}}{\sigma_p} = 1 + \beta_g \frac{h}{t} + \beta_{cm} \frac{\Delta}{t} . \tag{11}$$

Справедливость такого подхода подтверждена результатами расчета распределения изгибающих напряжений в зоне локальной погиби

кольца, вызванной обоими факторами. На рис. 2 представлены графики $\sigma_u = f(\varphi)$ отдельного влияния: смещения кромок (I), "домика" - (2); а также их совместного влияния - (3). Во всей области искажения величина σ_u при наличии и "домика" и смещения кромок есть алгебраическая сумма напряжений изгиба, вызванных "домиком" и смещением кромок раздельно.

С учетом (II) комплексный коэффициент концентрации напряжений на линии сплавления, учитывающий влияние формы усиления шва, "домика" и смещения кромок, можно посчитать по формуле:

$$\alpha_\Sigma = \alpha_\Phi \left(1 + \beta_g \frac{h}{t} + \beta_{cm} \frac{\Delta}{t}\right). \qquad (I2)$$

Возможность практического использования формулы (I2) подтверждена экспериментами по определению α_Σ поляризационно-оптическим методом на моделях сварного соединения.

На основании статистической обработки результатов измерений "домика" и смещения кромок на спиральношовных трубах (около 5000 измерений) установлено, что при существующей технологии производства труб наиболее нестабильное влияние на величину концентрации напряжений оказывает дефект "домика" (рис. 3). Комплексный коэффициент концентрации напряжений, отвечающий средним значениям выборки, составил: $\bar{\alpha}_\Sigma = 2{,}44$; а в наиболее неблагоприятном случае: $\alpha_\Sigma = 4$.

При малоцикловом нагружении спиральношовной трубы с постоянной амплитудой нагрузки реализуется схема "мягкого" нагружения. Однако, в зоне концентрации напряжений, на линии сплавления, условия нагружения можно рассматривать как "жесткие", поскольку образование пластических деформаций ограничено задаваемой полной деформацией. Экспериментами подтверждено, что уменьшение величины "домика" (примерно на I5%) происходит только при первых I0-ти циклах нагружения, после чего на протяжении всех испытаний изменение величины "домика" не превышает 5%. Это позволяет использовать известную зависимость Мэнсона-Коффина между предельной амплитудой деформации и числом циклов до разрушения. С учетом выражения (I2) максимальная амплитуда напряжений на линии перехода от наплавленного к основному металлу, в направлении, перпендикулярном шву:

$$\sigma_a = \alpha_\Phi \left(1 + \beta_g \frac{dh}{t} + \beta_{cm} \frac{\Delta}{t}\right)\left(\sin^2\theta + m\cdot\cos^2\theta\right)\sigma_1 ; \qquad (I3)$$

где σ_1 – средние напряжения в стенке трубы, действующие в окружном направлении; $d = 0{,}85$ – коэффициент, учитывающий уменьшение величины "домика" при первых циклах нагружения; $m = \sigma_2/\sigma_1 = -0{,}5$; θ – угол между направлением спирального шва и продольной осью трубы. Допуская, что в области малых пластических деформаций коэффициенты концентрации напряжений (α_σ) и деформаций (α_ε) могут быть приняты равными (Kooistra L.F. , Шнейдерович Р.М.), выразим в формуле (I3) величины напряжений через величины деформаций и, решая преобразованное уравнение совместно с уравнением Мэнсона–Коффина, получим:

$$[h] = \frac{t(\sin^2\theta + m\cos^2\theta)^{-1}}{0{,}85\alpha_\Phi \beta_g \sigma_1}\left[\frac{E}{2}\left(\ln\frac{1}{1-\psi}\right)^{0.6} \cdot N^{-0.6} + 1{,}75\sigma_в \cdot N^{-0.12}\right] - \frac{\beta_{cm}\Delta + t}{0{,}85\beta_g}. \quad (I4)$$

Выражение (I4) позволяет определить предельно-допустимую величину "домика" для конкретного сосуда с толщиной стенки t , из материала с механическими свойствами ($\sigma_в, E$, ψ) и при заданных условиях работы: амплитуде рабочих напряжений σ_1 и числе циклов нагружения N в течение срока эксплуатации.

На рис. I показана расчетная зависимость $[h] = f(N)$ для спиральношовной трубы 820х10 мм из стали 17Г2СФ и нанесены экспериментальные точки, взаимное расположение которых позволяет считать возможным использование предложенного способа оценки влияния угловатости сварного соединения на его долговечность при циклических нагрузках.

Основываясь на результатах теоретического и экспериментального исследования, в работе сделано заключение о необходимости ограничения величины "домика" на спиральношовных трубах до I мм. Анализ механизма образования "домика" в процессе изготовления спиральношовных труб на разных станах показал, что, в основном, образование "домика" происходит при формовке трубы и сварке I-го слоя шва, причем решающую роль здесь играет установка формовочных роликов. Возможности существующего оборудования позволяют обеспечить рекомендованное ограничение величины "домика".

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

I. Исследование процесса локальных разрушений стенки магистрального трубопровода целесообразно выполнять путем испытания цилиндрических панелей, вырезанных из натурных труб, с нагружением ме-

тодом гидравлического выпучивания. Это позволяет оценить особенности заводской технологии в реальных условиях нагружения. Для проведения таких испытаний создано оригинальное оборудование, защищенное авторским свидетельством.

2. Установлено, что из числа дефектов, типичных для сварных соединений спиральношовных труб, наибольшую опасность в случае малоциклового нагружения представляет дефект "домика" - местное угловое искажение кромок. Вследствие большой протяженности такой дефект может явиться линейным инициатором протяженной трещины. Из числа дефектов основного металла аналогичную роль играют поверхностные закаты.

3. Теоретически и экспериментально показано, что концентрация напряжений в сварном соединении, вызванная дефектом "домика", определяется выражением $\alpha_д = 1 + \beta_д \frac{h}{t}$ где $\beta_д$ - коэффициент, учитывающий упругое перемещение стенки трубы при нагружении.

4. При оценке комплексного влияния "домика" и смещения кромок на концентрацию напряжений в зоне шва следует суммировать напряжения изгиба, вызванные каждым из дефектов отдельно. Поэтому, концентрация напряжений на линии перехода от наплавленного к основному металлу определится выражением

$$\alpha_\Sigma = \alpha_\phi \left(1 + \beta_д \frac{h}{t} + \beta_{см} \frac{\Delta}{t}\right); \qquad \text{где } \alpha_\phi, \beta_д \frac{h}{t}, \beta_{см} \frac{\Delta}{t}$$

отражают роль усиления шва, "домика" и смещения кромок.

5. Предложенная методика расчетной оценки влияния величины "домика" на долговечность сварных труб позволяет регламентировать допускаемую величину такого дефекта в зависимости от механических свойств применяемых материалов, уровня рабочих напряжений и заданной долговечности.

6. До настоящего времени дефект "домик" в производстве спиральношовных труб не регламентировался. Учитывая возможность малоциклового нагружения магистральных трубопроводов, разработанная методика расчетной оценки влияния дефекта "домик" позволяет рекомендовать в сварных спиральношовных трубах из стали 17Г2СФ ограничение величины "домика" до I мм. Рекомендация принята Волжским трубным заводом.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Лукьянов В.Ф., Сигаев А.А. Установка для испытаний крупногабаритных образцов при двухосном растяжении и изгибе. "Заводская лаборатория", 1971, № 6, с. 730-732.
2. Сигаев А.А., Лукьянов В.Ф. Прочность спиральношовных труб магистральных трубопроводов при циклических нагрузках. В сб. "Тезисы докладов на XXIX итоговом совещании по работам в области сварки ...", Судостроение, Ленинград, 1978, с. 121-122.
3. Сигаев А.А., Лукьянов В.Ф. Влияние формы сварных соединений на характер разрушения. В сб. "Вопросы металловедения стали и титановых сплавов", Пермь, 1978, с. 87-90.
4. Лукьянов В.Ф., Сигаев А.А., Суленко А.П. Особенности разрушения крупногабаритных образцов малоуглеродистой стали при двухосном растяжении. Известия СКНЦ ВШ. "Технические науки". Ростов-на-Дону, 1976, № 3, с. 39-41.
5. Лукьянов В.Ф., Сигаев А.А., Суленко А.П. Особенности испытаний крупногабаритных образцов сварных толстолистовых конструкций. В сб. "Прогрессивные способы сварки, новые материалы и конструкции в сварочном производстве", ч. II, Ижевск, 1973, с. 103-105.
6. Сигаев А.А., Напрасников В.В., Соловин В.П., Фомин В.Н. Влияние схемы напряженного состояния на предельную пластичность металла. В сб. "Электродуговая сварка и наплавка", Ростов-на-Дону, 1975, с. 154-158.
7. Лукьянов В.Ф., Сигаев А.А. Конструктивная прочность сварных соединений многослойных сосудов. В сб. "Новые методы сварки и передовая технология в производстве сварных конструкций", Пермь, 1971, с. 72-73.
8. Лукьянов В.Ф., Крумбольдт М.Н., Олифер В.Б., Сигаев А.А. Определение конструктивной прочности сварных соединений при двухосном растяжении. "Информационный листок № 315(3875)-70", Северо-Кавказский ЦНТИ.
9. Избенко В.Ф., Авраменко В.И., Кривошея В.С., Яблонский Б.В., Лукьянов В.Ф., Сигаев А.А. Установка двухосного растяжения УДР-10. "Информационное письмо АН УССР, ИЭС им. Е.О. Патона", № 41(760)-1972.

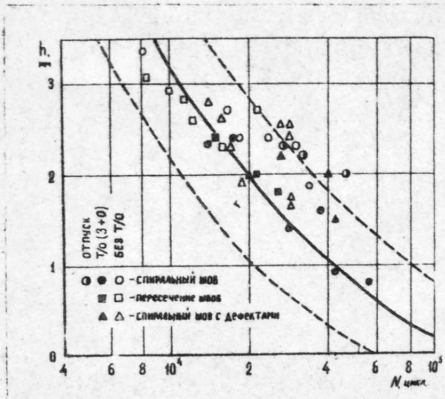


Рис. I. Результаты испытаний цилиндрических панелей из спиральношовной трубы 820х10 мм. Сплошная линия – расчетная зависимость $[h]=f(N)$ при среднестатистических значениях $\alpha_ф$ и $\alpha_{см}$; пунктирная линия – то же для максимальных и минимальных значений $\alpha_ф$ и $\alpha_{см}$; h – величина "домика"; N – число циклов до нарушения герметичности.

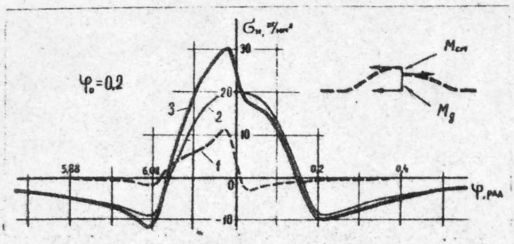


Рис. 2. Распределение напряжений от изгиба в зоне локальной погиби кольца, вызванных: I – смещением кромок (Δ =I мм); 2 – "домиком" (h =3 мм) 3 – "домик": слева h =4 мм, справа h =3 мм.

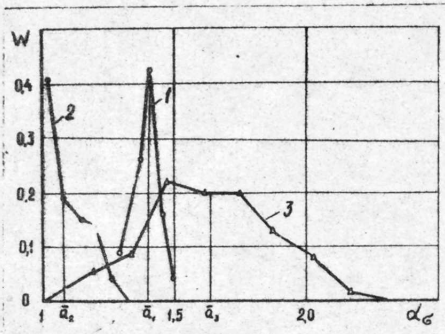


Рис. 3. Эмпирические полигоны распределения значений коэффициентов концентрации напряжений, вызванной: I – формой усиления шва; 2 – смещением кромок; 3 – "домиком".