№ 337666

НА ДОМ НЕ ВЫДАЕТСЯ

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

СССР

Московское

ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшее

техническое училище имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

РУКОСУЕВ Игорь Валентинович

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАЗРУШЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СВАРНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ СОСУДОВ

(05.04.05 – 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 1979

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
СССР
Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшее
техническое училище имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

РУКОСУЕВ Игорь Валентинович

1337666 Ф

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАЗРУШЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СВАРНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ СУДОВ

(05.04.05 – Технология и машины сварочного производства)

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана
1337666
Рукосуев И.В. Исследование

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 1990

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

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

Официальные оппоненты: д.т.н., ст.н.с. КАРЗОВ Г.П.

к.т.н., доцент СМИРНОВ А.Г.

Ведущее предприятие указано в решении Ученого Совета.

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 им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, МВТУ им. Баумана.

Ваши отзывы на автореферат в 2-х экз., заверенные печатью, просим выслать по указанному адресу.

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

Автореферат разослан " " _____ 1979 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА В.ЯМПОЛЬСКИЙ

МВТУ
им. Н.Э. Баумана
ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ
БИБЛИОТЕКА

Л 76931 Подп.к печати 2 апреля 1979 г. Объем 1 п.л.
Тир. 100 экз. Ротапринт МВТУ им.Н.Э.Баумана, 107005, Москва
2-я Бауманская ул., д. 5, Заказ 518

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Одной из главных задач десятой пятилетки является повышение эффективности производства и улучшение качества работы. Качество сварных изделий должно обеспечивать надежную работу их в эксплуатации, иначе нет эффективности. Однако снижение эффективности происходит и в том случае, когда требования качества неоправданно жестки.

Существующие нормативные документы на допускаемые дефекты способствуют поддержанию необходимой технологической дисциплины на производстве, но, как правило, не имеют достаточных обоснований с позиций прочности, т.е. с позиций исключения отказа в эксплуатации из-за наступления предельного состояния разрушения. Отсюда вытекает актуальность обоснования критериев дефектности с позиций прочности.

В настоящей работе эти вопросы рассматриваются применительно к стыковым соединениям тонкостенных сосудов, работающих под давлением.

Цель работы. Целью данной работы является разработка основных положений методики установления критических размеров дефектов с позиций наступления предельного состояния разрушения применительно к листовому металлу и сварным соединениям тонкостенных сосудов давления.

Методы исследования. Исследование закономерностей роста трещин при повторных нагружениях проводили визуально с помощью инструментального микроскопа и путем осциллографирования процесса разрушения образцов. На ленту осциллографа непрерывно записывали показания датчиков перемещения кромок надреза и усилия на образце. Процесс разрушения от реальных дефектов исследовали путем изучения поверхностей разрушения, вскрытых разрывом, при испытании сварных образцов в виде сферической выпучины, подвергнутых циклическому двухосному растяжению.

Обработку результатов всех испытаний осуществляли с позиций механики разрушения.

Научную новизну работы составляет решение актуальной научной задачи установления связей между свойствами металла, размерами поверхностных трещиноподобных дефектов, условиями нагружения и наступлением предельного состояния разрушения оболочки тонкостенного сосуда в виде нарушения ее герметичности. Показано, что в зависимости от исходных размеров дефекта и свойств металла, оцениваемых параметрами механики разрушения K_{Ic}, I_c и Δ_c, нарушение герметичности наступает в результате либо пластической

неустойчивости перемычки под дном поверхностной трещины, либо нестабильности трещины. Наступление этого предельного состояния в результате роста трещины в направлении толщины при многократном нагружении определяется закономерностью $dl/dN = f(K)$. Установлено, что в этом направлении поверхностная трещина может расти с большей скоростью, чем сквозная в тонколистовом материале.

Практическая ценность. Разработанная методика позволяет устанавливать закономерности роста поверхностной трещины в основном металле, в различных зонах сварных соединений и в многослойном листовом прокате. Сопоставление полученных закономерностей для различных материалов обеспечивает сравнительную количественную оценку их сопротивляемости разрушению от поверхностного дефекта.

Апробация работы. Результаты исследования процесса разрушения многослойного листового проката Д16Т с прослойками Ti и Al были использованы на одном из предприятий.

Основные положения работы докладывались на Всесоюзной межвузовской конференции "Прочность сварных конструкций и требования контроля" в г. Москве, на УI конференции НТО Машпром, посвященной 60-летию Октября, в г. Калуге и на научном семинаре кафедры АМ-7 МВТУ им. Н.Э.Баумана.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и общих выводов по работе, изложена на 137 страницах машинописного текста, содержит 69 рисунков, 61 таблицу и 93 наименования использованных литературных источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава I. Причиной разрушения сварных конструкций чаще всего являются дефекты сварки. Еще в конце 40-х годов в работах Николаева Г.А., Назарова С.Т., Макарова И.И. и других исследователей указывалось на влияние дефектов сварки на механические свойства сварных соединений. К настоящему времени наметились три подхода к оценке влияния дефектов: метод прямого эксперимента, метод концентрации напряжений и деформаций и метод механики разрушения. Данные прямых экспериментов обеспечивают оценку работоспособности конкретных конструкций с дефектами, однако для оценки опасности дефектов в других условиях оказываются недостаточными. В этом плане более универсальным является подход с позиций концентрации напряжений в зоне дефекта. Наиболее полное отражение эта проблема нашла в работах Макарова И.И. Однако разнообразие форм, характера и взаимного расположения дефектов, а также ограниченные возможности неразрушающих методов контроля, затрудняют определение

величин коэффициентов концентрации.

Опасность трещиноподобных дефектов способна оценить механика разрушения.

При повторных нагружениях скорость роста трещины определяется размахом коэффициента интенсивности напряжений ΔK. В большинстве случаев зависимости типа $dl/dN=f(K_{max},\Delta K)$ определяют на образцах со сквозной трещиной, в то время как для сосудов давления представляет интерес рост трещины в направлении толщины стенки сосуда. Однако в литературе практически отсутствуют рекомендации по установлению закономерностей роста поверхностных трещин. Кроме того, в настоящее время нет четкости в определении, что понимать под критическим размером дефекта.

Задачи настоящей работы заключались в следующем:

1. Формулирование требований к методике определения критических размеров дефектов с позиций наступления предельного состояния разрушения стенки сосуда.

2. Разработка оснастки и приемов экспериментального исследования процесса роста поверхностной трещины в направлении толщины стенки сосуда.

3. Установление закономерностей разрушения от поверхностного дефекта при повторно-статическом нагружении.

Глава 2. В действующем производстве вопрос браковки или приемки готового сварного изделия решается путем сопоставления данных контроля и требований нормативных документов в части допустимых размеров дефектов. Отсутствие обоснования этих документов с позиций прочности приводит к тому, что их соблюдение еще не является гарантией безотказной работы конкретной конструкции в пределах заданного ресурса. Корректировка существующих нормативных документов с позиций прочности требует определения критических размеров характерных дефектов сварных соединений с последующим переходом к допускаемым размерам через коэффициент запаса.

В настоящей работе рассматривается только подход к определению критических размеров дефектов применительно к сварным тонкостенным сосудам давления, исходя из предельного состояния разрушения - нарушения герметичности.

При рассмотрении процесса разрушения в условиях однократного нагружения были использованы данные о процессе разрушения от поверхностного надреза, полученные Сильвестровым Ю.Г., который исследовал распределение пластических удлинений по толщине перемычки под дном поверхностной трещины при ее росте. Анализ этих данных показывает, что наличие поверхностной трещины может при-

вести к нарушению герметичности по трем механизмам: I) при наступлении нестабильности трещины, 2) при достижении пластической неустойчивости перемычки под дном поверхностной трещины, 3) в результате стабильного подрастания трещины с последующим окончательным разрушением вследствие наступления пластической неустойчивости.

Для оценки возможности разрушения в этих случаях целесообразно использовать критерии K_{Ic}, $\bar{I}_c$ и Δ_c. При малой величине пластической зоны $r = \frac{1}{6\pi}(K_{Ic}/\sigma_{0,2})^2$ у вершины трещины нестабильность наступает при $K = K_{Ic}$. Для тонколистовых материалов это маловероятно.

При переходе всей перемычки под дном трещины в пластическое состояние возможность нестабильности трещины или начала ее устойчивого подрастания можно оценить, используя концепцию предела трещиностойкости $\bar{I}_c$.

Значительные пластические деформации под дном трещины могут привести к наступлению пластической неустойчивости перемычки. Разрушение стенки в этом случае можно оценить по уравнению Дафрезна, которое позволяет подсчитать величину напряжений σ^*, вызывающих это состояние:

$$\frac{\sigma^*}{\sigma_{0,2}} = \frac{E\Delta_c}{4C\sigma_{0,2}} + \frac{1}{6}\left(5\frac{\sigma_в}{\sigma_{0,2}} + 1\right)(1 - \ell/t) \qquad (I)$$

где C – половина длины трещины, ℓ – глубина трещины, t – толщина материала, $\sigma_в$, $\sigma_{0,2}$ и E – механические характеристики материала при двухосном растяжении, Δ_c – критическое раскрытие кромок поверхностной трещины.

Величина Δ_c определяется расчетно-экспериментальным методом по уравнению (I) из предположения, что пластическая зона расположена только под дном трещины.

При повторных нагружениях процесс разрушения включает стадию образования трещины от исходного дефекта, ее рост и разрушение на очередном цикле нагружения при достижении критического размера. Если предположить, что механизмы разрушения на последнем цикле многократного нагружения и при однократном нагружении весьма близки, то критический размер усталостной трещины, вызывающей разрыв стенки сосуда при очередном нагружении, может быть принят таким же, как и при однократном нагружении. Наша обработка результатов испытаний Степанова А.А., проведенных им на тонкостенных сварных сосудах с дефектами в сварных швах (поры и непровары), показала, что величины критериев механики разрушения ($\bar{I}_c$ и Δ_c) соответствующих разрушению стенки сосуда при однократном нагружении и на последнем цикле многократного нагружения оказались близкими.

Экспериментальные данные работы Куркина С.А. указывают на наличие связи между долговечностью сосуда и величиной кажущегося коэффициента интенсивности напряжений $K_{каж}$, подсчитанного для дефекта как для трещины такого же очертания. По-видимому, величина $K_{каж}$ в большей мере должна характеризовать начальную стадию разрушения, т.е. количество циклов до зарождения и формирования трещины $N_{зар}$. На это указывают и экспериментальные данные Школьника Л.М., полученные на образцах с боковыми надрезами. Наши испытания плоских образцов со сквозным и с поверхностным надрезами, а также с отверстиями разного диаметра показали, что с ростом $K_{каж}$ количество циклов до зарождения трещины уменьшается. Поэтому экспериментальное построение зависимости типа $N_{зар} = f(K_{каж})$ может представлять практический интерес.

Знание закономерности роста трещины в виде уравнения Париса $dl/dN = CK^m$, где C и m постоянные, позволяет подсчитать количество циклов N, в течение которых произойдет подрастание трещины от исходного размера l_0 до критического $l_{кр}$, если предположить, что форма трещины Q остается неизменной по уравнению

$$N = \frac{1}{C(\sigma\sqrt{1{,}21\pi/Q})^m} \cdot \frac{l^{1-\frac{m}{2}}}{1-\frac{m}{2}} \Bigg|_{l_0}^{l_{кр}} \qquad (2)$$

Разработка методики испытаний с целью установления закономерностей роста поверхностной трещины в направлении толщины рассматривается в следующей главе.

В тех случаях, когда дефекты расположены в зонах конструктивной концентрации напряжений, а также при наличии остаточных напряжений, уровень которых трудно или невозможно оценить, предлагается средние напряжения в зоне дефекта принимать равными $\sigma_{0,2}$.

Глава 3. В случае характерного для сосудов давления отнулевого пульсирующего цикла нагрузки $\Delta K = K$ закономерность роста трещины $dl/dN = f(K_{max}, \Delta K)$ принимает вид $dl/dN = f(K)$. Получать такую зависимость желательно на образцах, имитирующих дефекты стенки сосуда. Так как для сосуда характерны поверхностные дефекты и нагружение с небольшой частотой, испытания целесообразно проводить на образцах с поверхностной трещиной в режиме повторно-статического нагружения.

Нередко пытаются долговечность работы сосуда с дефектами определять по результатам испытаний образцов со сквозной трещиной. Поэтому важно показать отличительные особенности развития

разрушения от сквозной и поверхностной трещин.

Исследование закономерностей разрушения проводили на плоских листовых образцах с центральным сквозным и поверхностным надрезами. Сквозные надрезы наносили вольфрамовой нитью с помощью пасты КЭМ. Поверхностные надрезы делали при помощи фрезы толщиной 0,2 мм. Образцы подвергали повторно-статическому нагружению с частотой 10÷15 циклов в минуту на специальной установке, разработанной в МВТУ им.Баумана Барыбиным С.В. при участии автора данной работы. Слежение за процессом возникновения и роста трещины осуществляли непрерывной записью на ленту осциллографа усилия, растягивающего образец, и показаний датчика перемещений кромок. Для определения характерного размера l_i растущей трещины использовали метод податливости, предполагающего, что величина упругого раскрытия кромок трещины пропорциональна ее размерам и приложенному напряжению. Поэтому подсчет l_i вели по выражению

$$l_i = l_o \frac{\Delta_i}{\Delta_o} \qquad (3)$$

где l_o – начальный размер трещины, Δ_o и Δ_i – размахи показаний датчика перемещений кромок надреза соответственно в начале и после i-го нагружения. На образцах толщиной 6 мм из сплава ВТ6С была сделана проверка справедливости выражения (3) для случая роста поверхностной трещины в направлении толщины. При этом поверхностные надрезы имели длину значительно превышающую толщину образца, чтобы рост поверхностной трещины шел только вглубь материала. Расхождение между действительной глубиной трещины и подсчитанной по выражению (3) не превышало 7%. Для определения скорости роста трещины $\Delta l/\Delta N$ в течение определенного числа нагружений ΔN на осциллограмме измеряли величины Δ_i в начале и в конце этого интервала, подсчитывали соответствующие им значения l_i и прирост трещины Δl, а затем $\Delta l/\Delta N$. Результаты обработки осциллограммы, подсчеты K и условия испытания заносили в таблицу и по ней строили зависимость $dl/dN = f(K)$. Отработку методики исследования проводили на тонколистовом сплаве Д16Т толщиной 2,1 и 4,8 мм. Повторно-статические испытания этого сплава показали, что развитие поверхностной трещины в направлении толщины происходит с большей скоростью, чем рост сквозной трещины.

Не меньший интерес представляет исследование роста поверхностной трещины в элементах сравнительно большой толщины. Для этой цели из сплава Д16Т толщиной 50 мм, с такими же механическими свойствами, что и тонколистовой сплав Д16Т, были изготовлены плоские образцы толщиной 25 мм. На образцах были нанесены по-

верхностные надрезы фрезой толщиной 0,2 мм. Было установлено, что с увеличением толщины образцов увеличилась погрешность определения текущей глубины трещины при использовании метода податливости. Поэтому слежение за ростом поверхностной трещины на толстолистовом сплаве Д16Т осуществляли по рискам на поверхности разрушения, оставляемым путем периодических уменьшений нагрузки в течение 200-300 циклов. Возникновение трещины и подсчет текущей глубины трещины между рисками вели по показаниям датчика перемещений кромок надреза, записанным на ленте осциллографа в процессе испытания. Считали, что изменение размаха показаний датчика перемещений прямо-пропорционально приросту глубины трещины в каждом интервале между рисками. По такой методике была получена закономерность роста поверхностной трещины в сплаве Д16Т толщиной 25 мм в области достаточно высоких $K (K > 60 кгс/мм^{3/2})$ для этого сплава. Оказалось, что зарождение от надреза и развитие поверхностной трещины в толстолистовом сплаве Д16Т происходило значительно медленнее, чем в тонколистовом. Этот результат был неожиданным, поскольку с большой толщиной обычно связывают меньшую сопротивляемость металла разрушению. Поэтому был изготовлен образец толщиной 5,4 мм из того же листа толщиной 50 мм и был подвергнут повторно-статическим испытаниям в условиях, близких к условиям испытания толстолистовых образцов. Сопротивляемость разрушению этого образца оказалась значительно ниже, чем образцов толщиной 25 мм, но весьма близкой с образцами из тонколистового сплава Д16Т толщиной 4,8 мм. Причиной такого различия, по-видимому, является различный уровень локальных остаточных напряжений сжатия. Величина этих напряжений зависит от сопротивляемости металла развитию пластических деформаций у вершины трещины и поэтому они будут наибольшими в условиях плоской деформации. В тонколистовом металле приближение вершины трещины к противоположной стороне вызывает смягчение напряженного состояния, а следовательно и уменьшение локальных остаточных напряжений сжатия.

Глава 4. Закономерности роста трещин в основном металле и металле шва исследовали на плоских образцах из сплавов АМг6 и МА2-I. Образцы с центральным сквозным надрезом из сплава МА2-I имели толщину 0,8; 3,5 и 5 мм, а с поверхностным надрезом толщину 5 мм. Испытания сплава АМг6 проводили на образцах толщиной 6 мм. Слежение за ростом поверхностной трещины осуществляли с помощью метода податливости, а за ростом сквозной трещины визуально с помощью микроскопа МИ-I.

Результаты испытаний образцов со сквозным надрезом из спла-

ва МА2-I при $\sigma_{max} \leq 0{,}5\,\sigma_{0,2}$ в диапазоне изменения K от 30 до 100 кгс/мм$^{3/2}$ даны на рис. I. Можно видеть, что в образце толщиной 0,8 мм скорость роста сквозной трещины в пределах значений K от 37÷50 кгс/мм$^{3/2}$ не увеличивается, оставаясь в среднем близкой к 3.10^{-4} мм/цикл. Для образца толщиной 3,35 мм зависимость скорости роста трещины, в этом же диапазоне изменения K, смещена вправо в область больших скоростей роста трещины, по сравнению с зависимостью, полученной на образце толщиной 0,8 мм. При этом увеличение K сопровождается и увеличением скорости роста трещины. В образце толщиной 5 мм рост сквозной трещины вначале происходил с наибольшей скоростью по сравнению с ее ростом в образцах меньшей толщины, но затем, при K =45 кгс/мм$^{3/2}$, произошло ветвление трещины, что привело к резкому торможению скорости ее развития. По-видимому, различие в закономерностях роста сквозной трещины в образцах различной толщины следует объяснить изменением напряженного состояния в вершине трещины от плоской деформации до плосконапряженного состояния в зависимости от приближения размера пластической зоны к толщине образца.

Испытания образцов с поверхностным надрезом из сплава МА2-I проводили при $\sigma = (0{,}5 \div 0{,}8)\,\sigma_{0,2}$ в диапазоне изменения K от 25 до 60 кгс/мм$^{3/2}$.

Результаты испытаний образцов с поверхностным надрезом из сплава МА2-I показаны на рис. 2. Можно видеть, что расположение зависимостей $dl/dN = f(K)$, полученных на различных образцах, определяется величиной K в начале испытаний. Чем выше K, тем выше расположение кривых. Однако все эти кривые как бы стремятся к одной прямой, выражающей закономерность роста поверхностной трещины, а отклонение экспериментальных данных от этой прямой в начале испытаний, вероятно, связано с влиянием конечной величины редиуса надреза на рост от него усталостной трещины. Полученная закономерность роста поверхностной трещины аппроксимируется выражением

$$dl/dN = 1{,}58 \cdot 10^{-8} K^{3{,}27}$$

Эта закономерность роста поверхностной трещины нанесена на рис.I прямой I. Можно видеть, что все экспериментальные данные, полученные на образцах со сквозной трещиной, расположены левее этой прямой, т.е. развитие поверхностной трещины в тонколистовом материале МА2-I происходило с большей скоростью, чем сквозной. Это можно объяснить тем, что в вершине поверхностной трещины, даже на тонколистовом материале, условия плоской деформации сохраняются в большей степени, чем в случае сквозной трещины.

Исследование сплава АМг6 толщиной 6 мм проводили на образцах с поверхностным надрезом. Этот сплав использовали в состоянии поставки ($\sigma_{0,2}$ =18 кгс/мм^2) и после упрочнения путем одноосного растяжения образцов ($\sigma_{0,2}$ =25÷27 кгс/мм^2) перед нанесением надреза. Экспериментальные данные показали, что такое упрочнение образцов не повлияло на сопротивляемость сплава АМг6 росту поверхностной трещины. В результаты испытаний, проведенных в диапазоне изменения K от 38 до 70 кгс/мм$^{3/2}$, установлена закономерность роста поверхностной трещины сплава АМг6, которая аппроксимируется уравнением

$$dl/dN = 1{,}02 \cdot 10^{-11} K^{4{,}75} \qquad (4)$$

Интересно заметить, что скорость роста сквозной трещины, определенная при испытании образца из АМг6 при уровне K =20-25 кгс/мм$^{3/2}$, соответствовала уравнению (4). В этом случае рост сквозной трещины происходил в условиях плоской деформации, т.к. $t > 2{,}5(K/\sigma_{0,2})^2$, где t - толщина образца.

Закономерности роста поверхностной трещины позволяют сравнивать тонколистовые материалы по их сопротивляемости развитию разрушения. В работе показано, что сплав МА2-I обладает более низким сопротивлением росту трещины, чем сплавы Д16Т и АМг6, сопротивление которых примерно одинаково.

Испытания на сварных образцах из сплава МА2-I с поверхностным надрезом по оси сварного шва показали, что скорость роста поверхностной трещины в металле шва сплава МА2-I несколько ниже, чем в основном металле.

В металле шва сплава АМг6 средняя скорость поверхностной трещины оказалась такой же, как и в основном металле.

Непосредственное наблюдение в процессе испытания за развитием разрушения от реальных дефектов невозможно. Поэтому разработка методических приемов получения информации о процессе разрушения от реальных дефектов представляет большой практический интерес. С этой целью были проведены повторно-статические испытания сварных образцов в виде сферической выпучины из сплава АМг6 толщиной 3 мм. Образцы имели круговой шов, усиление которого со стороны проплава у большей части образцов снимали. Образцы подвергали двухосному растяжению пульсирующим циклом при σ_{max} = =28,8 кгс/мм^2 до наступления предельного состояния - появления течи. После испытаний проводили вскрытие поверхностей разрушения. Разрушение сварных образцов без снятия усиления начиналось со стороны проплава в месте резкого перехода от основного металла к наплавленному. На образцах со снятым усилением причиной раз-

рушения были окисные пленки довольно сложной формы и частично поры, выходящие на внутреннюю поверхность образца или близко к ней. При осмотре поверхности разрушения на них довольно хорошо были видны исходные размеры дефектов и конечные размеры выросших усталостных трещин. Зарождение трещин от дефектов в виде окисных плен происходило не по всему контуру дефекта, а лишь от части дефекта, расположенной близко к внутренней поверхности образца. Эти трещины, сразу приняв форму полуэллипса, развивались как бы не обращая внимания на остальную часть дефекта, от которой трещина не возникала. Это связано, по-видимому, с тем, что окисные плены не нарушают сплошности металла.

Для сварных соединений характерно наличие неоднородности механических свойств в зоне сварного соединения. Однако в настоящее время отсутствуют не только данные о закономерностях роста трещины в условиях неоднородности, но и методика проведения таких исследований. Наиболее простой случай неоднородности имеет место в многослойных материалах, которые начинают все шире применяться в оболочковых конструкциях.

Для проведения исследований был взят трехслойный материал, состоящий из двух слоев сплава Д16Т, разделенных мягкой (Al) и твердой (Ti) прослойками. Испытания проводили по той же методике, что и для однородного материала. Результаты повторно-статических испытаний образцов толщиной 2÷2,7 мм с мягкой и с твердой прослойками показали, что наличие прослоек незначительно снижает скорость роста сквозной трещины по сравнению с ее скоростью в однородном материале.

Иной результат был получен при испытаниях многослойного материала толщиной 6 мм с поверхностной трещиной. Развитие поверхностной трещины до прослойки происходило так же как в однородном материале, однако при подходе поверхностной трещины к прослойке характер разрушения менялся. Осмотр поверхностей разрушения показал, что в случае как мягкой, так и твердой прослоек имело место расслоение слоев материала. По-видимому, сцепление между слоями было настолько мало, что не препятствовало утяжке при подходе вершины поверхностной трещины к границе слоев. Далее трещина развивалась не в толщину, а вдоль поверхности листа, как квазисквозная, пересекая слой, содержащий исходный надрез.

Таким образом, при малой прочности сцепления слоев наличие прослойки прекращает рост поверхностной трещины в направлении толщины, увеличивая долговечность стенки сосуда до разрушения. Результаты исследований по сопротивляемости росту трещин многослой-

них материалов были использованы на машиностроительном заводе при внедрении этих материалов в реальные конструкции.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Для тонкостенных сосудов, работающих под давлением, основным предельным состоянием следует считать нарушение герметичности, что служит признаком отказа в работе. Дефекты, способные вызвать отказ в пределах заданного ресурса работы, следует считать критическими.

2. При однократном нагружении наличие поверхностной трещиноподобной несплошности может привести к нарушению герметичности, если:

а) до начала возникновения пластических деформаций на противоположной стороне стенки в вершине трещины коэффициент интенсивности напряжений достигнет величины равной K_{1c} и трещина станет нестабильной;

б) достижению $K = K_{1c}$ предшествует развитие пластической деформации на всю толщину перемычки под дном трещины и трещина станет нестабильной при $K = {}_{1}c$;

в) достижению ${}_{1}c$ предшествует столь развитая пластическая деформация перемычки Δc по всей ее толщине, что наступает пластическая неустойчивость перемычки.

3. При многократном нагружении нарушение герметичности стенки сосуда определяется продолжительностью стадий возникновения трещины от дефекта и ее развития до размера, приводящего к разрыву стенки при однократном нагружении.

В случае объемных несплошностей простой формы стадию возникновения охватывающей их трещины с коэффициентом интенсивности напряжений $K_{каж}$ целесообразно осуществлять на основе экспериментально установленных зависимостей $N = f(K_{каж})$.

Для оценки стадии развития трещины необходимо устанавливать закономерность роста поверхностной трещины в виде уравнения Парриса $dl/dN = CK^m$.

4. Показано, что при многократном нагружении слежение за ростом поверхностной трещины в направлении толщины с помощью датчика перемещений кромок надреза на основе метода податливости позволяет обеспечить объективную оценку текущей глубины трещины на тонколистовых материалах.

С увеличением толщины материала непосредственное использование метода податливости становится затруднительным. Однако и в этом случае по изменению амплитуды перемещений кромок надреза можно фиксировать момент начала роста трещины от исходного надре-

ва. В сочетании с дискретными способами слежения за ростом поверхностной трещины метод податливости может быть использован для оценки текущих размеров трещины в направлении толщины и на толстолистовых материалах.

5. Разработанная методика позволяет устанавливать закономерности роста поверхностной трещины в виде уравнения Париса $dl/dN=CK^m$ с определением конкретных значений постоянных C и m этого уравнения.

Испытания, проведенные на сплавах Д16Т, АМг-6, МА2-I, показали, что при повторных нагружениях в тонколистовом металле рост поверхностной трещины происходит с большей скоростью, чем сквозной. Это объясняется тем, что рост поверхностной трещины происходит в условиях более близких к условиям плоской деформации, чем рост сквозной трещины.

6. Сопоставление закономерностей роста поверхностной трещины в тонколистовых сплавах Д16Т, АМг-6, МА2-I и в металле шва их сварных соединений показывает, что сопротивление развитию разрушения сплава МА2-I заметно ниже, чем сплавов Д16Т и АМг-6, сопротивление которых примерно одинаково. Сопротивляемость росту трещины металла шва сплава АМг-6 не отличается от основного металла, а сопротивляемость металла шва сплава МА2-I несколько ниже, чем у основного металла.

7. При повторных нагружениях сплава Д16Т толщиной 25 мм в области высоких значений коэффициента интенсивности напряжений K ($K > 60$ кгс/мм$^{3/2}$) показал значительно более высокое сопротивление как возникновению трещины от поверхностного надреза, так и ее развитию, чем этот же сплав толщиной 5,4 мм и 4,8 мм. Предположительно это можно объяснить тем, что с увеличением толщины металла возрастает уровень локальных остаточных напряжений сжатия, возникающих у вершины поверхностного надреза или трещины при нагружении.

8. Повторно-статические испытания образцов многослойного материала показали, что наличие тонкой прослойки почти не тормозит рост сквозной трещины. Однако прослойка с малой прочностью сцепления способна остановить рост поверхностной трещины в направлении толщины. В этом случае приближение вершины трещины к прослойке вызывает расслоение слоев и прекращение роста трещины вглубь. Дальнейший рост трещины идет вдоль поверхности в пределах одного слоя. Результаты этих исследований были использованы на одном из машиностроительных заводов.

9. Осмотр поверхностей разрушения, возникших после повторно-статических испытаний сварных образцов из сплава АМг-6 с реальными дефектами, позволяет получить обширную информацию о процессе разрушения: об исходных размерах дефекта, об особенностях зарождения трещины и об ее конечных размерах.

Возникновение и развитие разрушения от дефектов типа окисных пленок имеет свои особенности, определяемые, во-первых, сложной формой дефектов, а, во-вторых, тем, что они не являются несплошностью. Зарождение трещины усталости происходит не по всему периметру дефекта, а лишь от его части, которая наиболее близко расположена к поверхности образца. Возникшая трещина принимает форму эллипса и развивается в направлении толщины образца не обращая внимания на остальную часть дефекта, от которой трещина не возникла.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

I. Куркин С.А., Барыбин С.Б., Рукосуев И.В. Разрушение при повторно-статическом нагружении титанового сплава. "Известия вузов. Машиностроение", 1976, № 3, с.16-20.

2. Куркин С.А., Рукосуев И.В., Данилов Г.И. К вопросу о регламентации дефектов в сварном изделии. "Известия вузов. Машиностроение", 1977, № 5, с.142-146.

3. Куркин С.А., Рукосуев И.В., Данилов Г.И. Предельные состояния разрушения сварных сосудов и трубопроводов и регламентация дефектов. Тезисы докладов Всесоюзной межвузовской конференции "Прочность сварных конструкций и требования контроля", Москва, 20-25 января 1978 г.

4. Куркин С.А., Рукосуев И.В. Опеределение допустимого размера дефекта в сварных сосудах давления. В сб. "Тезисы докладов УI конференции НТО Машпром, посвященной 60-летию Октября". Калуга, 1977.

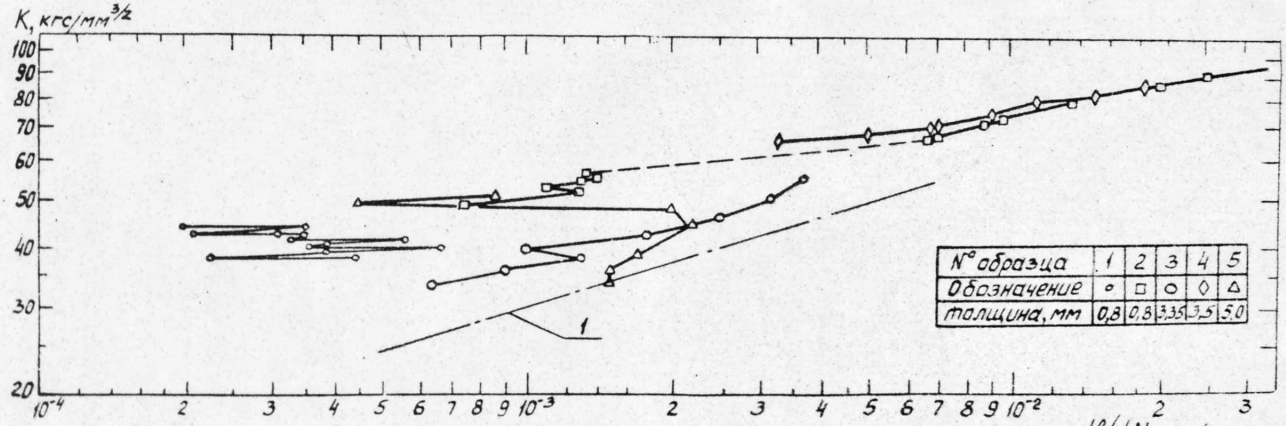


Рис. 1 Результаты испытаний плоских образцов со сквозным надрезом из сплава МА2-1.
1 – Закономерность разрушения от поверхностной трещины.

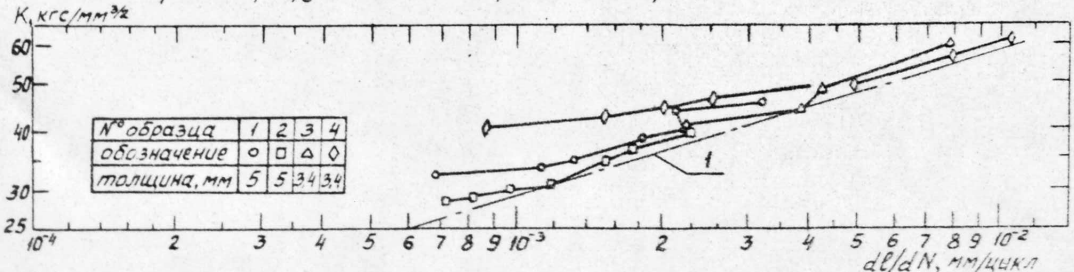


Рис. 2 Результаты испытаний плоских образцов с поверхностным надрезом из сплава МА2-1.
1 – Закономерность разрушения от поверхностной трещины