

М463425

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое училище
им. Н.Э. Баумана

На правах рукописи
УДК 621.791.052:639.4
N 59

Коробцов Александр Сергеевич

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СВАРНЫХ
СОЕДИНЕНИЙ С НЕОБРАБОТАННЫМИ ШВАМИ НА ОСНОВЕ
ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ

05.03.06 технология и машины сварочного
производства

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1987

Работа выполнена в Ростовском-на-Дону ордена Трудового
Красного Знамени институте сельскохозяйственного машиностроения

Научный руководитель

- д.т.н., доцент Лукьянов В.Ф.

Официальные оппоненты:

д.т.н., профессор Куркин С.А.

к.т.н.

Винклер О.Н.

Ведущее предприятие

- ЦНИИТМАШ

Защита состоится "22" октября 1987 г. на заседании
специализированного Совета Д 053.15.07 в Московском ордена Ле-
нина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного
Знамени высшем техническом училище имени Н.Э. Баумана по адре-
су: 107005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Ваш отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью, просим
выслать по указанному адресу.

С дисс
го высшего

Вско-

Авт

у
специа
д

М 463425

Д-44
Подписан
Зав

экз.
а

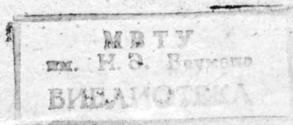
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Крупногабаритные оболочковые конструкции, работающие под давлением, находят широкое применение в практике. Повышение их надежности и долговечности при одновременном снижении металлоемкости является в настоящее время важной задачей. Для решения указанной проблемы наряду с совершенствованием технологии изготовления и методов контроля качества необходимо уточнение методик расчета на прочность и долговечность. При этом возрастает актуальность создания новых экспериментально-аналитических методов, которые позволили бы с использованием ЭВМ количественно оценить влияние различных технологических, конструктивных и эксплуатационных факторов на долговечность сварных соединений с целью выбора на стадии проектирования оптимальных технологических и конструктивных решений, конструкционного материала.

В основу реализации этой задачи должен быть положен анализ закономерностей процесса возникновения и развития разрушения в наиболее нагруженных элементах сварных конструкций. Опыт эксплуатации толстостенных оболочковых конструкций с необработанными швами показывает, что характер их разрушения при малоцикловом нагружении имеет специфические особенности, которые изучены недостаточно. Поэтому отсутствуют расчетные методики, которые бы в полной мере их учитывали. Кроме того, имеющиеся аналитические подходы к оценке долговечности сварных конструкций не позволяют также учесть многообразие случайных факторов, влияющих на процесс разрушения. Все это диктует необходимость разработки новых экспериментально-аналитических методов более полно учитывающих своеобразие процесса разрушения сварных соединений и вероятностную природу действующих факторов.

Цель работы: разработка методики имитационного моделирования процесса разрушения сварных соединений с необработанными швами при малоцикловом нагружении и прогнозирование на ее основе работоспособности сварных соединений оболочковых конструкций с учетом вероятностной природы действующих факторов.

Методы исследования. Изучение закономерностей возникновения, роста и слияния усталостных трещин в оболочковых конструкциях проводилось путем экспериментального исследования характера разрушения крупногабаритных сварных образцов при двухосном нагружении и плоских образцов прямоугольного сечения при одно-



осном нагружении. Для прогнозирования на ЭВМ кинетики распространения разрушения использован метод имитационного моделирования. Разработанная модель основывается на положениях механики разрушения и деформационном критерии усталостного разрушения. Используются методы математической статистики и метод конечных элементов.

Научная новизна работы состоит в новом решении актуальной научной задачи, заключающейся в установлении закономерностей развития разрушения в сварных соединениях толстолистовых оболочковых конструкций с необработанными швами, которые состоят в следующем:

отдельные поверхностные трещины, возникающие вдоль кромок шва, имеют вытянутую форму. При изгибе устойчивый фронт поверхностных полуэллиптических трещин, в отличие от растяжения, не является равновесным: разница значений коэффициентов интенсивности напряжений в вершинах трещины из-за градиента напряжений по толщине непрерывно изменяется по мере роста трещины. При этом значение коэффициента интенсивности напряжений в лежащей на поверхности точке контура, являющееся максимальным вдоль линии фронта, изменяется по кривой с максимумом;

увеличение скорости роста внутренних краев соседних полуэллиптических трещин из-за взаимного влияния не существенно до момента их слияния. После объединения средняя часть фронта образовавшейся трещины седлообразной формы продвигается ускоренно вплоть до достижения устойчивой формы, при этом длина и максимальная глубина трещины увеличиваются практически аналогично, как у эквивалентной ей полуэллиптической трещины;

сопоставление гамма-процентного (γ) ресурса сварного соединения при его разрушении от внутреннего дефекта и $(1-\gamma)$ -процентного ресурса при развитии разрушения вдоль кромок шва позволяет определить допустимый размер внутреннего дефекта в каждом конкретном случае.

Практическая ценность работы состоит в следующем:

разработаны и внедрены методика и программа для ЭВМ имитационного моделирования процесса разрушения сварных соединений оболочковых конструкций с необработанными швами, учитывающая особенности роста и слияния поверхностных трещин, многообразие случайных факторов и позволяющая на стадии проектирования при ограниченной информации определить долговечность конструкции, обосновать выбор материала, оценить принятые конструктивные и технологические решения;

разработанный метод оценки значимости внутренних дефектов положен в основу при создании новых отраслевых эксплуатационных требований к допустимости внутренних дефектов;

предложенная методика получения поверхностных трещин заданных размеров использована в ЦНИИТМАШ при создании крупногабаритных тест-образцов для ультразвукового контроля.

Апробация работы. Диссертация заслушана и рекомендована к защите на научных семинарах кафедры АМ-7 МВТУ, им. Баумана, кафедр "Машины и автоматизация сварочного производства" РИСХМа, отдела прочности материалов и конструкций ЦНИИТМАШ. Основные результаты работы доложены и обсуждены на II Всесоюзном симпозиуме "Остаточные технологические напряжения" (1985 г.).

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 8 печатных работах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных результатов работы, общих выводов, списка литературы и приложения. Работа изложена на 183 страницах машинописного текста, содержит 64 рисунка, 19 таблиц. Список литературы включает 178 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава I. Оценка сопротивления разрушению сварных оболочковых конструкций с необработанными швами при малоцикловом нагружении.

Возможные аварии крупногабаритных оболочковых конструкций грозят катастрофическими последствиями, поэтому вопросам их прочности и долговечности уделяется первостепенное значение.

Опыт эксплуатации данных конструкций показывает, что типичной формой предельного состояния является разрушение или повреждение конструкций в результате развития трещин. Это наглядно демонстрируют статистические анализы отказов резервуаров различных типов (Т.А. Smith), сосудов давления энергетических установок (Г.П. Карзов). При этом установлено, что подавляющее число трещин возникает на поверхности в районе сварных швов.

Отмечается специфика разрушения сварных соединений с необработанными швами, находящих широкое применение в практике. Значительное влияние на прочность этих конструкций оказывает форма шва, а местом инициации усталостных трещин становится, как правило, зона перехода шва к основному металлу. Это доказывают как многочисленные лабораторные испытания сварных соединений, так и

анализ повреждений оболочковых конструкций (С. Огура, И. Такэясу, R.C. Jernar). При этом отмечается, что в момент разрушения усталостные трещины имеют длины в сотни и даже тысячи миллиметров.

Значительные успехи в области теоретического и экспериментального исследования работоспособности сварных конструкций связаны с именами Г.А. Николаева, О.А. Бакши, В.А. Винокурова, В.Н. Волченко, Г.П. Карзова, С.А. Куркина, В.В. Ларионова, И.И. Макарова, Э.Л. Макарова, В.И. Махненко, О.И. Стеклова, В.И. Труфякова, F.M. Burdekin, J. Harrison, S. J. Maddox и других ученых.

Однако отмечается, что невыясненной остается роль геометрической неоднородности зоны перехода шва к основному металлу на долговечность сварных конструкций при малоцикловом нагружении. Кроме того, для наиболее общего случая, когда процесс разрушения представляет собой рост отдельных трещин, появление новых и слесение соседних, отсутствуют расчетные методики, которые бы в полной мере учитывали данные особенности. Очевидно это связано с тем, что недостаточно изучены закономерности специфических особенностей процесса разрушения оболочковых конструкций с необработанными швами.

Для изучения закономерностей процесса разрушения в настоящее время все шире применяются экспериментально-аналитические методы, основанные на деформационных критериях усталостного разрушения и положениях механики разрушения.

Для получения достоверной информации прогнозирование работоспособности конструкций должно основываться на вероятностных моделях (В.В. Володин). В малоцикловой области необходимо учитывать рассеяние случайных факторов, влияющих и на период инициации разрушения, и на стадию развития разрушения. Однако в статистическом аспекте в последние годы больше внимания уделялось второй стадии (М.Н. Степнов, В.Т. Тимофеев, М.В. Ваумштейн, F. Kozin). Вероятностные подходы к инициации усталостных трещин встречаются реже (Н.А. Махутов, В.Ф. Лукьянов). Существующие методы рассматривают лишь отдельные этапы разрушения или учитывают только один случайный параметр. Например, в приближенной мето- ке оценки долговечности сварных соединений (Э.Н. Гецфрид) п- мается только одна случайная величина — радиус перехода шва к основному металлу. Это объясняется тем, что из-за большого числа действующих случайных параметров аналитические методы в данном случае не приемлемы. Поэтому возникает необходимость разработки

других подходов. Перспективным представляется применение для прогнозирования работоспособности сварных соединений с необработанными швами метода имитационного моделирования, позволяющего учесть специфические особенности процесса разрушения и многообразие случайных факторов.

В настоящей работе были поставлены следующие задачи:

1. Изучить закономерности процесса возникновения и характер распространения разрушения в сварных узлах в условиях, приближенных к реальным;

2. Выявить основные закономерности роста и объединения поверхностных полуэллиптических трещин, возникающих от нескольких инициаторов в одной плоскости.

3. Разработать имитационную модель процесса разрушения, учитывающую случайную природу действующих факторов и специфические особенности процесса разрушения.

4. Разработать моделирующий алгоритм и программу расчета, позволяющего на стадии проектирования обосновать выбор материала, технологических и конструктивных решений.

Глава 2. Методика экспериментального исследования процесса возникновения и развития разрушения в сварных соединениях.

Широко используемые методы испытания малогабаритных образцов не позволяют анализировать закономерности развития протяженных трещин, характерных для оболочковых конструкций с необработанными швами. Более предпочтительными являются методы испытания крупногабаритных образцов (С.А. Куркин, В.Ф. Лукьянов, О.Н. Винклер), имитирующих отдельные сварные узлы конструкций. Их главным достоинством является возможность сохранить при лабораторных испытаниях реальные технологические и конструктивные особенности изделия, а также создать двухосное напряженное состояние, характерное для оболочковых конструкций.

Исследование закономерностей процесса возникновения и характера распространения разрушения проводилось на разработанных в РИСКМ установках типа УДИ, прототипом которых является установка УДР-МВТУ. Сварные образцы в виде дисков закрепляют в установках и нагружают гидравлическим давлением, создаваемым в полости под образцом. Под действием распределенной нагрузки образец, опирающийся на кольцевую матрицу прогибается и на его внешней поверхности возникает двухосное поле растягивающих напряжений.

При исследовании закономерностей объединения поверхностных

трещин для одновременного получения нескольких исходных трещин заданных размеров была разработана и использована следующая методика. На поверхности образца (испытывали плоские образцы прямоугольного сечения) снимали цилиндрической фрезой слой металла, оставляя в центре перемычки, в которых создавали острый надраз. Затем при консольном изгибе в надразах инициировали усталостные трещины. При достижении трещинами определенных размеров перемычки удаляли и на образце исследовали закономерности объединения трещин. Для этого визуально наблюдали за кинетикой роста большей полуоси и периодически фиксировали фронт трещин контрольными метками, которые получали путем уменьшения амплитуды напряжений в два раза по сравнению с основным режимом при постоянной средней величине напряжений цикла.

Данная методика создания поверхностных трещин и прогнозирования их роста позволяет получить в сварном соединении усталостные трещины заданных размеров, что может быть использовано при создании различных тест-образцов. Например, на основе этой методики в ЦИИТМАШ разработаны крупногабаритные тест-образцы для ультразвукового контроля.

Глава 3. Результаты исследования закономерностей процесса усталостного разрушения сварных соединений и разработка его имитационной модели

Основная экспериментальная часть работ выполнена на образцах диаметром 550 мм из высокопрочной хромоникельмолибденовой стали. Испытания крупногабаритных элементов показали, что также как и в реальной конструкции в образцах наблюдается практически одновременное зарождение нескольких поверхностных трещин, расположенных случайным образом вдоль зоны перехода шва к основному металлу. Развитие разрушения идет путем подрастания отдельных трещин, появления новых и слияния соседних. Статистическая обработка длин исходных трещин выявила, что они подчиняются weibulловскому распределению с параметрами: 6; 2,57; 2.

В настоящее время наиболее изучены закономерности роста поверхностных трещин при растяжении. Отмечается (Г.П. Карзов, Г.П. Черепанов, А.С. Подгорный, А.А. Попов), что при циклическом растяжении трещина стремится приобрести форму, близкую к полукруглости, при этом наблюдается постоянство коэффициента интенсивности напряжений (K_{II}) вдоль фронта. При двухосном изгибе, как показали результаты экспериментов, устойчивой формой поверхностной трещины является полуэллипс, отношение осей которого b/a непре-

равно уменьшается с ростом относительной глубины трещины b/t в соответствии со следующей эмпирической зависимостью:

$$b/t = 0,96 - 0,78 b/t \quad (1)$$

В отличие от растяжения при изгибе разница значений КИН в вершинах трещины непрерывно возрастает. Однако отсутствие общепринятой методики оценки КИН в условиях изгиба приводит к существенному разбросу значений при использовании выражений, предложенных разными авторами. Проведенный сравнительный анализ наиболее часто используемых зависимостей (Г.П. Черепанов, S. J. Holdbrook, Г.П. Карзов, I. S. Newman, В.И. Летунов) показал, что в вершине малой полусоси разброс значений монотонно возрастает по мере устойчивого роста трещины и может превышать 200%. Наибольший разброс наблюдается при подсчете максимального значения КИН. Трудно даже выявить какую-либо общую тенденцию его изменения. Сопоставление кинетики изменения формы трещин, рассчитанной по данным зависимостям, с экспериментальной выявило, что наилучшее соответствие наблюдается при использовании зависимости, предложенной S. J. Holdbrook. На основе данной зависимости было получено дифференциальное уравнение, позволяющее прогнозировать изменение формы фронта поверхностных трещин при изгибе.

В процессе исследования выявлены другие особенности развития поверхностных трещин в условиях изгиба. Так, максимальное значение КИН в процессе устойчивого роста трещины изменяется при $b/t > 0,7$ по кривой с максимумом. Известный принцип сравнения (Р.Е. Гольдштейн), используемый при инженерной оценке трещиноподобных дефектов, имеющих сложную конфигурацию, может нарушаться.

Практически одновременное появление нескольких трещин вдоль шва и их слияние в процессе нагружения приводит к образованию протяженных поверхностных трещин, что существенно сокращает долговечность. Так, например, общая долговечность образца с необработанным швом оказалась в два раза ниже, чем живучесть образца, содержащего усталостную трещину длиной 50 мм. Это указывает на необходимость обязательного учета процесса объединения соседних трещин при прогнозировании работоспособности сварных соединений с необработанными швами.

Имеющиеся литературные данные по слиянию поверхностных трещин весьма противоречивы, открытым остается вопрос оценки условия

объединения трещин.

Экспериментальное исследование закономерностей объединения поверхностных трещин проводилось по методике, изложенной в главе 2. Судя по результатам испытаний, до момента объединения трещины стремятся перейти к устойчивой форме в соответствии с закономерностями, рассмотренными для одиночных трещин. Изменение конфигурации фронтов отдельных трещин из-за наличия соседних не существенно до момента объединения. Общее увеличение внутренних полуэллипсов трещин равных размеров по сравнению с внешними не превышает 10%. После слияния внутренних краев соседних трещин образовавшийся фронт приобретает сначала седлообразную форму (рис.1), в

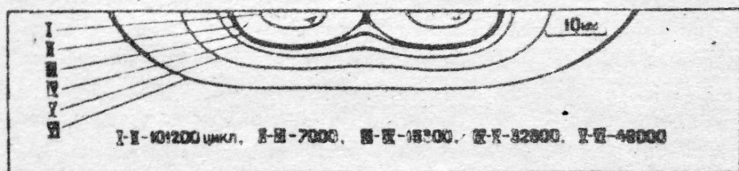


Рис. 1. Кинетика объединения поверхностных трещин

дальнейшем сравнительно быстро происходит выравнивание фронта трещины и начинается переход к устойчивой форме. Аналогичные закономерности наблюдались при объединении трещин, имеющих неодинаковые исходные размеры, а также одновременном слиянии нескольких трещин.

Проведенный анализ позволяет предположить, что за условие объединения можно принять момент слияния внутренних краев соседних трещин. При этом за длину эквивалентной им полуэллиптической трещины при расчетах следует принять расстояние между внешними концами трещин, за глубину - глубину наибольшей из них. Данное положение проверялось экспериментально. Для этого были исследованы при идентичных условиях кинетика роста трещин седлообразной формы, образовавшихся в результате слияния соседних и поверхностных полуэллиптических, имеющих размеры, соответствующие эквивалентной трещине. Их сопоставление по изменению максимальной глубины трещин, а также длины дает близкие результаты, что позволяет рассмотреть условие использовать при расчетной оценке работоспособности сварных конструкций с необработанными швами, живучесть N_p которых при наличии нескольких трещин можно определить по формуле:

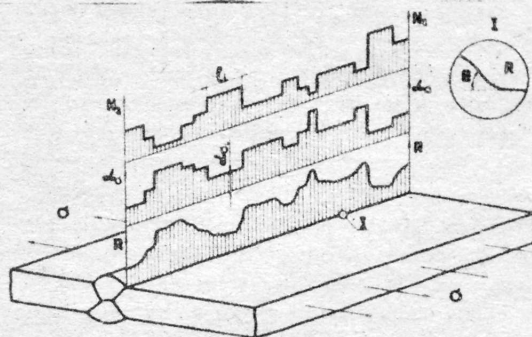
$$N_p = N_1 + N_2$$

(2)

где N_1 — продолжительность роста одиночной трещины до объединения; N_2 — продолжительность роста эквивалентной трещины с момента объединения до наступления предельного состояния разрушения.

Экспериментально изученные характер распространения разрушения, закономерности возникновения, роста отдельных трещин и слияния соседних позволили разработать модель процесса разрушения. Из-за многообразия случайных факторов, определяющих кинетику разрушения, аналитические подходы являются неприемлемыми, поэтому был использован метод имитационного моделирования, представляющий собой статистический численный эксперимент, осуществляемый на ЭВМ путем последовательного пошагового анализа процесса разрушения, имитирующего реальный характер распространения разрушения в конструкциях, с учетом вероятностной природы действующих факторов.

При разработке имитационной модели процесса разрушения приняты следующие допущения:



зона перехода шва к основному металлу состоит из отдельных участков длиной l_i (случайная величина), в пределах которых профиль контура перехода принят неизменным, а величина коэффициента концентрации напряжений α_0 постоянной (рис. 2);

функция распределения $f(\alpha_0)$ для заданного

Рис. 2. Схематическое изображение основных положений модели

типа соединения зависит от случайных независимых параметров: радиуса R и угла θ зоны перехода;

случайные величины l_i и α_0 являются независимыми,

в момент инициации усталостная трещина имеет длину, равную длине участка l_i и глубину $b_{0i} = 0,5$ мм;

длительность периода зарождения трещины N_{1i} на каждом участке зависит, главным образом, от амплитуды номинальных напряжений

и механических свойств материала;

разрушение рассматривается как параллельное развитие трех случайных процессов: образование новых трещин, подрастание появившихся ранее и слияние соседних;

закономерности роста усталостных трещин подчиняются законам механики разрушения с учетом случайной вариации параметров кинетической диаграммы разрушения;

слияние внутренних краев соседних трещин рассматривается как момент объединения. При этом за длину эквивалентной им полуэллиптической трещины принимается расстояние между внешними концами трещин, за глубину — глубина наибольшей из них;

конструкция теряет работоспособность при достижении одним из параметров разрушения критического значения.

Реализация имитационной модели производится на ЭВМ. Сначала алгоритм предусматривает разбиение шва на отдельные участки произвольной длины l_i , величины которых задают с помощью генератора случайных чисел (ГСЧ) в соответствии с экспериментально установленной функцией распределения $f(l_i)$. Аналогичным образом каждому участку присваивают значения R_i и θ_i и определяют величины α_{0i} , после чего на основе доформационной теории малоциклового усталости подсчитывают число циклов до зарождения разрушения N_{3i} . В результате получают значения координат участков, их длин и долговечностей N_{3i} . Затем находят участок с минимальным значением N_{3i} , характеризующим долговечность сварного соединения до зарождения разрушения N_{3i} , и, увеличивая значение N_{3i} на величину $\Delta N = 50 \dots 500$ циклов, производят расчет подрастания трещин в длину и глубину на участках, где $N_{3i} < N_{3i} + \Delta N$ за $(N_{3i} + \Delta N) - N_{3i}$ циклов и определяют их новые координаты и размеры. При этом анализируется возможность слияния соседних трещин. Расчет прекращают при достижении предельного состояния разрушения. Для учета вероятностной природы действующих факторов методика предполагает многократное повторение расчетов на ЭВМ при идентичных исходных данных с измененным начальным состоянием ГСЧ. Завершается расчет статистической обработкой полученных результатов.

Для оценки адекватности разработанной модели были сопоставлены результаты испытаний пятидесяти двух сварных образцов диаметром 550 мм и толщиной 30 мм с диаметрально расположенным швом с расчетными данными. Альтернативная оценка достоверности проводилась по методу, предложенному В.Н. Волченко. Статистические показатели достоверности лежат в пределах от 0,85 до 0,95, то есть

имеет высокий уровень, что позволяет использовать разработанный метод для прогнозирования работоспособности сварных соединений оболочковых конструкций.

Глава 4. Прогнозирование работоспособности сварных соединений оболочковых конструкций на основе имитационного моделирования процесса разрушения

В главе рассмотрены некоторые аспекты возможного применения разработанного метода.

Для анализа влияния рассеяния величин R и θ на кинетику распространения разрушения использовали результаты исследования геометрических характеристик зоны перехода шва к основному металлу (О.А.Бахши). Расчеты показывают, что в зависимости от типа электрода характер накопления повреждений вдоль шва (суммарная длина отдельных трещин $\sum l_i$) весьма различен. Чем стабильнее геометрия зоны перехода, тем выше интенсивность накопления повреждений и следовательно выше вероятность слияния отдельных трещин в процессе нагружения. С возрастанием дисперсии параметров R и θ темп накопления повреждений уменьшается и акты слияния отдельных трещин наблюдаются реже. В результате в первом случае разрушение сопровождается образованием более протяженных трещин, однако зарождение разрушения во втором случае наблюдается на более ранней стадии. Рассмотренная модель позволяет получить количественную информацию как по зарождению разрушения так и по наступлению предельного состояния разрушения в каждом конкретном случае, что дает возможность проводить сравнительную оценку различных способов сварки.

Прогнозирование на ЭВМ работоспособности сварных соединений с необработанными швами выявило, что с увеличением длины шва средняя величина долговечности до зарождения разрушения $\bar{N}_z$ существенно снижается и стабилизируется в зависимости от типа электрода в пределах 150...250 мм, что объясняется разбросом величины α_0 вдоль шва. Этот факт необходимо учитывать для объективной оценки величины $\bar{N}_z$. Кроме того, с увеличением протяженности шва отмечается возрастание интенсивности накопления повреждений, что приводит к увеличению длины поверхностной трещины и создает предпосылки к образованию сквозных трещин большой протяженности. В этом состоит одно из проявлений масштабного фактора, поддающееся в данном случае прогнозированию. Об этом свидетельствует удовлетворительная корреляция расчетов и экспериментальной кинетики накопления повреждений в образцах диаметром 1300 мм.

Имитационная модель позволяет оценить влияние остаточных напряжений на долговечность соединений, склонных к коррозионному растрескиванию. Для анализа в качестве исходных были использованы экспериментальные данные, полученные в РИСХМе (М.В. Солтовец). Эксперименты проводили на сварных тавровых соединениях из титанового сплава типа BT20. Данный сплав обладает в зависимости от технологии изготовления листового проката низким либо высоким сопротивлением коррозионному растрескиванию, характеризуемым величиной K_{Isc} . Результаты расчетов ($\sigma_n = 640$ МПа) показали, что при использовании материала с высоким значением K_{Isc} (среднее значение $107 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$) остаточные напряжения незначительно (на 15–20%) снижают длительность развития разрушения N_p (живучесть). В случае применения материала с низким значением K_{Isc} (48 МПа $\sqrt{\text{м}}$) снижение N_p значительно возрастает, особенно в области малых вероятностей, и может быть более, чем на порядок. При этом наблюдается существенное отклонение распределения от логарифмически нормального закона в сторону меньших долговечностей. Для некоторых случаев такие отклонения отмечались ранее (М.Н. Степинов, Н.А. Махутов). Поэтому оценка живучести сварной конструкции на основании малого количества экспериментальных данных может оказаться чрезмерно завышенной. Расчеты показали, что с уменьшением уровня номинальных напряжений влияние остаточных напряжений на живучесть сварных конструкций возрастает.

Разработанная имитационная модель процесса разрушения дает возможность перейти к оценке допустимости внутренних дефектов в сварных соединениях с необработанными швами. Относительную опасность дефектов в данных конструкциях предлагают (И.И. Макаров, Г.П. Карзов) оценивать путем сопоставления упругих коэффициентов концентрации напряжений, возникающей возле внутренних дефектов и в зоне перехода шва к основному металлу. Однако при таком подходе исключаются из рассмотрения трещиноподобные дефекты, не учитывается стадия развития разрушения, отсутствует возможность его использования при градиентном поле напряжений.

Предлагаемый метод позволяет учесть перечисленные факторы. Он основывается на сопоставлении долговечностей сварного соединения при развитии разрушения от внутреннего дефекта N_d и в зоне перехода шва к основному металлу N_n . Долговечность является величиной случайной, поэтому анализ проводится путем сопоставления гамма-процентного (γ) ресурса сварного соединения при

его разрушении от внутреннего дефекта и $(1-\tau)$ -процентного ресурса при развитии разрушения вдоль кромки шва, т.е. принято условие, исключающее разрушение от внутреннего дефекта при данной форме шва: $l_g N_n + 3\sigma_{L_n} < l_g N_g - 3\sigma_{L_g}$, где σ_{L_n} и σ_{L_g} — средние квадратические отклонения величин N_n и N_g . Исходя из этого условия, опасность внутреннего дефекта можно выразить через коэффициент значимости

$$\omega = (l_g N_n + 3\sigma_{L_n}) / (l_g N_g - 3\sigma_{L_g}) \quad (3)$$

Очевидно, что при $\omega < 1$ разрушение от внутреннего дефекта практически исключено, поэтому дефекты, удовлетворяющие данному условию, имеют малую значимость и могут быть допущены в конструкции. С увеличением ω значимость внутреннего дефекта возрастает.

Результаты расчетов представляются в виде номограмм, позволяющих оперативно определить величину допустимого дефекта L_g .

Разработанный подход позволяет оценить значимость внутренних дефектов в зависимости от трещиностойкости основного и наплавленного металла, технологии сварки, последующей обработки шва. В работе рассмотрено влияние этих факторов на примере сварного стыкового соединения, содержащего внутренний трещиноподобный дефект. Так, в конструкциях с необработанным швом при использовании низколегированных электродов величина $L_g = 5,5$ мм (рис. 3, стрелки 1-3). При применении же аустенитных электродов для данных условий

допустимый размер равняется 9,5 мм (стрелки 1, 2, 4), что объясняется более высокой трещиностойкостью последнего материала. Обработка зоны перехода увеличивает долговечность при развитии разрушения от поверхности, но вместе с тем представляет более жесткие требования к размерам внутренних дефектов.

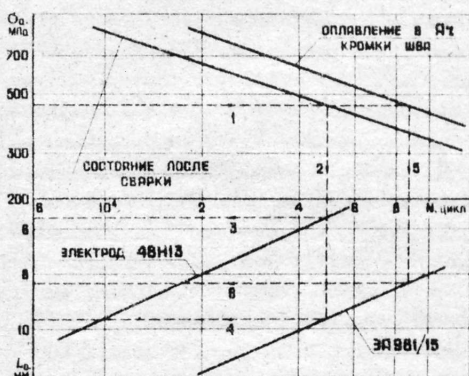


Рис. 3. Гамма процентные ресурсы величин N_n в зависимости от σ_n (верхняя часть графика) и $(1-\tau)$ -процентные величин N_g в зависимости от исходного размера внутреннего дефекта L_g .

Рассмотренная методика положена в основу при разработке новых отраслевых эксплуатационных требований к допустимости внутренних дефектов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. В результате испытаний крупногабаритных образцов установлены закономерности возникновения и характер распространения разрушения в сварных соединениях толстолистовых оболочковых конструкций с необработанными швами. Изучены закономерности усталостного роста поверхностных трещин при двухосном изгибе. Проведен сравнительный анализ приближенных методов определения КИН вдоль фронта поверхностных трещин для выявления наиболее достоверной зависимости. Экспериментально показано, что при малоцикловом нагружении долговечность толстолистовых конструкций существенно зависит от протяженности поверхностных трещин.

2. Предложен способ одновременного создания нескольких усталостных трещин заданных размеров. Экспериментально исследованы с использованием метода контрольных меток закономерности объединения поверхностных полуэллиптических трещин. Установлено условие объединения трещин, предложен подход для оценки живучести при наличии нескольких взаимовлияющих трещин.

3. На основе изученных закономерностей разработана имитационная модель процесса разрушения, учитывающая особенности роста и слияния трещин вдоль кромки шва и вероятностную природу действующих факторов. Создана программа расчета на ЭВМ. Данная модель и программа расчета внедрены в НПО ЦНИИТМАШ.

4. Показаны возможности разработанной модели для прогнозирования работоспособности сварных соединений. Проведен анализ различных случайных факторов на кинетику распространения разрушения. Рассмотрено влияние протяженности шва на циклическую прочность сварных соединений. Показано, что с увеличением размеров сварного соединения уменьшается долговечность до зарождения разрушения и возрастает вероятность образования протяженных поверхностных трещин. Проанализировано влияние остаточных напряжений на живучесть сварных соединений, склонных к коррозионному растрескиванию.

5. Разработан метод оценки значимости внутренних дефектов в сварных соединениях с необработанными швами, позволяющий дифференцированно определить допустимый размер внутреннего дефекта в

зависимости от традиционности основного и наплавленного металла, технологии сварки, последующей обработки шва. Данный метод положен в основу при создании новых отраслевых эксплуатационных требований к допустимости внутренних дефектов.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Долговечность сварных оболочковых конструкций с необработанными швами при малоцикловом нагружении в значительной мере зависит от кинетики объединения отдельных трещин вдоль кромки шва. Разработанная имитационная модель процесса разрушения, учитывающая, в отличие от аналитических подходов, случайный характер процессов возникновения, роста и слияния отдельных трещин, позволяет достоверно прогнозировать работоспособность сварных соединений с необработанными швами.

2. Сопоставление гамма-процентного ресурса (γ) сварного соединения при его разрушении от внутреннего дефекта и $(1-\gamma)$ -процентного ресурса при развитии разрушения вдоль кромки шва позволяет определить значимость внутреннего дефекта в каждом конкретном случае. Предложенный показатель значимости внутреннего дефекта (уравн. 3) может быть положен в основу при разработке руководящих материалов по определению эксплуатационных требований к допустимости внутренних дефектов для конкретных конструкций, материала, условий работы, для обоснования требований к применяемым методам контроля.

3. Увеличение скорости роста внутренних краев соседних полуэллиптических трещин из-за взаимного влияния не существенно до момента их слияния, поэтому при расчетах долговечности его можно не учитывать. После объединения средняя часть фронта образовавшейся трещины седлообразной формы продвигается ускоренно вплоть до достижения устойчивой формы, при этом длина и максимальная глубина трещины увеличиваются практически аналогично, как у эквивалентной ей полуэллиптической трещины. Живучесть сварного соединения с необработанными швами следует определять как сумму продолжительности усталостного роста отдельных трещин до объединения и продолжительности роста эквивалентной трещины с момента объединения до наступления предельного состояния разрушения.

4. При изгибе устойчивый фронт поверхностных полуэллиптических трещин, в отличие от растяжения, не является равновесным: разница значений коэффициентов интенсивности напряжений в вершинах трещины из-за градиента напряжений по толщине непрерывно изменяется по мере роста трещины.

Основное содержание диссертации отражено в работах:

1. Статистическая модель распространения разрушения вдоль линии сплавления при малоцикловом нагружении /Ю.Г. Людмирский, В.В. Напрасников, А.С. Коробцов и др. // Совершенствование сварочного производства в сельхозмашиностроении: Межвуз. сб. научных работ. - Ростов-на-Дону, 1984. - С. 116-119.

2. Лукьянов В.Ф., Напрасников В.В., Коробцов А.С. Моделирование на ЭВМ кинетики распространения разрушения вдоль линии сплавления // Сварочное производство. - 1985. - №4. - С. 1-3.

3. Лукьянов В.Ф., Коробцов А.С. Влияние остаточных напряжений на живучесть сварных конструкций при переменных нагрузках в коррозионной среде // Остаточные технологические напряжения: Труды II Всесоюзного симпозиума. - М., 1985. - С. 220-223.

4. Лукьянов В.Ф., Коробцов А.С. Прогнозирование влияния масштабного фактора на работоспособность сварных оболочковых конструкций с использованием ЭВМ /Ростов-на-Дону, 1985. - 10 с. - Дел. в ЦНИИТЭИТажМаш 28.10.85, № 1548 - ТМ.

5. Лукьянов В.Ф., Коробцов А.С. Анализ приближенных методов определения коэффициентов интенсивности напряжений вдоль фронта поверхностных полуэллиптических трещин при изгибе // Известия ВУЗов. Машиностроение. - 1986. - № 4. - С. 7-11.

6. Лукьянов В.Ф., Коробцов А.С., Напрасников В.В. Статистическое моделирование разрушения сварных соединений // Автоматическая сварка. - 1986. - № 5. - С. 13-16.

7. Лукьянов В.Ф., Напрасников В.В., Коробцов А.С. Кинетика изменения фронта поверхностной трещины при осесимметричном изгибе // Проблемы прочности. - 1986. - №7. - С. 8-13.

8. Лукьянов В.Ф., Коробцов А.С. Закономерности объединения поверхностных трещин, развивающихся от дефектов сварных соединений при малоцикловом нагружении. - Сварочное производство. - 1987. - № 4. - С. 41-42.

А.Коробцов

