М 337660

НА ДОМ НЕ ВЫДАЕТСЯ

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
С С С Р

М о с к о в с к о е
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшее
техническое училище имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

ПИГАРЕВ Виктор Константинович

ИССЛЕДОВАНИЕ МАЛОЦИКЛОВОЙ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ В РАСТВОРАХ ЩЕЛОЧЕЙ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЛИСТОВЫМ КОНСТРУКЦИЯМ

(05.04.05 - Технология и машины сварочного производства)

Автореферат
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических
наук

Москва 1979

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
С С С Р

М о с к о в с к о е
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшее
техническое училище имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

ПИГАРЕВ Виктор Константинович

Т337660ф

ИССЛЕДОВАНИЕ МАЛОЦИКЛОВОЙ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ В РАСТВОРАХ ЩЕЛОЧЕЙ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЛИСТОВЫМ КОНСТРУКЦИЯМ

(05.04.05 - Технология и машины сварочного производства)

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана
1337660
Пигарев В.К. Исследование

Автореферат
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических
наук

Москва 1979

Работа выполнена в Московском ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище им.Н.Э.Баумана.

Научный руководитель – д.т.н., профессор СТЕКЛОВ О.И.

Официальные оппоненты – д.т.н., профессор ВЕРШИНСКИЙ А.В.

к.т.н., с.н.с. ТЕРЕНТЬЕВ В.Ф.

Ведущее предприятие – ВНИИЦЕММАШ.

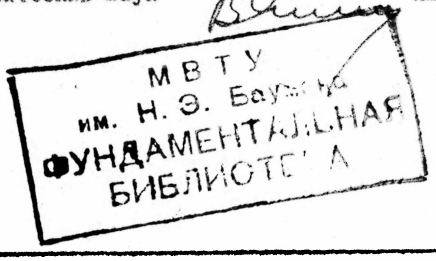
Защита диссертации состоится " " _____ 1979 г. на заседании специализированного Совета К053.15.03 по технологии и машинам сварочного производства Московского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшего технического училища имени Н.Э.Баумана по адресу: Москва, 107005, 2-я Бауманская улица, дом 5.

Ваши отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ имени Н.Э.Баумана.

Автореферат разослан " " _____ 1979 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО СОВЕТА
доктор технических наук ЯМПОЛЬСКИЙ В.М.



А 70519 Подп. к печати 23 марта 1979 г. Объем 1 п.л.
Тир. 100 экз. Ротапринт МВТУ им. Н.Э.Баумана, 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5. Заказ 483

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Сопротивляемость листовых конструкций механо-коррозионному разрушению определяется сопротивляемостью возникновению и распространению коррозионных трещин. Подход к оценке прочности конструкции с позиции развития разрушения становится все более очевидным. Применительно к листовым крупногабаритным конструкциям необходимость такого подхода определяется как своеобразием напряженного состояния, так и трудностью устранения концентраторов, развитие трещин от которых занимает, как правило, большую долю долговечности конструкции.

Проблема распространения коррозионных трещин от дефектов, особенно поверхностных, изучена недостаточно, что затрудняет оценку работоспособности в зависимости от стадии развития разрушения.

Цель исследования. Целью настоящей работы является оценка работоспособности сварных элементов оболочковых конструкций из низкоуглеродистой стали, изготовленных качественно и с поверхностными дефектами, в щелочных средах и разработка путей повышения механо-коррозионной прочности подобных конструкций.

Методы исследования настоящей работы включали механические испытания металла различных зон сварного соединения и сварных соединений на воздухе и в щелочной среде при повышенных температурах при осевом и двухосном пульсирующем растяжении и изгибе; фрактография изломов поверхностей разрушения; визуальное слежение за развитием трещины; металлографический анализ характера разрушения.

Научная новизна работы заключается в установлении закономерностей разрушения элементов оболочковых конструкций от поверхностного дефекта в условиях повторно-статического двухосного растяжения с изгибом в коррозионной среде.

При этом научная ценность состоит в установлении:

а) зависимости степени отрицательного влияния щелочной среды от скорости усталостного разрушения. Показано, что, с одной стороны, среда может снижать определенным образом долговечность стали, а с другой, отрицательное влияние среды на долговечность может не проявиться когда скорость роста трещины либо велика, либо незначительна;

б) своеобразия изменения формы поверхностной трещины в процессе ее роста при двухосном малоцикловом изгибе, заключающегося в дискретном росте трещины в направлении толщины и непрерывном в длину. При этом зависимость изменения перемещения кромок надреза

стадии разгрузки от полудлины трещины позволяет следить за этапами развития трещины;

в) неоднозначности влияния сварки на сопротивляемость сварных соединений механо-коррозионному разрушению в щелочной среде. Показано, что несмотря на повышение сопротивления разрушению металла, подвергнутого действию термодеформационного цикла сварки, долговечность сварных соединений снижается вследствии геометрической и электрохимической неоднородности сварных соединений.

Практическая ценность. Разработана методика оценки сопротивляемости разрушению листовых элементов, которая может быть использована для оценки сопротивления различных зон сварного соединения развитию поверхностных трещин при малоцикловом изгибе и оценки изменения сопротивления под влиянием коррозионных сред.

Результаты испытаний натурных элементов автоклава и рекомендации по усовершенствованию конструкции корпуса автоклава использованы при составлении нормативных документов и при разработке новых конструкций автоклавов.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались: 1) на научном семинаре кафедры "Машины и автоматизация сварочных процессов" МВТУ им. Н.Э.Баумана (апрель 1977 г. и февраль 1978 г.), 2) на семинаре "Коррозионно-механическая прочность сварных соединений и конструкций", МДНТП им. Ф.Э.Дзержинского (октябрь 1976 г.), 3) на конференции "Совершенствование технологии сварки и пайки с целью повышения качества и надежности конструкций", Куйбышев (май, 1976 г.).

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и общих выводов по работе, изложена на 194 страницах машинописного текста, содержит 16 таблиц, 50 рисунков и библиографию из 105 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава I. В настоящее время наметилось два направления в исследовании прочности листовых конструкций. Первое относится к конструктивной прочности изделий, выполненных качественно. В этом направлении накоплен большой опыт и достигнуты определенные успехи благодаря работам Г.А.Николаева, И.В.Кудрявцева, С.А.Куркина, Н.И.Марина, Д.М.Шур, В.Х.Мюнзе, В.И.Труфякова, Kooistra L.F, Langer B. и др. Установлено, что основными факторами, снижающими конструктивную прочность по сравнению с предельно возможной, являются повторность нагружения, концентраторы напряжений, неоднородность сварных соединений, наличие агрессивных сред. Разрушения, как правило, связаны с дефектами, зарождение и развитие тре-

щин от которых в результате повторности нагружения и воздействия агрессивных сред приводит к нарушению эксплуатационных свойств конструкции. Поэтому второе направление исследования конструктивной прочности связано с оценкой надежности, т.е. оценкой работоспособности конструкции, имеющей дефекты. Оценка работоспособности листовых конструкций оболочкового типа должна основываться на закономерностях развития трещин от исходных до критических размеров, исходя из условия нарушения герметичности.

Вопросы прочности листовых конструкций из низкоуглеродистых сталей с поверхностными дефектами, работающих в условиях малоциклового нагружения и воздействия щелочных сред, изучены недостаточно.

Исследования прочности сварных листовых конструкций проводили на примере автоклавов для тепловлажностной обработки строительных материалов.

Основные задачи работы:

1) разработка методики и оборудования для исследования повторно-статической прочности сварных листовых конструкций в агрессивных средах при повышенных температурах;

2) изучение особенностей влияния щелочной среды и сварки на малоцикловую прочность низкоуглеродистой стали и листовых элементов;

3) исследование кинетики разрушения листовых элементов от поверхностных надрезов при двухосном циклическом изгибе и растяжении с изгибом на воздухе и в щелочной среде;

4) разработка рекомендаций по повышению долговечности сварных листовых конструкций из низкоуглеродистых сталей, работающих в режиме малоциклового нагружения и воздействия щелочных сред.

Глава 2. При исследовании конструктивной прочности необходимо как можно полнее знать условия работы и напряженное состояние изделия, анализ которых для автоклава показал, что сварные соединения цилиндрического корпуса работают в условиях повторно-статического приложения нагрузок при воздействии горячего конденсата щелочного характера. Возникновение изгибающих моментов в нижней части корпуса приводит к повышению результирующих напряжений до величины σ_T . Отношение главных напряжений в нижней части, где воздействует конденсат, колеблется в пределах 0,6 - 0,9 при соотношении изгибных и мембранных напряжений $\frac{\sigma_{изг.}}{\sigma_{изг.}+\sigma_{м.}}$ в наиболее напряженных зонах равном примерно 0,65.

Учитывая опыт, накопленный в МВТУ им. Н.Э.Баумана и РИСХМе при исследовании прочности листовых конструкций, в данной работе для изучения прочности листовых конструкций оболочкового типа с

учетом своеобразия их напряженного состояния и воздействия коррозионных сред разработана методика, предусматривающая испытания;

I. При одноосном пульсирующем растяжении с целью исследования влияния щелочной среды и сварки на малоцикловую прочность стали.

2. При двухосном циклическом изгибе ($\frac{\sigma_2}{\sigma_1}=1,0$; $\frac{\sigma_{изг.}}{\sigma_{изг.}+\sigma_{м.}}=1,0$) и изгибе-растяжении цилиндрических панелей ($\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\approx 0,8$; $\frac{\sigma_{изг.}}{\sigma_{изг.}+\sigma_{м.}}\approx 0,65$) с целью изучения влияния сварных соединений и щелочной среды на прочность листовых элементов и изучения кинетики разрушения от поверхностных дефектов.

Состав и концентрацию раствора выбирали из условия приближения к эксплуатационной среде. Условия эксплуатации и наличие повреждений ведут к повышению местной концентрации конденсата до десятков процентов. Учитывая это, испытания проводили в 40%-ном растворе $NaOH$. В процессе испытания контролировали концентрацию и температуру раствора, которая поддерживалась в пределах температуры кипения (t =II2^{0}C) для малогабаритных образцов и 85$^0\pm$I^{0}C - для крупногабаритных. Смена среды производилась через каждые 8 часов испытаний.

Испытания всех типов образцов проводили при "мягком" нагружении пульсирующим циклом ($r\approx 0,1$) с частотой I0-I2 цикл/мин.

Для установления особенностей влияния щелочной среды и сварки на малоцикловую прочность стали I5К проводили испытания различных зон сварного соединения при одноосном пульсирующем растяжении на воздухе и в щелочной среде. Гладкие образцы при $\sigma_{max.}=1,2\sigma_T$ не разрушались даже через $2\cdot10^5$ циклов, поэтому испытания проводили на цилиндрических образцах $\varnothing$ 20 мм, длиной 300 мм, на которых в исследуемой зоне - основной металла (О.М.), металл шва (М.Ш.), металл зоны термического влияния (М.З.Т.В.) - наносили концентраторы в виде кольцевых канавок глубиной 3 мм с радиусом при вершине 0,2 мм. Нагружение осуществляли на машине ЦДМПу-I0, переоборудованной для работы в режиме низкочастотного растяжения, в широком диапазоне долговечностей - от однократного до 10^5 циклов.

Экспериментальные данные представляли в виде кривых малоцикловой усталости в полулогарифмических координатах, т.е. зависимости $\sigma_{max.}=f(N)$. На каждом уровне напряжений испытывали не менее 4-5 образцов.

Для сохранения конструктивных и технологических особенностей изготовления цилиндрических оболочковых конструкций и условий их работы была спроектирована и изготовлена установка для двухосного нагружения листовых элементов в виде цилиндрической панели, работающая по принципу гидростатического выпучивания через эллип-

тическое отверстие. Конструкция установки позволяет получить на значительной части поверхности образца (овал 180х260) практически равномерное поле напряжений с отношением главных напряжений $\frac{\sigma_2}{\sigma_1}$, равным примерно 0,8. Все образцы - цилиндрические панели с внутренним радиусом 1000 мм, длиной вдоль образующей 880 мм, длиной дуги в поперечном сечении 580 мм и толщиной 14 мм. Габаритные размеры панелей выбраны из условия получения соотношения мембранных и изгибных напряжений $\frac{\sigma_{изг.}}{\sigma_{изг.}+\sigma_{м.}}$, равного примерно 0,65, соответствующего напряженному состоянию наиболее напряженных элементов корпуса автоклава.

Для оценки влияния сварных соединений и щелочной среды на прочность конструкции проводили раздельные испытания панелей из листового металла, а также с кольцевыми, продольными, пересекающимися стыковыми швами и образцов с приваренной угловыми швами накладкой, имитирующих опору автоклава. Стыковые швы были сварены двухсторонней автоматической сваркой под слоем флюса из стали 15К одной плавки ($\sigma_т$ =31,2 кГс/мм^2, $\sigma_в$ =48,7 кГс/мм^2). Все сварные соединения выполнены качественно с максимальным значением коэффициента концентрации напряжений α_σ стыковых швов равным 1,45. Технология изготовления образцов полностью соответствовала принятой при изготовлении автоклавов.

Исследование кинетики трещины проводили на панельных образцах и дисковых образцах из стали 15К одной плавки ($\sigma_т$ =31,2 кГс/мм^2; $\sigma_в$ =48,7 кГс/мм^2) Ø 512 мм, толщиной 14 и 20 мм с поверхностными надрезами длиной $2l_0$, глубиной a_0.

Сопротивляемость развитию трещины различных зон сварного соединения изучали на стыковых соединениях, выполненных автоматической двухсторонней сваркой под слоем флюса. Для зарождения трещины в исследуемой зоне наносили поверхностный надрез. Усиление шва предварительно снимали. Испытания проводили на установках для двухосного изгиба типа УДИ-11.

При испытании в щелочной среде ее наливали на поверхность образца слоем 15-20 мм и нагревали электрическими нагревателями. При осмотре поверхности среду удаляли специальным насосом.

Глава 3. Результаты сравнительных испытаний цилиндрических панелей при окружном напряжении $\sigma_{max.}=1,2\sigma_т$ показали, что в листовом металле макротрещины как на воздухе, так и в щелочной среде не образуются даже через $2\cdot10^5$ циклов; долговечность листовых элементов со стыковыми швами (кольцевой, продольный и пересекающиеся) снижается по сравнению с листовым металлом. Снижение

происходит за счет концентрации напряжений, вызванной геометрической неоднородностью сварных соединений, и отрицательным влиянием щелочной среды. Однако долговечность стыковых швов листовых элементов даже при $\sigma_{max.}=1,2\,\sigma_T$ значительно превышает регламентированную долговечность автоклава, т.е. 9000 циклов. Результаты испытаний листового элемента с накладкой показали, что этот узел имеет долговечность ниже регламентированной как при $\sigma_{max.}=1,2\,\sigma_T$, так и при рабочих напряжениях.

Анализ экспериментальных данных свидетельствует о том, что наблюдающиеся разрушения стенок и стыковых швов автоклавов могут быть вызваны наличием повреждений стенок и дефектов швов, развитие трещин от которых в результате повторности нагружения и воздействия щелочной среды и приводит к преждевременным разрушениям.

Для установления особенностей влияния щелочной среды на малоцикловую прочность низкоуглеродистой стали провели испытания при одноосном пульсирующем растяжении.

Как показали результаты испытаний (рис. 1) щелочная среда неоднозначно влияет на малоцикловую прочность стали 15К. Степень отрицательного влияния щелочной среды на выносливость стали зависит от долговечности ее на воздухе, вследствие чего щелочная среда может как определенным образом снижать (П и Ш уч.), так и не оказывать существенного влияния на выносливость стали (I и IУ уч.). На I участке это связано с тем, что скорость усталостного разрушения невелика и механоактивации металла недостаточно для существенного увеличения той скорости коррозии , с которой металл корродирует в упругой области и которая, как известно, незначительна. На IУ участке скорость усталостного разрушения столь велика, что среда не успевает проявить своего коррозионного действия, а адсорбционное действие, по-видимому, в обеих случаях незначительно и разрушение протекает как усталостное. На П и Ш участках процесс коррозионно-усталостного разрушения происходит, согласно механизму Эвальда-Поляни, следующим образом: пластическая деформация делает металл более анодным, следовательно, увеличивает скорость растворения; анодный процесс ускоряет процесс пластической деформации, облегчая выход дислокаций на поверхность, вследствии удаления поверхностных барьеров, препятствующих выходу дислокаций. Металлографический анализ показал, что трещины в щелочной среде могут распространяться как транскристаллитно, так и смешанно.

Результаты испытаний различных зон сварного соединения показали, что в диапазоне 10^3-10^5 циклов до разрушения на воздухе наименьшей сопротивляемостью малоцикловому разрушению обладает

О.М., наибольшей – металл З.Т.В. Видно, что термодеформационный цикл сварки увеличивает сопротивляемость металла малоцикловому разрушению в щелочной среде. Это связано с повышением прочностных характеристик металла и улучшением структуры металла по сравнению с прокатанной. Особенности влияния щелочной среды на долговечность М.Ш. и металла З.Т.В. такие же, как и для О.М.

Глава 4. Анализ поверхностей изломов образцов при двухосном малоцикловом изгибе позволил установить своеобразие изменения формы поверхностной трещины в процессе ее роста. Показано, что преимущественный рост трещины в направлении толщины в начальной стадии затем тормозится наличием градиента напряжений от изгиба и после подрастания трещины примерно до $0{,}37t$ дальнейший рост в глубину приостанавливается и она продолжает расти только в длину. Жесткость перемычки под дном трещины уменьшается, что ведет к перераспределению напряжений в ней, смещению нейтральной оси и возобновлению роста трещины в глубину. Затем описанные выше ситуации повторяются до тех пор, пока трещина не достигнет глубины, равной примерно $0{,}8t$. После чего трещина продолжает расти только в длину и одновременно образуются трещины с обратной поверхности образца, развитие которых приводит к прохождению оставшейся перемычки и разрушению образца вследствие нарушения герметичности.

Для слежения за развитием поверхностной трещины перед испытанием визуально с помощью микроскопа измеряли начальную ширину надреза в середине щели δ_o, а в процессе испытания измеряли ширину надреза при $\sigma_{max.}$ и $\sigma_{min.}$ цикла $\delta_{max.}$ и $\delta_{min.}$. По значениям δ_o, δ_{max}, δ_{min} подсчитывали перемещение кромок надреза в i-том полуцикле $\Delta_{max.} = \delta_{max.} - \delta_o$, $\Delta_{min.} = \delta_{min.} - \delta_o$ и $\Delta_{разгр.} = \Delta_{max.} - \Delta_{min.}$. Одновременно измеряли текущую длину трещины $2l$, подсчитывали разность $\Delta 2l$ для интервала ΔN, а затем отношение $\frac{\Delta l}{\Delta N}$. Интервал ΔN выбирали в зависимости от интенсивности роста трещины на поверхности образца.

Возрастание величин $\Delta_{max.}$ и $\Delta_{min.}$ происходит за счет увеличения длины и глубины трещины и вследствие накапливания пластических деформаций перед фронтом трещины, и кроме того вследствие уменьшения жесткости образца и увеличения остаточного прогиба. Величина $\Delta_{разгр.}$ от изменения жесткости не зависит, а зависит только от геометрических размеров трещины и величины пластических деформаций в вершине трещины у поверхности образца. Совместный анализ кривых $\Delta_{разгр.} = f(l)$, $a = f(l)$ и $\frac{\Delta l}{\Delta N} = f(l)$ (рис. 2) позволил установить, что величина $\Delta_{разгр.}$ определяет-

ся, в основном, величиной местных пластических деформаций на стадии разгрузки; о моменте достижения трещиной предельной глубины $a_{пред.}$ косвенно можно судить по зависимости $\Delta_{разгр.} = f(\ell)$. Начало монотонного ускоренного роста величины $\Delta_{разгр.}$ (у участок) свидетельствует о достижении трещиной предельной глубины $a_{пред.}$. Следовательно, изме нение величины $\Delta_{разгр.}$ по мере подрастания трещины можно использовать, во-первых, как критерий нарушения герметичности листовых элементов при циклическом изгибе, который позволяет определять 2ℓ пред.; во-вторых, как условный параметр для анализа изменения скорости роста трещины (С.Р.Т.) на поверхности образца.

Результаты испытаний дисковых образцов при циклическом изгибе с поверхностными надрезами при различных напряжениях пульсирующего цикла ($\sigma_{max.} = 0{,}8;\ 0{,}95;\ 1{,}2\,\sigma_T$) показали, что процесс подрастания трещины на поверхности в полулогарифмических координатах ($\lg \frac{\Delta\ell}{\Delta N}$, ℓ) состоит из нескольких стадий ускоренного и стабильного роста трещины с определенной средней скоростью на каждой стадии. Сопоставление кривых $\Delta_{разгр.} = f(\ell)$, $\frac{\Delta\ell}{\Delta N} = f(\ell)$ с поверхностями изломов образцов позволило отметить, что ускоренный рост трещины происходит тогда, когда трещина подрастает только в длину; стабильный же рост трещины - когда она подрастает одновременно в глубину и длину. Пульсирующий характер роста трещины около средней С.Р.Т. вызывается различием местных условий ее продвижения на поверхности и на некоторой глубине. Предельное состояние по условию нарушения герметичности наступает при $a_{пред.}/t \approx$ $\approx 0{,}8$ и при $a_{пред.}/2\ell_{пред.} \approx 0{,}083$.

Результаты испытаний дисковых образцов с поверхностными надрезами различных длин и глубин при $\sigma_{max.} = 1{,}2\,\sigma_T$ показали, что С.Р.Т. в различных образцах при одинаковых ℓ оказываются близкими. Важно отметить, что предельное состояние у всех образцов наступает при $\Delta_{разгр.} = 0{,}23$ мм при $a_{пред.} = 0{,}88\,t$ и $a_{пред.}/2\ell_{пред.} \approx 0{,}1$.

Для исследованных толщин 14-20 мм различия в закономерностях подрастания трещин не наблюдалось. У образцов толщиной 20 мм в отличие от образцов $t = 14$ мм влияние толщины проявилось в том, что кривая С.Р.Т. в зависимости от ℓ на всем протяжении развития трещины проходит более полого к оси $\frac{\Delta\ell}{\Delta N}$. Предельное состояние независимо от толщины наступает при одинаковых $a_{пред.}/t$ и $a_{пред.}/2\ell_{пред.}$.

Сопоставление кривых $\Delta_{разгр.} = f(\ell)$ и $\frac{\Delta\ell}{\Delta N} = f(\ell)$, полученных при испытании дисковых образцов на воздухе и в щелоч-

ной среде показало, что закономерности изменения С.Р.Т. в щелочной среде практически не отличаются от закономерностей, полученных на воздухе. Щелочная среда смещает кривые $\frac{\Delta\ell}{\Delta N} = f(\ell)$ в область больших С.Р.Т., а кривые $\Delta_{разгр} = f(\ell)$ в область меньших значений $\Delta_{разгр.}$. Увеличение С.Р.Т. связано с коррозионным действием щелочной среды, интенсифицирующим процесс механического разрушения, при этом степень отрицательного влияния среды на долговечность зависит от С.Р.Т. на воздухе. Уменьшение величины $\Delta_{разгр.}$ вызвано охрупчивающим действием щелочной среды, уменьшающей величину предельной пластической деформации до разрушения. Неоднозначность влияния щелочной среды по фронту поверхностной трещины вследствие неравномерности распределения напряжений по толщине образца приводит к тому, что в направлении большей оси, где напряжения выше, среда интенсифицирует процесс усталостного разрушения в большей степени, чем в направлении толщины. Это явление вызывает увеличение $2\ell_{пред.}$ при испытании в щелочной среде.

Результаты испытаний дисковых образцов с поверхностными надрезами, нанесенными по шву и зоне сплавления, на воздухе и в щелочной среде показали, что закономерности подрастания трещины практически не отличаются от закономерностей, установленных для образцов из О.М. При этом кривые $\Delta_{разгр.} = f(\ell)$ и $\frac{\Delta\ell}{\Delta N} = f(\ell)$ для О.М. расположены в области несколько больших С.Р.Т. и $\Delta_{разгр}$, т.е. сопротивляемость сварного соединения с позиции развития разрушения определяется сопротивляемостью О.М.

Результаты испытаний цилиндрических панелей с продольными поверхностными надрезами были сопоставлены с результатами испытаний дисковых образцов. Развитие разрушения в стенке цилиндрической конструкции в месте наличия значительных изгибных напряжений происходило в соответствии с закономерностью, установленной при испытании дисковых образцов. В отличие от дисковых образцов, где трещина, независимо от длины надреза, к моменту выхода ее на поверхность подрастает в глубину примерно до $0{,}37t$, в цилиндрических панелях за счет наличия мембранных напряжений она подрастает примерно до $0{,}53t$ и предельное состояние наступает при $a_{пред.} = 0{,}95t$ при $a_{пред.}/2\ell_{пред.} \approx 0{,}110$.

Глава 5. Проведенные исследования дают возможность оценить работоспособность сварных узлов, изготовленных качественно и при наличии в стенке трещины.

По результатам испытаний листовых элементов построены кривые

малоцикловой усталости $\sigma_{max.} = f(N)$. Для расчета на прочность необходимо правильно оценить рабочие напряжения и запас прочности при переносе результатов лабораторных испытаний на конструкцию. Анализ результатов тензометрирования автоклавов показал, что максимальные напряжения в местах наличия изгибных напряжений достигают величины σ_T . Поэтому $\sigma_{max.}$ при расчете принимали равным 0,95 σ_T . Учитывая, что минимальный запас прочности по долговечности n_N рекомендуется принимать равным 3, а повышение частоты нагружения и снижение температуры щелочной среды при лабораторных испытаниях приводит к завышению долговечности, коэффициент n_N принимали равным 6. Расчет показал, что листовой металл, кольцевые, продольные и пересекающиеся швы обеспечивают регламентированную долговечность автоклава, а опорный узел не обеспечивает. Следовательно, наблюдающиеся преждевременные разрушения в этих местах связаны с некачественной сборкой и сваркой и наличием повреждений стенок конструкции.

Проведенные испытания цилиндрических панелей с трещиной позволили установить $2l_{пред.}$ и скорость роста трещины от исходного надреза до предельной длины в наиболее опасном случае, когда максимальные окружные напряжения в стенке конструкции равны 0,95 σ_T . По этим данным подсчитывали число циклов, на протяжении которых существующая трещина на определенной стадии ее развития подрастает до предельной длины. Полученная совокупность значений исходных длин трещин и чисел циклов дает кривую циклической долговечности. По этой кривой, зная длину обнаруженной в процессе эксплуатации продольной трещины с учетом n_N =6, можно определить число циклов безопасной эксплуатации, т.е. остаточный ресурс.

Анализ результатов данной работы и возможных путей повышения механо-коррозионной прочности листовых конструкций из низкоуглеродистых сталей показал, что наиболее экономичными и эффективными путями повышения долговечности являются уменьшение концентрации напряжений за счет рационального проектирования и качественной сборки и сварки.

С целью повышения работоспособности автоклава предложена новая конструкция корпуса, позволившая улучшить напряженное состояние и изолировать сварные соединения от воздействия щелочной среды. Это достигнуто изменением конструкции опор и введением в корпус поддона.

В Ы В О Д Ы

I. Разработана методика и специализированное оборудование для исследования прочности сварных конструкций оболочкового типа, учитывающая своеобразие напряженного состояния и воздейст. коррозионных сред при повышенных температурах, которая предусматривает испытания:

а) при одноосном пульсирующем растяжении с целью установления влияния сварки и среды на малоцикловую прочность стали;

б) при двухосном нагружении циклическим изгибом плоских образцов и изгибом-растяжением цилиндрических панелей с целью установления влияния сварных соединений, изготовленных качественной и с поверхностными дефектами, и целочной среды на работоспособность конструкции.

2. Установлено своеобразие изменения формы поверхностной трещины в процессе ее роста при двухосном малоцикловом изгибе. Показано, что преимущественный рост трещины в направлении толщины в начальной стадии затем тормозится наличием градиента напряжений от изгиба. Дальнейший рост трещины в направлении толщины определяется изменением податливости листового элемента в зоне трещины по мере ее преимущественного роста в длину. Предельное состояние листовых элементов по условию нарушения герметичности, т.е. достижение трещиной предельной глубины $a_{пред.}$, для исследованных толщин I4-20 мм наступает при $\frac{\sigma_{изг.}}{\sigma_{изг.}+\sigma_{м}}$ =I,0 при $a_{пред.} \approx 0{,}8t$ и $a_{пред.}/2\ell_{пред.} \approx 0{,}083$, а при $\frac{\sigma_{изг.}}{\sigma_{изг.}+\sigma_{м}} \approx 0{,}65$ при $a_{пред.} \approx$ $\approx 0{,}95t$ и $a_{пред.}/2\ell_{пред.} \approx 0{,}II0$.

3. Сопоставление данных фрактографии с различными участками зависимостей изменения перемещения кромок надреза и скорости роста трещины в функции полудлины поверхностной трещины, полученных при циклическом изгибе ($\sigma_{max.}$ =0,8+I,2 $\sigma_{т}$), позволило установить, что изменение величины $\Delta_{разгр.}$ по мере подрастания трещины можно использовать, во-первых, для слежения за этапами развития трещины и как критерий нарушения герметичности листовых элементов, который позволяет определять $2\ell_{пред.}$, во-вторых, как условный параметр для анализа изменения С.Р.Т. на поверхности.

Зависимости изменения . $\Delta_{разгр.} = f(\ell)$ и $\frac{\Delta\ell}{\Delta N} = f(\ell)$ характеризуют закономерности распространения трещины от поверхностного дефекта после образования от него трещины до окончательного разрушения образца вследствие потери герметичности, и могут использоваться для оценки работоспособности элементов с трещиной. Сопоставление этих зависимостей, построенных для различных зон сварного соединения, позволяет сравнивать и оценивать

сопротивление этих зон развитию трещины, а также оценивать изменение сопротивляемости под воздействием коррозионных сред.

4. Установлена особенность влияния щелочной среды на малоцикловую прочность низкоуглеродистой стали. Показано, что степень отрицательного влияния среды определяется скоростью усталостного разрушения. С одной стороны, щелочная среда может увеличивать С.Р.Т., что связано с коррозионным растворением металла, интенсифицирующим процесс механического разрушения. С другой стороны, отрицательное влияние среды на долговечность может не проявиться, когда

а) скорость усталостного разрушения значительно выше скорости коррозионного растворения металла (при $\sigma_{max.} \approx \sigma_{\beta}$);

б) скорость усталостного разрушения незначительна и механоактивации металла недостаточно для проявления коррозионного действия среды.

5. Установлена неоднозначность влияния сварки на сопротивляемость сварного соединения из низкоуглеродистой стали механо-коррозионному разрушению в щелочной среде. Показано, что несмотря на то, что термодеформационный цикл сварки повышает сопротивляемость металла малоцикловым разрушениям в щелочной среде, что связано с повышением прочностных характеристик металла и улучшением его структуры по сравнению с прокатанной, долговечность сварного соединения снижается по сравнению с листовым металлом в связи с геометрической и электрохимической неоднородностью сварных соединений.

6. Предложена новая конструкция корпуса автоклава, позволяющая:

а) улучшить напряженное состояние за счет удаления угловых швов с оболочки и изменения конструкциии опор;

б) изолировать сварные соединения от вреднего воздействия щелочной среды.

Разработанные рекомендации по усовершенствованию конструкции учтены при разработке новых конструкций автоклавов во ВНИИСтроммаше. Ожидаемый годовой экономический эффект за счет повышения долговечности конструкции более 100 тыс.рублей.

Результаты работы применялись при разработке инструкции "Положение о порядке обследования автоклавов, отработавших 9.000 циклов нагружения или 15 лет, и установление условий их дальнейшей эксплуатации".

Материалы диссертации отражены в работах:

1. Пигарев В.К., Шишкин А.В., Стеклов О.И., Кузнецов С.Н. Методика исследования коррозионно-механической прочности сварных соединений при малоцикловом растяжении в растворах щелочей. Сб. "Технология производства сварных и паяных конструкций". Вып. IУ, г. Куйбышев, 1976, с.72-77.
2. Пигарев В.К., Шишкин А.В., Стеклов О.И. Установка для испытания листовой стали при двухосном циклическом изгибе в щелочной среде. Сб. "Технология производства сварных и паяных конструкций", вып. IУ, г. Куйбышев, 1976, с.77-82.

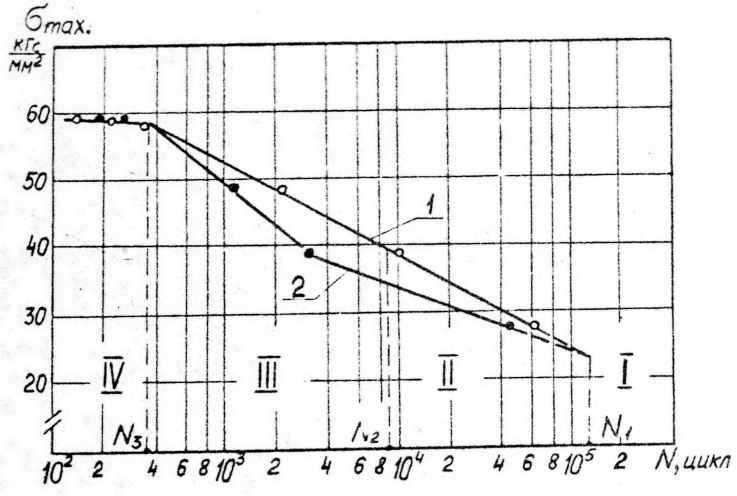


Рис. I. Кривые малоцикловой усталости стали I5К, полученные при испытании на воздухе (I) и в щелочной среде (2)

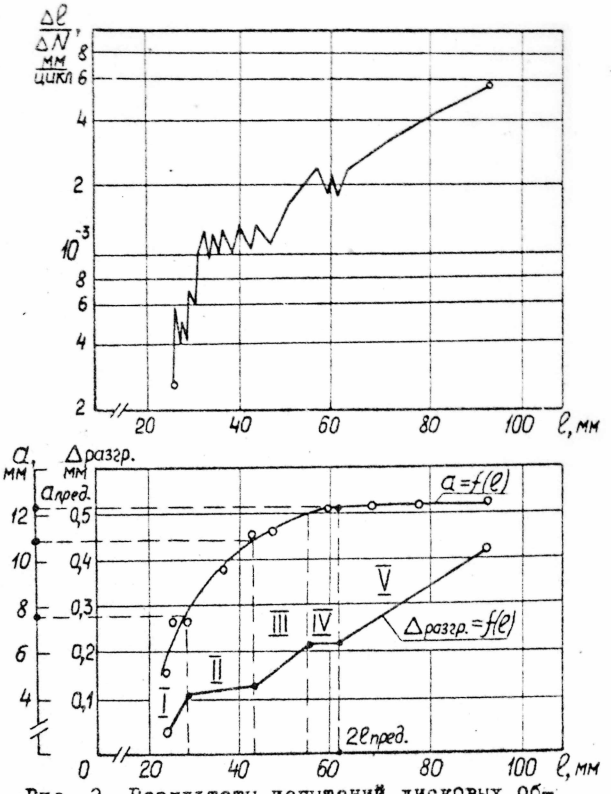


Рис. 2. Результаты испытаний дисковых образцов из стали I5К с поверхностным надрезом при двухосном циклическом изгибе