

М 491282

Государственный комитет СССР по народному образованию
- - -
Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного Знамени государственный
технический университет имени Н.Э. Баумана

На правах рукописи

ЛАВРЯКОВ Юрий Юрьевич

УДК 621.791.052.08: 620.172

ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ
СОЕДИНЕНИЙ ОБОЛОЧКОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПОЗИЦИЙ
ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ И ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ
СТЕНКИ ОБОЛОЧКИ ПРИ НАЛИЧИИ НЕСКВОЗНОГО
ТРЕЩИНОПОДОБНОГО ДЕФЕКТА

05.03.06 - Технология и машины сварочного производства
01.02.06 - Динамика, прочность машин, приборов и
аппаратуры

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1990

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана.

Научный руководитель - д.т.н., профессор КУРКИН С.А.

Официальные оппоненты: д.т.н., профессор ЛАРИОНОВ В.В.
к.т.н. БОРОДИН В.В.

Ведущее предприятие - ВНИИНТЕМАШ

Защита состоится "13" сентября 1990 г. на заседании специализированного Совета К 053.15.03 в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Ваш экземпляр издается экз., заверенный печатью, у.

гся в библиотеке

дите должна заблаговременно
ованных организаций на имя
правок - 263-65-14.

В.И. Гирш, 1990 г.

В.И. Гирш

М491282

1,0 п.л. Тираж 100 экз.
МГТУ им. Н.Э. Баумана

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Работоспособность сварных конструкций определяется наступлением того или иного предельного состояния разрушения из-за наличия дефектов сварки. Нормативные требования по сплошности, как правило, являются достаточно жесткими, чтобы обеспечить работоспособность конструкции с дефектами в пределах заданного ресурса. Однако, на практике возможны ситуации, когда на завершающем этапе изготовления или при эксплуатации конструкции обнаруживается дефект, по размерам превышающий пределы, установленные нормами, а их устранение не целесообразно или вообще невозможно. В таких случаях решение о допустимости конструкции к эксплуатации нередко принимают волевым порядком. Отсюда возникает необходимость в расчетной оценке работоспособности сварных соединений в составе конструкции при наличии дефекта с позиций зарождения и развития разрушения до наступления предельного состояния.

В особенности проблема разработки расчетной оценки актуальна применительно к сварным оболочковым конструкциям, разрушения которых могут приводить к катастрофическим последствиям. С учетом сказанного настоящая работа посвящена проблеме оценки работоспособности стыковых сварных соединений оболочковых конструкций при наличии характерных для них несквозных дефектов.

Цель работы состоит в обеспечении расчета работоспособности сварной оболочковой конструкции с позиций линейной механики разрушения на основе данных неразрушающего контроля о наличии и размерах дефектов.

Методы исследования. На основе записи на ленту осциллографа изменения усилия и перемещения берегов трещины во времени, а также измерения удлинений волокон при срагивании и развитии трещины, использовался комплексный метод исследования статической трещиностойкости, включающий совместный анализ силовых, деформационных и кинетических параметров разрушения плоских крупногабаритных образцов с поверхностной трещиной при осевом растяжении. Обработку результатов испытаний образцов проводили на ЭВМ СМ-4 и ПЭВМ с использованием расчетных методов математической статистики.

Научную новизну составляет:

I. Установление интервалов значений пластических удлинений

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1491282

Павряков Ю. Ю. Оценка работос



волокон δ_0 и δ_m (пластическая "податливость" зоны разрушения), в качестве характеристик изменения напряженно-деформированного состояния локальной зоны у вершины трещины в момент ее страгивания и превращения в сквозную при хрупком, квазихрупком и вязком разрушении широкого класса материалов. Соответствие значений δ_0 и δ_m тому или иному из этих интервалов позволяет обосновать корректность использования критерия K_0 (коэффициента интенсивности напряжений в момент страгивания трещины) для построения расчетной оценки трещиностойкости с позиций линейной механики разрушения, исходя из предельного состояния оболочковой конструкции (разгерметизации).

2. Установление связи между начальным участком кривой деформирования материала и кинетикоэнергетическими условиями развития локальных пластических деформаций у вершины поверхностной трещины перед ее страгиванием.

Практическая ценность. Разработаны методические рекомендации по оценке работоспособности стыковых сварных соединений оболочковых конструкций при наличии несквозного трещиноподобного дефекта с позиций исключения наступления предельного состояния в области статических и малоцикловых нагружений. Текст методических рекомендаций разослан ряду заинтересованных организаций.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на научных семинарах: кафедры "Машины и автоматизация сварочных процессов" МГТУ им. Н.Э. Баумана и кафедры "Машины и автоматизация сварочных процессов" Ростовского-на-Дону института сельскохозяйственного машиностроения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, общих выводов и результатов, приложения. Выполнена на 130 машинописных листах, содержит 85 рисунков, 13 таблиц и 118 наименований литературных источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выполненной работы, сформулирована научная новизна и практический выход.

В главе I дан анализ состояния вопроса. Практика производства и эксплуатации сварных конструкций показывает, что полностью избежать появления дефектов, как правило, не удается. Ре-

шению проблемы оценки несущей способности конструкций при наличии в них дефектов посвящено большое количество экспериментальных и теоретических исследований отечественных ученых: Винокурова В.А., Карзова Г.П., Копельмана Л.А., Красовского А.Я., Куркина С.А., Маркочева В.М., Махутова Н.А., Морозова Е.М., Николаева Г.А., Фридмана Я.Б., а также зарубежных: Броека Д., Ирвина Дж., Макклитока Ф., Никольса Р., Уэлса А. и многих других.

В последнее время широкое распространение получили расчетные методы оценки работоспособности конструкций, основанные на критериях линейной механики разрушения (ЛМР) (в основном на критерии K_{Ic}) и механических характеристиках материала. Однако, применение их на практике проблематично, поскольку критерии разрушения получают, как правило, по результатам стандартных испытаний образцов с краевой, сквозной или кольцевой трещиной (ГОСТ 25.506-85), не учитывающих своеобразие наступления предельного состояния конструкций, в особенности оболочкового типа.

Для оболочковых конструкций характерны несквозные дефекты, а предельное состояние наступает при нарушении герметичности стенки, вследствие превращения несквозного дефекта в сквозную трещину. Разработанные в МВТУ подходы к оценке трещиностойкости на образцах с поверхностной трещиной позволяют учесть указанные особенности работы стенки оболочки с трещиноподобным дефектом. Тем не менее отсутствие четких представлений о связи между экспериментально определяемыми критериями трещиностойкости и наступлением предельного состояния стенки оболочки при наличии трещиноподобного дефекта не позволяет корректно произвести расчетную оценку работоспособности на основе ЛМР. Кроме того, остается неясным влияние начального участка диаграммы деформирования материала на процесс разрушения от несквозной трещины.

На основе анализа состояния вопроса в работе поставлены следующие задачи:

1. Исследовать кинетико-энергетические условия протекания процесса страгивания и превращения поверхностной трещины в сквозную в зависимости от начального участка диаграммы деформирования материала.

2. Обосновать возможность использования экспериментально получаемых критических значений K_I в расчетах на прочность с позиций линейной механики разрушения.

3. Разработать методические приемы постановки исследований по изучению влияния процесса сварки на условия страгивания и развития поверхностной трещины в стыковом сварном соединении.

4. Разработать методику контрольной оценки работоспособности стыковых сварных соединений оболочковых конструкций с позиций критериев трещиностойкости и предельного состояния, исходя данных неразрушающего контроля о размерах и расположении дефектов.

В главе 2 дан анализ результатов экспериментальных исследований широких плоских образцов с поверхностной трещиной. Эксперименты позволили установить, что у вершины поверхностной трещины, расположенной в глубине образца, где отсутствует влияние свободных поверхностей, локальные пластические деформации ничтожны при упругом деформировании и начинают заметно развиваться только вместе с началом макропластических деформаций сечения. Это свидетельствует о возможности путем соответствующего расположения вершины трещины по толщине образца, сохранять объемности напряженно-деформированного состояния локальной зоны вплоть до начала макропластического деформирования. При этом развитие пластических деформаций от расположенной в глубине образца вершины трещины происходит преимущественно в направлении толщины образца, а кинетика процесса зависит от характера начального участка диаграммы деформирования материала образца, т.е. наличия или отсутствия площадки текучести.

Своеобразие условий страгивания и роста поверхностной трещины в различных сталях и сплавах исследовали путем обработки экспериментальных данных Родионова С.С. и Тарасова С.И., а также полученных автором совместно с Гуменшаймером И.И. по методике МВТУ. Согласно методики при обработке экспериментальных данных для каждого образца получали: диаграмму разрушения в координатах напряжение σ - перемещение берегов трещины V ; кинетические характеристики изменения скорости dv/dt и ускорения d^2v/dt^2 перемещения берегов трещины в функции V ; распределение пластических удлинений волокон $\delta_m = f(z)$, по мере продвижения вершины трещины в направлении толщины z , которое совместно с ускорением d^2v/dt^2 отражает энергетические затраты на этот рост. По зависимости $\delta_m = f(z)$ определяли параметры: δ_0 - пластическое удлинение волокна в вершине исходной трещины в момент ее страгивания, характеризую-

щее напряженно-деформированное состояние у вершины трещины при страгивании; δ_M - пластическую "податливость" зоны разрушения, как максимальное пластическое удлинение волокон на момент превращения поверхностной трещины в сквозную. Величину δ_0 использовали для установления момента страгивания трещины на диаграмме разрушения (точка O), для которой подсчитывали напряжение σ_0 и коэффициент интенсивности напряжений K_0 по зависимости ЛМР:

$$K_0 = \sigma_0 \sqrt{\pi W} \quad (I)$$

где W - обобщенный размер поверхностной трещины. Использование понятия обобщенного размера, сводящего два характерных размера трещины (ℓ - глубина) и $2c$ (длина) к одному W , обеспечило удобство представления результатов испытаний как на статическую, так и на циклическую трещиностойкость.

Материалы без площадки текучести были представлены: высокопрочной мартенситно-стареей сталью ЭП-678 с различным уровнем условного предела текучести $\sigma_{0.2}$, заданного термообработкой отдельных партий (I-920 МПа, II-1060 МПа, III-1400 МПа); магниевым сплавом ИМВ-2 ограниченной пластичности ($\delta = 4\%$); конструкционным алюминиевым сплавом АМг6 в отожженном и нагартованном состоянии. Для таких материалов характерно плавное развитие макропластических деформаций, которые начинаются при нагрузке существенно ниже условного предела текучести $\sigma_{0.2}$. Поэтому диапазоны отношений $\sigma_0 / \sigma_{0.2}$ дают представление о различии в развитии макропластических деформаций в сечении образца с трещиной к моменту ее страгивания и позволяют характеризовать типичные случаи разрушения, схематично представленные на рис. I.

В случае вязкого разрушения отход от условий плоской деформации в вершине трещины начинается при уровне напряжений порядка $0,7 \sigma_{0.2}$ и сопровождался плавным возрастанием скорости dV/dt (кривая 2, рис. Ia) и ускорения d^2V/dt^2 (кривая 3). Страгивание трещины (точка O на кривой I) происходило при

$\sigma_0 \gg 0,85 \sigma_{0.2}$, когда в вершине трещины на момент страгивания напряженно-деформированное состояние уже существенно отличалось от плоской деформации ($\delta_0 > 0,2$ мм) и на продвижение трещины расходовалась почти вся энергия, подводимая в вершину трещины от зон упругой разгрузки позади ее фронта. По мере роста

трещины скорость dV/dt (кривая 2) и ускорение d^2V/dt^2 (кривая 3) продолжали монотонно повышаться при интенсивном нарастании удлинения волокон $\Delta \delta_m$ (кривая 4, рис. 1в) вплоть до превращения в сквозную.

Когда трещина страгивалась в диапазоне $0,7 \sigma_{q2} \leq \sigma_0 \leq 0,85 \sigma_{q2}$ т.е. на более ранней стадии развития макропластических деформаций, в начале отхода от условий плоской деформации у вершины трещины, когда $0,03 \text{ мм} \leq \delta_0 \leq (0,1 \dots 0,2) \text{ мм}$ (рис. 1е), т.е. приращения удлинений волокон $\Delta \delta_m$ на пути движения трещины, оказывалось недостаточным, чтобы поглотить энергию, подводимую от зон упругой разгрузки вследствие приращения размеров трещины. В результате этого резко возрастает d^2V/dt^2 (кривая 3, рис. 1г) и происходит соответствующий интенсивный рост скорости dV/dt (кривая 2). В совокупности с локализацией деформаций у вершины трещины, возникшей из-за нового заострения исходной, это приводило к столь высоким скоростям деформирования металла в локальной зоне, что приращение δ_m практически прекращалось (кривая, рис. 1е) и в этой зоне восстанавливалось объемное напряженно-деформированное состояние (точка Р), трещина становилась нестабильной, разрушение оказывалось квазикрупным, δ_m не превышало 0,6 мм.

В случае страгивания трещины при $\sigma_0 < 0,7 \sigma_{q2}$, ничтожность размеров зоны пластичности перед вершиной стронувшейся трещины ($\delta_0 < 0,03 \text{ мм}$) и малые энергетические затраты на ее деформирование, приводят к крайне резкому возрастанию ускорения d^2V/dt^2 (кривая 3, рис. 1ж) и соответствующему росту скорости dV/dt (кривая 2). При этом объемность напряженно-деформированного состояния в вершине движущейся трещины сохраняется и она становится нестабильной в направлении толщины сразу после страгивания, а разрушение приобретает хрупкий характер при минимальной величине $\delta_m < 0,5 \text{ мм}$ (рис. 1и). Исключением из рассмотренных случаев разрушения является сплав ИМВ-2, в котором из-за ограниченной пластичности нестабильность наступала, практически сразу после страгивания трещины при $\sigma_0 = 0,9 \sigma_{q2}$, а параметры разрушения изменялись, как схематично показано на рис. 1г, ж, е, и.

Результаты определения параметра K_0 для всех испытанных образцов в функции обобщенного размера W для сплава ИМВ-2 представлены на рис. 2. Можно видеть, что начиная с $W = 6 \text{ мм}$

величина K_0 уже не зависит от размеров трещины и толщины образца B (в пределах $l < 0,7B$), т.е. коэффициент K_0 , по-видимому, достигал критического значения равного K_{Ic} . Возрастание K_0 в области трещин "малого" размера $W < 6$ мм и для образцов, где глубина трещины $l > 0,7$ от толщины образца (все точки на рис. 2, расположенные выше уровня $K_0 = K_{Ic}$), четко демонстрирует влияние свободных поверхностей образца на нарушение сингулярности в окрестности вершины трещины в глубине образца. Это влияние проявляется в снижении объемности напряженно-деформированного состояния вблизи вершины трещины раньше, чем значение K_I достигает критической величины. В более пластичной стали ЭП-678 ($\delta = 12\%$) наблюдалась зависимость $K_0 = f(W)$ подобная рассмотренной для сплава ИМВ-2, для которой K_0 также оказывается близким к K_{Ic} в диапазоне $W > 6$ мм при $l < 0,7B$ (где B — толщина конструктивно-го элемента). Эти соотношения и были использованы при формулировании требований к толщине плоского образца и размерам поверхностной трещины достаточные для корректного определения K_0 .

В материалах с площадкой текучести в отличие от материалов без площадки текучести макропластические деформации начинают развиваться только при нагрузке, близкой к физическому пределу текучести и сопровождаются бурным пластическим течением, локализованным в слоях пластичности (полосах Чернова-Лидерса). В образце с поверхностной трещиной влияние неустойчивости процесса начала макропластического деформирования на разрушение изучали на примере хладостойких сталей 15ГБ и АБ-III с различным уровнем прочности в широком диапазоне температур (от $+20$ до -130°C). Для этих сталей понижение температуры сопровождалось повышением предела текучести и предела прочности, тогда как в этом же диапазоне температур пластичность практически не изменялась. Такое изменение деформационных характеристик приводило к вязко-хрупкому переходу, как показано в виде схем на рис. 1б, д, з.

В случае вязкого разрушения отход от условий плоской деформации начинался вместе с макропластическими деформациями в диапазоне уровня напряжений $(0,9 \dots 1) \sigma_T$, когда, вследствие развития макропластических деформаций, зона у вершины трещины внезапно теряла пластическую устойчивость в результате утраты разгрузки металла с высоким уровнем объемных напряжений вокруг этой зоны локальной пластичности. Такой процесс сопровождался

резким возрастанием d^2V/dt^2 (кривая 3) и dV/dt (кривая 2) при неизменном уровне нагрузки (кривая I, рис. Iб). Поскольку бурное развитие пластических деформаций поглощало энергию упругой разгрузки материала вокруг этой зоны, то параметры d^2V/dt^2 и dV/dt снижались, а страгивание трещины происходило при $\delta_0 > 0,2$ мм (рис. Iв), в условиях плоского напряженного состояния. Дальнейший рост трещины происходил стабильно со значительной пластической "податливостью" зоны разрушения ($\delta_M \geq 4$ мм).

При понижении температуры переход к квазихрупкому разрушению связан, прежде всего с повышением предела текучести σ_T (а следовательно, и σ_0), когда в результате более высокого уровня накопленной упругой энергии процесс неустойчивого пластического деформирования локальной зоны у вершины трещины протекал динамичнее (рис. Iд) при более резком возрастании скорости и ускорения перемещения берегов трещины (кривые 2 и 3). Это способствует уменьшению отхода от условий плоской деформации к моменту страгивания трещины ($\delta_0 < 0,2$ мм, рис. Iе). При этом подвод энергии после страгивания трещины оказывался выше затрат на ее продвижение, что способствует переходу от стабильного движения трещины к неустойчивому в направлении толщины (точка P, рис. Iе) при ограниченном $\delta_M < 0,6$ мм.

Хрупкое разрушение сталей IБГБ и АБ-III при отрицательных температурах мало чем отличалось от материалов без площадки текучести (рис. Iз), за исключением того обстоятельства, что в данном случае неустойчивость наступала при $\sigma_0 \leq (0,9...1) \sigma_T$.

Выполненный анализ процессов разрушения широкого класса материалов позволил в зависимости от отношения σ_0/σ_{02} или σ_0/σ_T систематизировать диапазоны значений K_0 , δ_0 и δ_M в виде таблицы (см. табл. I). Таблица позволяет судить о корректности определения K_0 и возможности использования его значения в качестве критерия в расчетах на прочность стенки оболочковой конструкции при наличии несквозного трещиноподобного дефекта с позиций ЛМР. Согласно систематизации (табл. I), корректность характеризуется прежде всего значением параметра δ_0 , тогда как параметр δ_M дает дополнительное представление о возможности неустойчивого роста трещины в направлении толщины после страгивания. Поскольку этих параметров достаточно для исчерпывающей характеристики процесса разгерметизации, то отпадает необходи-

мость учитывать отношение $\sigma_0/\sigma_{0,2}$ или σ_0/σ_T , что особенно важно применительно к сварному соединению, для которого уровень напряжений начала макропластических деформаций механически неоднородных зон оказывается величиной неопределенной.

В главе 3 полученные представления о механизме срагивания и превращения поверхностной трещины в сквозную в однородном материале позволили сформулировать рекомендации по использованию методики испытаний МВТУ применительно к исследованию влияния на трещиностойкость таких факторов сварки, как: механическая неоднородность, термдеформационное воздействие и наличие остаточных напряжений. Эффективность этих рекомендаций была проверена экспериментально только при оценке трещиностойкости механически неоднородных сварных соединений. Для этого анализу подвергали результаты разрушения соединения с мягкой узкой прослойкой, представленные сварными образцами из стали ЭП-678 и алюминиевого сплава АМг6 (данные Родионова С.С. и Тарасова С.И.), а также данные испытаний сварных образцов из хладостойких сталей 15ГБ и АБ-III (полученные автором совместно с Гумешаймером И.И.), где ферритный сварной шов имел значительную ширину, не являлся узкой прослойкой и был более прочным (в стали 15ГБ) или менее прочным (в стали АБ-III), чем основной металл. Экспериментальные исследования трещиностойкости различных зон сварного соединения при нормальной и низкой температуре показали, что при определении K_0 той или иной зоны неоднородного соединения, для оценки корректности полученного результата вполне достаточно параметров σ_0 и σ_M . Диапазоны изменения значений этих параметров для схем разрушения: крупного, квазихрупкого и вязкого, оказываются теми же, как и в однородном металле, т.е. подходы к определению K_0 по методике МВТУ с использованием табл. I оказывались справедливыми не только для однородного материала, но и сварных соединений с механической неоднородностью.

Корректно определяемые значения K_0 позволяют характеризовать трещиностойкость конструктивного элемента в момент срагивания несквозного трещиноподобного дефекта и возможного нестабильного превращения в сквозную трещину. Поскольку это соответствует наступлению предельного состояния стенки оболочковой конструкции, то использование экспериментально полученных значений K_0 было положено в основу методических рекомендаций по расчетной оценке работоспособности стыковых сварных соединений в

составе оболочковой конструкции, работающей в области статических и малоцикловых нагружений, при наличии несквозного дефекта, выявленного неразрушающими методами контроля (НРК). Оценка базируется на таком представлении о наступлении предельного состояния (разгерметизации), когда в пределах заданного ресурса N происходит подрастание трещины ΔW от исходного трещиноподобного дефекта W_0 и по мере достижения критического размера $W_{кр}$ становится возможным переход к самопроизвольному росту с образованием сквозного разрыва. Отсюда условием сохранения работоспособности является неравенство:

$$W_0 + \Delta W < W_{кр} \quad (2)$$

Для оперативности использования, расчетная оценка по условию (2) была реализована в виде номограммы, схематически представленной на рис. 3. Исходными данными для построения номограммы являются: критерий статической трещиностойкости K_0 , закон усталостного роста трещины (K^* и n — коэффициенты уравнения Париса), а также ресурс работы конструкции (N — число циклов нагружения). В верхней части номограммы в координатах

$\sigma - W$ по выражению (1) строится кривая 1, ограничивающая поле точек, в пределах которого разгерметизация стенки оболочки еще не наступает. Для определения величины подрастания трещины в пределах заданного ресурса при нагружении от нулевым пульсирующим циклом с размахом $\Delta \sigma = \sigma_{max}$ (σ_{max} — максимальное напряжение в цикле) наносится сетка кривых, соответствующих конкретным значениям ΔW , согласно выражения:

$$\sigma_{max} = [2 \cdot 10^3 / (n-2)N] (W_n^{(1-n/2)} - W^{(1-n/2)})^{1/n} K^* / \sqrt{\pi} \quad (3)$$

полученного интегрированием уравнения Париса в виде: $dW/dN = 10^{-7} (K_{max}/K^*)^n$ (где W_n — исходный размер трещиноподобного дефекта, $W = W_n + \Delta W$). Крайняя кривая 2, построенная по выражению (3) для $\Delta W = 0,1$ мм, ограничивает поле точек, где размер исходного трещиноподобного дефекта остается практически неизменным в пределах всего ресурса работы конструкции.

Нижняя часть номограммы содержит кривые $\ell = f(W)$, позволяющие по исходным размерам трещиноподобного дефекта ℓ_0 и $2\sigma_0$ определить его обобщенный размер W_0 . Для различных

соотношений $l_0/2c_0$ зависимости $\sigma = f(w)$ построены по выражению:

$$W = \frac{B}{Q} [1 + 0,12(1 - \sigma/c)]^2 \left(\frac{2B}{\pi c} \operatorname{tg} \frac{\pi c}{2B} \right) \quad (4)$$

где Q — параметр формы поверхностной трещины; B — толщина конструктивного элемента.

В тех случаях, когда K_0 определить не удастся, вместо кривой I используется кривая 3, построенная исходя из возможности перехода к скачкообразному продвижению трещины, который может наступать при скорости усталостного роста трещины порядка $dW/dN = 5 \times 10^{-6}$ м/цикл (Тарасов С.И.). С учетом этого на основе использования уравнения Париса кривая 3 наносится согласно выражения:

$$\sigma_{\max} = (50)^{1/n} \frac{K^*}{\sqrt{\pi W}} \quad (5)$$

Полученная совокупность кривых в координатах $\sigma-W$ и $\sigma-W$ обеспечивает оперативную расчетную оценку работоспособности оболочковой конструкции с несквозным трещиноподобным, исходя из предельного состояния разгерметизации, по данным НРК.

Для выполнения расчета применительно к конкретному узлу оболочки дополнительно на номограмму наносятся: уровень допускаемых напряжений $\sigma = [\sigma]$, размах напряжений отнулевого пульсирующего цикла $\sigma = \Delta \sigma = \sigma$ и граничная прямая $W = W_{кр}^T = 0,7B$, за пределами которой ($W > W_{кр}^T$) разгерметизация может наступить вследствие потери пластической устойчивости перемычки между вершиной трещины и обратной поверхностью конструктивного элемента. Оценка критичности размера трещиноподобного дефекта показана на рис. 3 стрелками.

Так по начальным размерам трещины (l_0 и $2c_0$) в нижней части номограммы определяется обобщенный размер этого дефекта W . Положение точки A позволяет определить приращение ΔW за весь период эксплуатации и подсчитать конечный размер дефекта $W_k = W_0 + \Delta W$. Критичность размера оценивается путем сопоставления W_k с $W_{кр}$ по условию (2), где $W_{кр}$ — критический размер трещины, устанавливаемый из условия исключения нестабильной разгерметизации при нагружении до уровня допускаемых напряжений $[\sigma]$ (точка C). Коэффициент запаса по размеру дефекта выражается отношением $W_{кр}/W_k$. Вследствие

ограниченных возможностей определения радиуса притупления по контуру дефекта, выявленного методами НРК, а также в соответствии с рекомендациями ряда других исследователей, при использовании номограммы (рис. 3) предлагается консервативный подход — все обнаруженные НРК несплошности считать трещиноподобными.

Основные результаты и выводы

1. Использование методики МВТУ, предусматривавшей одновременную запись на ленту осциллографа усилия, растягивающего плоский образец с поверхностной трещиной, и раскрытия берегов этой трещины, а также измерения профиля поверхностей разрыва после испытания, позволяет с системных позиций характеризовать кинетикоэнергетические условия изменения напряженно-деформированного состояния в зоне вершины трещины в процессе ее страгивания и развития в направлении толщины.

Так установление удлинения волокна в вершине трещины при ее страгивании позволяет судить о напряженно-деформированном состоянии зоны пластичности в момент ее страгивания. Приращения удлинения волокон по мере продвижения трещины характеризуют энергетические затраты на это продвижение, изменение ускорения расхождения берегов исходной трещины отражает баланс поглощаемой энергии, а резкое возрастание скорости перемещения берегов трещины предопределяет уменьшение пластичности металла в локальной зоне у вершины движущейся трещины.

2. При растяжении плоского образца с поверхностной трещиной условия плоской деформации в зоне ее вершины сохраняются вплоть до начала развития макропластических деформаций сечения, если обобщенный размер трещины не менее 6 мм и не более 0,7 от толщины сечения образца. Поэтому для определения коэффициента интенсивности напряжений в момент страгивания трещины достаточно толщины образцов порядка $I_2 \dots I_5$ мм.

3. Анализ результатов испытаний образцов с поверхностной трещиной, в том числе и при низких температурах, показал:

а) значение пластического удлинения волокна δ_0 в момент страгивания трещины четко характеризует отход от условий плоской деформации в локальной зоне у вершины трещины. Границы изменения δ_0 при хрупком, квазихрупком и вязком разрушении оказываются едиными для широкого класса материалов и могут служить показателем корректности определения коэффициента K_0 ;

б) значение пластического удлинения волокна δ_M в момент превращения поверхностной трещины в сквозную характеризует пластическую податливость зоны разрушения и может служить показателем стабильности роста трещины в направлении толщины;

в) диапазоны значения δ_0 и δ_M , а также отношения уровней напряжения страгивания трещины и начала макропластических деформаций сечения, характерные для основных типов разрушения систематизированы в таблице.

4. В зависимости от начального участка кривой деформирования материала развитие пластических деформаций в локальной зоне у вершины трещины перед страгиванием имеют следующие особенности: при отсутствии площадки текучести увеличение зоны пластичности происходит плавно по мере возрастания нагрузки; при наличии площадки текучести — резко, в результате наступления локальной пластической неустойчивости.

5. Показано, что низкотемпературный вязко-хрупкий переход для сталей с площадкой текучести определяется изменением кинетикоэнергетических условий протекания локальных пластических деформаций в зоне вершины трещины. В результате понижения температуры и повышения σ_T , т.е. уровня напряжений начала макропластических деформаций, подвод энергии к зоне локальной пластической неустойчивости у вершины трещины возрастает, вызывая соответствующее увеличение ускорения перемещения берегов трещины, а следовательно, и скорости деформирования металла у вершины трещины. Увеличение скорости деформирования локальной зоны способствует ее дальнейшей локализации, затрудняет отход от условий плоской деформации и, тем самым, предопределяет наступление вязко-хрупкого перехода.

6. Методика МВТУ по определению критического значения

$K_I = K_{IC}$ и оценка корректности его использования в расчетах на трещиностойкость с позиций линейной механики разрушения по параметрам δ_0 и δ_M применима как к однородному металлу, так и к той или иной зоне механически неоднородного стыкового сварного соединения.

7. Исходя из предельного состояния нарушения герметичности и заданного ресурса оболочковой конструкции, разработана номограмма, позволяющая оперативно оценивать работоспособность сварного соединения стенки оболочки по данным неразрушающего контроля о размерах и расположении обнаруженного дефекта с определением

ем коэффициента запаса
факта.

$$\frac{W_{к0}}{W_0 + \Delta W}$$

по размеру де-

8. Методические рекомендации по оценке работоспособности стыковых сварных соединений оболочковых конструкций при наличии сквозного дефекта разосланы ряду заинтересованных организаций.

Основное содержание диссертации отражено в работах:

1. Куркин С.А., Гуменшаймер И.И., Лавряков Ю.Ю. Кинетика развития локальных пластических деформаций как фактор, способствующий переходу от вязкого разрушения к хрупкому // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. - 1989. - № 2. - С. 6-9.

2. Куркин С.А., Гуменшаймер И.И., Лавряков Ю.Ю. Оценка трещиностойкости элементов оболочковых конструкций // Трещиностойкость материалов и элементов конструкций ЯЭУ. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - С. 76-88.

Таблица I.

Основные типы разрушения металла толщиной $B \geq 12$ мм и глубиной трещины 6 мм $< l \leq 0,7B$ при растяжении

Условия страгивания трещины			Развитие трещины	Пластическая "податливость" зоны разрушения δ_N , мм	Характер разрушения
Напряжение σ_0 , МПа	Удлинение волокна δ_0 , мм	Без площадки текучести			
$\sigma_0 < 0,75 \sigma_{22}$	$\sigma_0 \leq (0,9 \div 1) \sigma_{22}$	$\delta_0 < 0,03$	Нестабильность сразу после страгивания $K_0 \approx K_{ис}$	$\delta_N < 0,5$	Хрупкий
$\sigma_0 < 0,95 \sigma_{22}$			Нестабильность после стабильного подрастания $K_0 \leq K_{ис}$	$\delta_N \leq 0,6$	Квази-хрупкий
$\sigma_0 \geq 0,055 \sigma_{22}$	$\sigma_0 \geq (0,9 \div 1) \sigma_{22}$	$\delta_0 \geq 0,2$	Стабильный рост вплоть до превращения в сквозную	$\delta_N \geq 1,5$	Вязкий

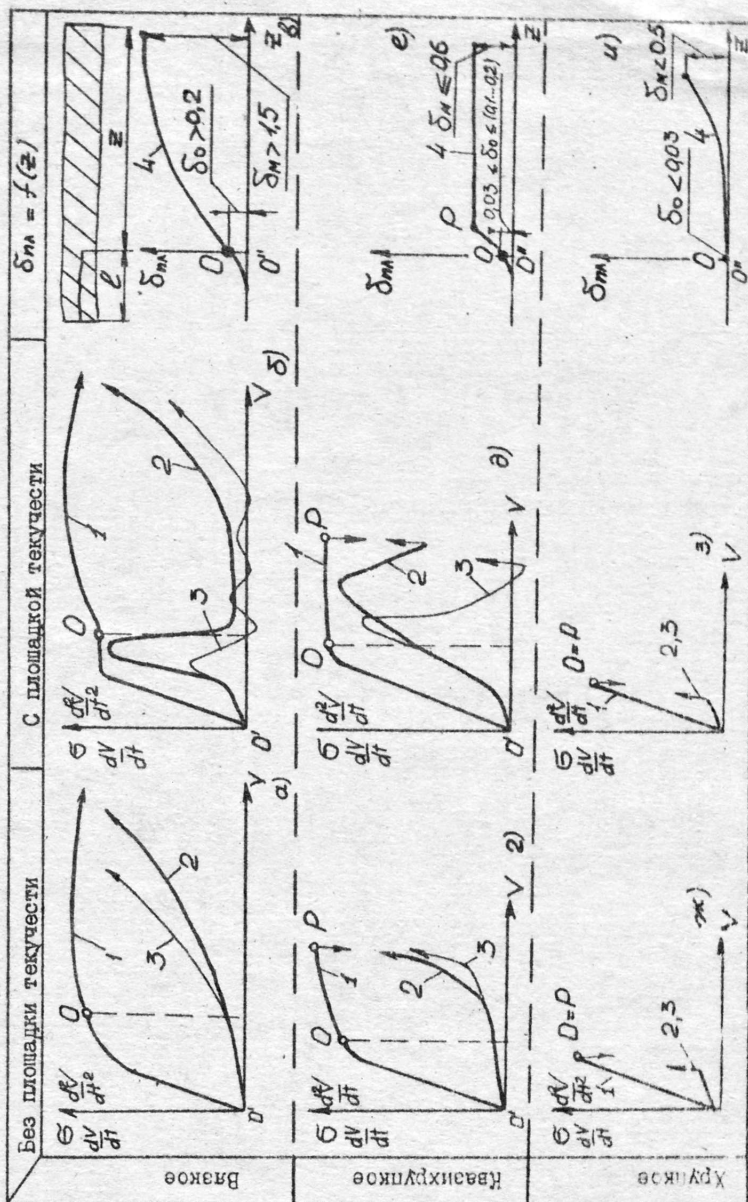


Рис. 1. Схемы характерных типов разрушения

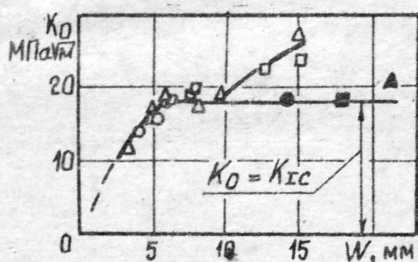


Рис. 2. Статическая трещиностойкость сварных соединений сплава ИМВ-2 :

○□△ - основной металл, шов и плоскость
сплавления для толщины $B = 10 + 12$ мм ;
●■▲ - то же для $B = 18$ мм

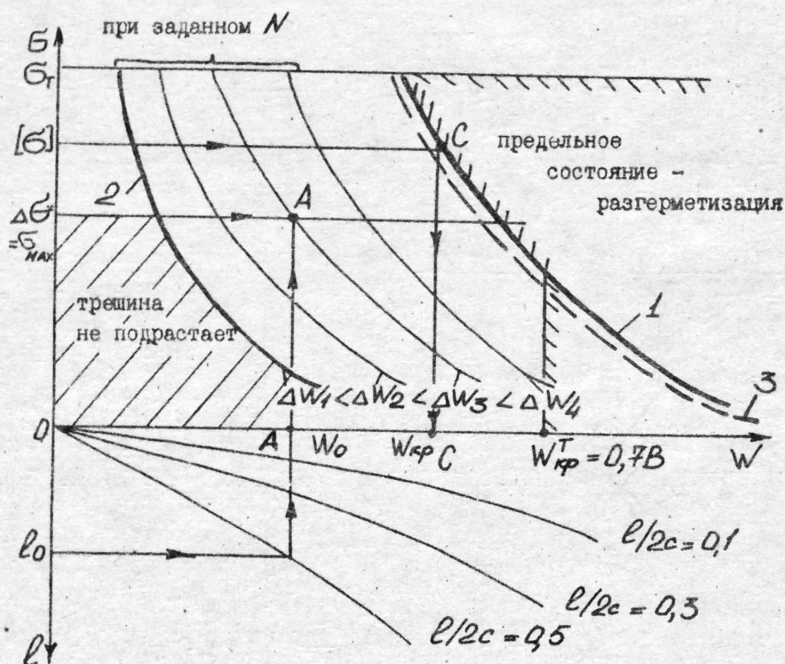


Рис. 3. Номограмма для выполнения контрольного расчета