

М 3461/4

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
С С С Р

НЕ НА ДОМ
ВЫДАЕТСЯ

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

На правах рукописи

ОВЧАРЕНКО Юрий Николаевич

ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
С УГЛОВЫМИ ШВАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕХАНИКИ
РАЗРУШЕНИЯ

(05.04.05 - Технология и машины сварочного
производства)

Автореферат
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

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

Научный руководитель — доктор технических наук, профессор
ВИНОКУРОВ В.А.

Официальные оппоненты: д.т.н., профессор Игнатъева В.С.
к.т.н., с.н.с. Прохоренко В.Д.

Ведущее предприятие ЦНИИПроектстальконструкция

Защита диссертации состоится " 2 " июня 1981 г.
на заседании специализированного Совета К053.15.03 по технологии и машинам сварочного производства Московского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшего технического училища им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

Ваши отзывы на автореферат в 2 экземплярах, заверенные печатью, просим выслать по указанному адресу.

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

Автореферат разослан " 2 "

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
специализированного Совета
докт.техн.наук

А-86224

Подп.к печати 2 июня 1981

Заказ № 902 Типография

М 376 111

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Развитие сварочного производства требует совершенствования методов определения работоспособности сварных соединений, в частности соединений с угловыми швами – самого распространенного вида соединений в сварных конструкциях. Место перехода от углового шва к основному металлу в них является концентратором типа " V –образный вырез", для оценки которого общеизвестные критерии механики разрушения не подходят.

Ответственным объектом на некоторых атомных электростанциях является сварная металлоконструкция реактора РБМ-К. Выполнена она из прокатных листов стали ИОХНД толщиной 30 и 40 мм. Большинство сварных соединений – это соединения с угловыми швами, работающие на изгиб в условиях повышенных температур, статических и малоцикловых нагрузок, радиации.

Цель работы. Работа посвящена разработке критериев, формул и алгоритмов на основе математического аппарата механики разрушения, а также экспериментальных методик для определения работоспособности сварных соединений с угловыми швами на основе разработанных критериев.

Методы исследования. Расчетные методы включали в себя разложение в ряд по собственным функциям функции напряжений $U(r, \theta)$, использование функций комплексного переменного, полубратный метод исследований, численные методы граничных коллокаций и конечных элементов, метод наименьших квадратов, метод Ньютона. Экспериментальные методы состояли в определении напряжений в образцах, термдеформационном воздействии на металл, испытании образцов на статический изгиб по схеме равных деформаций, измерении деформаций и нагрузок путем тензометрирования.

Научная новизна работы заключается в теоретическом определении напряжений и перемещений в вершине V –образного выреза (аналог места перехода от углового шва к основному металлу) путем разложения в ряд функции напряжений $U(r, \theta)$, которая представлена в виде функции комплексного переменного; в разработке критериев C_{Id} , $G_{гисл}$, $g_{гисл}$, V_{Id} для оценки напряженно-деформированного состояния в месте перехода от углового шва к основному металлу в сварных соединениях – критерии $(C_{Id})_p$, $(G_{гисл})_p$, $(V_{Id})_p$ оценивают сопротивляемость указанного места разрушению; в выводе аналитической зави-

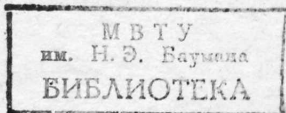
I

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1376111

Овчаренко Ю.Н. Оценка работ



симости между коэффициентом интенсивности напряжений C_{12} и коэффициентом концентрации напряжений α ; в разработке численных алгоритмов, основанных на методе граничных коллокаций, для подсчета коэффициентов интенсивности напряжений C_{12} , C_{22} для сварных соединений с угловыми швами.

Практическая ценность. Разработана методика испытаний сварных соединений с угловыми швами для определения сопротивляемости разрушению мест перехода от шва к основному металлу на основе предложенных критериев. Получены конкретные значения критериев

$\bar{\epsilon}_{ср.р}$ и $(V_{II})_p$ применительно к сварным соединениям с угловыми швами металлоконструкции реактора РБМ-К. Разработаны методические указания для определения известного деформационного критерия

$\bar{\epsilon}_{ср.р}$ упрощенным способом для оценки сопротивляемости разрушению мест перехода от шва к основному металлу в сварных соединениях с угловыми и стыковыми швами.

Апробация работ. Методика испытаний натуральных сварных соединений с угловыми швами использована в МВТУ им. Н.Э.Баумана в исследованиях, связанных с оценкой работоспособности сварной металлоконструкции реактора РБМ-К (для временных точек термодформационного воздействия на сварные образцы: исходное состояние; 1,5; 4,0 и 8,0 месяцев). Методические указания для определения деформационного критерия $\bar{\epsilon}_{ср.р}$ внедрены во ВНИИСТе для оценки сопротивляемости разрушению мест перехода от шва к основному металлу в сварных соединениях трубопроводов.

Основные положения работы докладывались на научном семинаре кафедры "Динамика и прочность машин" и дважды на научном семинаре кафедры "Машины и автоматизация сварочных процессов" МВТУ имени Н.Э.Баумана.

Объем работ. Диссертация состоит из введения, восьми глав, общих выводов и семи приложения. Изложена на 130 страницах машинописного текста, содержит 68 рисунков, 6 таблиц и 105 наименований литературных источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава I. Состояние вопроса и постановка задач исследования

Сопротивляемость разрушению мест перехода от шва к основному металлу в сварных соединениях с угловыми швами не может быть определена по известным критериям механики трещин K_{II} , G_{II} и пр.

Перед работой поставлены две основные задачи:

1. Разработать критерии, а также необходимые формулы и алгоритмы на базе математического аппарата механики разрушения с целью использования их в дальнейшем при определении сопротивляемости разрушению мест перехода от углового шва к основному металлу в сварных соединениях.

2. Создать и практически отработать методику испытаний сварных образцов с угловыми швами для определения конкретных величин разработанных критериев. Дать оценку изменения сопротивляемости разрушению мест перехода от углового шва к основному металлу сварных соединений металлоконструкции реактора РБМ-К после различных сроков термодформационного воздействия.

Программа работы включала:

1. Анализ напряженно-деформированного состояния в местах перехода от углового шва к основному металлу в сварных соединениях на основе математического аппарата механики разрушения.

2. Разработку формул и численных алгоритмов для определения силовых, деформационных и энергетических критериев разрушения мест перехода от углового шва к основному металлу в сварных соединениях.

3. Разработку формы сварных образцов с угловыми швами для испытаний, методики термодформационного воздействия на образцы и методики испытаний.

4. Испытания сварных образцов с угловыми швами после различных сроков термодформационного воздействия для определения сопротивляемости разрушению мест перехода от углового шва к основному металлу на основе использования разработанных критериев.

5. Создание методических указаний по определению известного деформационного критерия $\epsilon_{ср.в}$ упрощенным способом для оценки сопротивляемости разрушению мест перехода от шва к основному металлу в сварных соединениях с угловыми и стыковыми швами.

Глава 2. Теоретический анализ упругого напряженно-деформированного состояния тел с V -образными вырезами

Изучение напряженно-деформированного состояния в местах перехода от углового шва к основному металлу для экстремальных случаев (подрезы, наплывы при сварке, полосовины и прокате и пр.) сведено к анализу напряжений и перемещений в упругих телах с V -образными вырезами при радиусе перехода в вершине $\rho = 0$. Существующий способ представления напряжений и перемещений заклю-

чается в разложении функции напряжений $U(r, \theta)$ в ряд по собственным функциям.

$$U(r, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} r^{\lambda_n+1} F_n(d, \theta) \quad (I)$$

Показано аналогичное представление напряжений и перемещений через комплексную функцию напряжений

$$U(z) = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \bar{z} z^{\lambda_n} + \bar{a}_n z z^{\lambda_n} + \frac{b_n}{\lambda_n+1} z^{\lambda_n+1} + \frac{\bar{b}_n}{\lambda_n+1} \bar{z}^{\lambda_n+1}] \quad (2)$$

Из проведенного теоретического анализа следует, что в механике разрушения для тел с V -образными вырезами при $\rho = 0$ существуют коэффициенты C_{1d} и C_{2d} , аналогичные K_I и K_{II} для тел с трещинами, которые однозначно характеризуют напряженно-деформированное состояние у вершины V -образного выреза. Коэффициенты C_{1d} и C_{2d} обладают одной отличительной особенностью по сравнению с K_I и K_{II} . Для каждого угла d они имеют свою собственную размерность $(Mn/M^{1+\lambda_1(C_{1d})})$ и $(Mn/M^{1+\lambda_1(C_{2d})})$, причем отличную друг от друга (у C_{1d} и C_{2d}).

На основе литературных данных для узких гиперболических и параболических вырезов с применением полуобратного метода теоретических исследований получены формулы для напряжений и перемещений при "нормальном разрыве" у вершины V -образного выреза при наличии небольшого радиуса перехода ($\rho \rightarrow 0$).

Глава 3. Приближенный анализ упругого напряженно-деформированного состояния моделей сварного соединения с угловым швом
при $\rho = 0$

Показана аналитическая связь в предельной форме между коэффициентом интенсивности напряжений C_{1d} и коэффициентом концентрации $L\sigma$ для тел с V -образными вырезами.

$$C_{1d} = \lim_{\rho \rightarrow 0} \frac{L\sigma \sigma_{cp}}{(\frac{\rho}{2})^{\lambda_1-1} \lambda_1 [2 + (\lambda_1 - 1)(1 - f_1(d)) + 4^{\lambda_1}]} \quad (3)$$

Предложен способ нахождения коэффициентов интенсивности напряжений C_{1d} и C_{2d} путем использования численного метода граничных коллокаций (МГК). При его реализации для моделей сварных соединений с угловыми швами в работе внесены новшества: привлечены упругие решения, полученные другим приближенным методом,

для корректировки граничных условий; аппроксимирующие ряды составлены непосредственно для напряжений и перемещений, а не для функции напряжений $U(r, \theta)$; расчет одновременно ведется для схем работы выреза нормальный разрыв и поперечный сдвиг; осуществляется алгоритмический процесс управления сходимостью рядов путем изменения масштаба модели и одновременно граничных условий; наряду с другими оценками точность полученных решений для $C_{1\alpha}$ и $C_{2\alpha}$ проверяется относительным способом, путем проверки воспроизводимости заданных граничных условий.

МГК получена формульная связь между коэффициентом C_{1120° , нагрузкой $\frac{P}{b}$ и геометрическими параметрами конкретной модели (рис. I) исследуемого сварного соединения с угловым швом.

$$C_{1120^\circ} = 0,668 \frac{\frac{P}{b} L}{h^{1,616}} \quad \left(= \frac{0,668}{6} \sigma_{cp} h^{0,384} \right) \quad (4)$$

Аналогично для C_{2120°

$$C_{2120^\circ} = -0,674 \frac{\frac{P}{b} L}{h^{2,145}} \quad \left(= -\frac{0,674}{6} \sigma_{cp} h^{-0,149} \right) \quad (5)$$

Для такой же модели сварного соединения, но с третиной, идущей из вершины угла α МГК получена связь между коэффициентом интенсивности напряжений C_1 ($C_1 = K_I / \sqrt{2\pi}$) в вершине трещины, нагрузкой $\frac{P}{b}$, геометрическими параметрами модели и глубиной этой трещины a ($a/h \leq 0,2$).

$$C_1 = \frac{\frac{P}{b} L}{h^{3/2}} \left[0,5837 + 20,54 \left(\frac{a}{h} \right) - 146,8 \left(\frac{a}{h} \right)^2 + 395,6 \left(\frac{a}{h} \right)^3 \right] \quad (6)$$

Аналогично получено для C_2 ($C_2 = K_{II} / \sqrt{2\pi}$).

$$C_2 = -\frac{\frac{P}{b} L}{h^{3/2}} \left[0,1272 + 5,387 \left(\frac{a}{h} \right) - 48,46 \left(\frac{a}{h} \right)^2 + 136,5 \left(\frac{a}{h} \right)^3 \right] \quad (7)$$

На основании теоретического анализа напряжений в месте перехода от углового шва к основному металлу моделей исследуемого сварного соединения сделаны предположения о вероятном направлении начального разрушения.

Глава 4. Приближенный анализ напряженно-деформированного состояния при упругой и упруго-пластической работе моделей сварных соединений с угловыми швами при

$$r \rightarrow 0$$

В главе представлено численное решение для модели сварного соединения (рис. 2) в условиях упругой ($\sigma_{cp} < \sigma_T$) и упруго-пластической работы ($\sigma_{cp} \geq \sigma_T$). Методом конечного элемента (МКЭ) исследовано напряженно-деформированное состояние зоны, прилегающей к вершине V-образного выреза, при небольшом радиусе перехода ($r \rightarrow 0$). Радиус перехода $r \rightarrow 0$ условно осуществлен в модели созданием "надреза" глубиной 0,1 мм, шириной 0,2 мм. В работе выполнено также решение МКЭ для аналогичной модели сварного соединения, но увеличенной в 8,625 раза с сохранением того же надреза. Цель состояла в том, чтобы выяснить насколько совпадают пути развития напряжений и деформаций в месте перехода от углового шва к основному металлу при упругой работе увеличенной модели ($\sigma_{cp}^{нм} < \sigma_T$) и при упругой, а также упруго-пластической работе нормальной модели, т.е. проверить выполняется ли так называемый принцип автономии, состоящий в самостоятельном и независимом от многих внешних факторов поведении зоны в указанном месте безотносительно к величине модели. Численный анализ показал, что совпадение путей развития напряжений и деформаций (до определенной степени нагружения) в зоне до 4-5 мм от вершины у обеих моделей практически полное; тем самым подтвержден принцип автономии для соединений с угловыми швами. Принцип автономии использован при разработке критерия $(G_{I чел}^{нм})_p$ в главе 5.

Указанный анализ также показал, что одинаковым величинам коэффициентов интенсивности напряжений C_{Ia} при упругой работе увеличенной модели и при упругой работе нормальной модели, а также в начальные моменты упруго-пластической работы нормальной модели соответствуют одинаковые напряженно-деформированные состояния, несмотря на наличие в последней модели относительно выраженной зоны пластичности не только в месте перехода, но и на тыльной стороне.

Глава 5. Определение и разработка силовых, деформационных и энергетических критериев для сварных соединений с угловыми швами

Выполненные в главах 2, 3, 4 исследования позволили:

1. Предложить ряд критериев $C_{1\alpha}$, $V_{1\alpha}$, $G_{1\text{чсл}}$, $g_{1\text{экв}}$ для оценки напряженно-деформированного состояния в месте перехода от углового шва к основному металлу — критерии $(C_{1\alpha})_p$, $(V_{1\alpha})_p$, $(G_{1\text{чсл}})_p$, оценивают сопротивляемость указанного места разрушению.

2. Уточнить применение для аналогичных целей известного в литературе деформационного критерия $\epsilon_{\text{ср}}$, в предельном случае $\epsilon_{\text{ср.p}}$.

Критериями $C_{1\alpha}$, $G_{1\text{чсл}}$, $g_{1\text{экв}}$ рекомендовано пользоваться при упругой работе соединения ($\sigma_{\text{ср}} < \sigma_T$). В предельном случае критерии $(C_{1\alpha})_p$ и $(G_{1\text{чсл}})_p$ оценивают сопротивляемость места перехода началу возможного хрупкого разрушения соединения. Критериями $\epsilon_{\text{ср}}$, $V_{1\alpha}$ рекомендовано пользоваться при упруго-пластической работе ($\sigma_{\text{ср}} \geq \sigma_T$). В предельном случае критерии оценивают сопротивляемость мест перехода начальному возможному квазихрупкого или вязкого разрушения соединения.

Коэффициент $C_{1\alpha}$ является аналогом коэффициента интенсивности напряжений K_I в механике трещин и используется для описания напряженно-деформированного состояния в вершине V-образного выреза. Для его вычисления при конкретной форме места перехода сварного соединения с угловым швом может использоваться численный метод граничных коллокаций (глава 3). Поскольку размерность $C_{1\alpha}$ меняется от угла к углу α , непосредственное сравнение напряженно-деформированных состояний в местах перехода по этому критерию можно вести только для форм сварных соединений с равными углами перехода α . При наличии соединений с различными углами α сравнение их может осуществляться по формулам главы 2. Критерий $C_{1\alpha}$ применим при радиусе перехода $\rho \approx 0$.

Энергетическая характеристика $G_{1\text{чсл}}$ интерпретируется как интенсивность дополнительно подводимой упругой энергии к вершине трещины относительно небольшой глубины ($a/h = 0,025$ или несколько более) в месте перехода от шва к основному металлу из-за наличия определенной геометрической формы углового шва — по отношению к такой же трещине глубиной a/h в гладком образце при аналогичной схеме нагружения. Другая энергетическая характеристика $g_{1\text{экв}}$ представлена условно длиной туннельной трещины в бесконечном теле, с которой отождествляется рассматриваемая геометрическая форма места перехода и схема нагружения кон-

кретного сварного соединения с угловым швом. Отождествление подразумевает равенство $G_{I\alpha}$ соединения и интенсивности подведенной упругой энергии G_I к вершине туннельной трещины. Критерий $g_{I\alpha}$ является для каждого сочетания формы шва и схемы нагружения своего рода характеристикой. Рекомендуется для оценки принимаемых конструкторских решений.

Критерий ϵ_{σ} , как известно, является средним (номинальным) значением деформации соединения или просто образца в сечении с концентратором. В работе ϵ_{σ} применяется только как характеристика напряженно-деформированного состояния места перехода от углового шва к основному металлу (а не сварного соединения в целом). Определяется экспериментально-расчетным путем. Критерий ϵ_{σ} позволяет непосредственно сравнивать между собой только случаи с равными углами α , радиусами перехода ρ и одинаковыми толщинами h соединений. Когда α , ρ и h разные, то сравнение полей напряжений и деформаций может осуществляться путем анализа напряженно-деформированных состояний, полученных из решений специальных задач.

Деформационная характеристика $V_{I\alpha}$ получена на основании положений теории упругости и по существу является произведением максимальных деформаций в концентраторе $\epsilon_{\theta}^{\max}$ на некоторую функцию, зависящую от радиуса ρ и угла α .

$$V_{I\alpha} = \frac{2\sqrt{2} \epsilon_{\theta}^{\max}}{\left(\frac{\rho}{2}\right)^{\lambda_1 - 1} \lambda_1 [2 + (\lambda_1 - 1)(1 - f_1(\alpha)) + 4\lambda_1]} \quad (8)$$

Связь $V_{I\alpha}$ с критерием $C_{I\alpha}$ следующая

$$C_{I\alpha} = \lim_{\rho \rightarrow 0} \frac{V_{I\alpha} E}{2\sqrt{2}} \quad (9)$$

Формально структура $V_{I\alpha}$ сохранена той же для оценки концентраторов на упруго-пластической стадии работы соединения. Критерий $V_{I\alpha}$ имеет для каждого угла α свою размерность $(M^{1-\lambda_1})$. Это приводит к той же особенности его использования, что и критерия $C_{I\alpha}$. А именно, по критерию $V_{I\alpha}$ можно сравнивать между собой напряженно-деформированные состояния концентраторов в различных сварных соединениях с угловыми швами при различных схемах нагружения, с различными $\rho \rightarrow 0$, но только при наличии у них равных углов α . Сравнение концентраторов соединений с различными углами α может осуществляться из непосредственного анализа напряженно-деформированных состояний,

полученных из решения специальных задач. Как показывают численные решения МКЭ для исследуемых соединений с угловыми швами на фоне интенсивно развивающихся упруго-пластических деформаций $\xi_{\theta}^{\max}$ радиус ρ меняется намного менее заметно. Поэтому можно считать, что критерий $V_{I\alpha}$ с точностью до приблизительно-ного постоянного множителя, имеющего размерность, является просто $\xi_{\theta}^{\max}$, т.е. деформацией в вершине выреза, которая в основном ответственна за поведение прилегающей зоны. В предельном случае критерий $(V_{I\alpha})_{\rho}$ характеризует сопротивляемость разрушению места перехода от углового шва к основному металлу.

Другим критерием сопротивляемости разрушению указанного места при упруго-пластической работе сварных соединений может являться энергетический критерий $(G_{I\psi\alpha}^{yb})_{\rho}$. Это по сути упомянутый критерий $(G_{I\psi\alpha})_{\rho}$, но так как в данном случае имеет место не упругая, а упруго-пластическая стадия работы соединения, то этот критерий подсчитывается для увеличенной условной модели того же соединения, в которой условие линейной механики разрушения $\sigma_{cp} < \sigma_T$ выполняется. При этом используется принцип автономии (глава 4). Например, считая, что предельное напряженно-деформированное состояние в концентраторе реального соединения с угловым швом будет таким же предельным и для увеличенного варианта того же соединения и исходя из экспериментальной величины $(\xi_{\delta})_{\rho}$ на реальном соединении можно определить критическое $(G_{I\psi\alpha}^{yb})_{\rho}$, характеризующее сопротивляемость разрушению места перехода от шва к основному металлу.

Необходимо отметить, что критерии ξ_{cp} , $V_{I\alpha}$, характеризующие упруго-пластическую стадию работы соединений, при конкретном использовании требуют предварительного решения определенных упруго-пластических задач.

Примечание. Стыковые сварные соединения при наличии усиления тоже могут характеризоваться указанными в данной главе критериями

Глава 6. Изготовление сварных образцов, термодформационное
воздействие и методика испытаний

Форма сварных образцов с угловыми швами отражает тавровый вид соединений, которые имеют место в металлоконструкции реактора РБМ-К. Коррективы в форму внесены в связи с особенностями метода испытаний – статического изгиба по схеме равных деформаций. Изготовлены сварные образцы из прокатных листов стали 10ХСНД и имеют натуральную толщину 40 мм. Способ сварки – полуавтоматический, в смеси газов $A_2 + O_2$ (5%). В местах перехода от наплавлен-

ного металла к основному нанесены надрезы глубиной 1,0 мм, шириной 0,2 мм электроэрозионным способом с целью имитации практически неконтролируемых подрезов, наплывов при сварке, волосовин в прокате и пр. Для целей прогнозирования состояния сварных соединений с угловыми швами в процессе эксплуатации осуществлено термомеханическое воздействие на образцы в специальных печах при температуре 653 ± 5 К ($380 \pm 5^\circ\text{C}$) и максимальных начальных напряжениях от изгиба $\sigma_{\text{ср}} = 300$ МПа с различными сроками выдержки по времени (исходное состояние; 1,5; 4,0 и 8,0 месяцев).

Методика испытаний сварных образцов заключалась в нагружении их в местах перехода от шва к основному металлу путем статического изгиба по схеме равных деформаций (рис. 3). При испытании записывается диаграмма $\epsilon_s - P$ вплоть до полного разрушения с фиксированием в процессе испытаний визуальным наблюдением момента появления макротрещины в месте перехода. Специально подготовленные и обработанные ножки тензодатчика упруго заведены и упираются под самые основания боковых сторон круглых металлических стержней диаметром 0,8 мм, длиной 4,0 мм, которые привариваются конденсаторной сваркой на расстоянии 10 мм друг от друга на тыльной стороне образца в районе опасного сечения.

Глава 7. Испытания сварных соединений для определения критериев разрушения, предложенных в работе

В отличие от экспериментальных исследований других авторов со сварными соединениями из стали 10ХСНД толщиной 40 мм, в которых создавались значительные трещиноподобные дефекты, в данной работе внимание сосредоточено на начальных моментах появления трещин в месте перехода от углового шва к основному металлу. Путем термомеханического воздействия на сварные соединения учтено не только влияние температуры эксплуатации, но и действие рабочих напряжений. На рис. 4 показаны усредненные диаграммы испытаний $\epsilon_s - P$ сварных образцов с угловыми швами для временных точек термомеханического воздействия: исходное состояние; 1,5; 4,0 и 8,0 месяцев (в каждой точке по 4 образца). Полученная информация показала, что основные изменения по пластичности и разрушающим нагрузкам произошли за 1,5 месяца термомеханического воздействия. Основное влияние на пластические свойства сварных соединений за это время — термическое. На увеличение разрушающей нагрузки присутствие рабочих напряжений

практически не сказалось. После 1,5 месяцев наблюдается заметное уменьшение скорости изменения разрушающих нагрузок и пластических свойств соединений. Моменты появления макротрещины в месте перехода и полного разрушения соединения все более сближаются, поскольку сварные соединения уменьшают пластические свойства. Процесс разрушения происходил, однако, при $\sigma_{ср} > \sigma_T$, поэтому из числа предложенных использовались деформационные критерии

$\epsilon_{ср.р}$, $(V_{I_{120}})_p$. Графические зависимости $\epsilon_{ср.р}$ и $(V_{I_{120}})_p$ от времени термдеформационного воздействия (рис.5) имеют характер асимптотического приближения как бы к некоторому значению, мало зависящему от фактора времени.

Глава 8. Методические указания "Определение характеристики пластичности $\epsilon_{ср.р}$ сварных соединений путем статических испытаний на изгиб"

Предложена простая методика и приспособление (рис.6а) для определения характеристики $\epsilon_{ср.р}$ на упрощенных образцах с угловыми и стыковыми швами. По критическому углу загиба θ_p специальных размеров образцов подсчитывается $\epsilon_{ср.р}$ по формуле

$$\epsilon_{ср.р} \approx \theta_p / 2, \quad (10)$$

которая получена из рассмотрения некоторой идеализированной модели изгиба соединения. Геометрия предложенных для испытаний сварных образцов (рис.6б) отвечает принятой модели изгиба с учетом конструктивных особенностей приспособления. Рекомендуемые размеры для толщин h от 4 мм до 40 мм даны в таблице.

h мм	4+10	10+20	20+30	30+40
l	105	65+5,5 h	210	130+5,5 h
d	65+ h/2		130+ h/2	
B	5 h			
b	2,5 h			
R	h/2			

Методические указания внедрены во ВНИИСТе для оценки сопротивляемости разрушению мест перехода от шва к основному металлу стыковых сварных соединений трубопроводов.

Общие выводы и основные результаты работы

1. В механике разрушения отсутствуют критерии, позволяющие оценивать свойства сварных соединений в условиях естественных геометрических форм сварочных концентраторов, в частности, таких как места перехода от углового (то же стыкового) шва к основному металлу, когда радиус перехода мал или практически равен нулю.

2. Изучение упругого напряженно-деформированного состояния в местах перехода от наплавленного металла к основному для экстремальных случаев (подрезы, наплывы при сварке, волосовины в прокате и пр.) сведено в работе к анализу напряжений и перемещений в упругих телах с V -образными вырезами при радиусе перехода $\rho = 0$. Из проведенного теоретического анализа следует, что в механике разрушения для тел с V -образными вырезами могут существовать коэффициенты $C_{1\alpha}$ и $C_{2\alpha}$, аналогичные K_I и K_{II} для тел с трещинами, которые однозначно характеризуют напряженно-деформированное состояние в вершине выреза. Коэффициенты $C_{1\alpha}$ и $C_{2\alpha}$ обладают отличительной особенностью по сравнению с K_I и K_{II} — для каждого угла α они имеют свою собственную размерность, причем у $C_{1\alpha}$ и $C_{2\alpha}$ она отлична друг от друга.

Разработана программа численного определения на ЭВМ величин $C_{1\alpha}$ и $C_{2\alpha}$ для геометрической формы соединения с угловым швом (на основе метода граничных коллокаций).

3. Показано, что между коэффициентом интенсивности напряжений $C_{1\alpha}$ и коэффициентом концентрации напряжений L_σ существует аналитическая зависимость в предельной форме. В связи с этим предложен способ, который может в принципе использоваться для нахождения $C_{1\alpha}$ через L_σ для соединений с угловыми швами.

4. По аналогии с критическим значением коэффициента интенсивности напряжений K_{Ic} для оценки свойств материалов с трещинами в работе предлагается оценивать сопротивляемость разрушению мест перехода соединений с угловыми швами при радиусе перехода

$\rho \approx 0$ критическим значением коэффициента интенсивности $(C_{1\alpha})_p$ — при $\sigma_{cp} < \sigma_T$.

5. В качестве характеристики напряженно-деформированного состояния мест перехода соединений с угловыми швами при $\sigma_{cp} < \sigma_T$ разработан энергетический критерий $G_{I\alpha\sigma\alpha}$. Он может интерпретироваться как интенсивность дополнительно подведенной упру-

гой энергии к вершине трещины относительно небольшой глубины в месте перехода из-за наличия определенной геометрической формы углового шва по отношению к такой же трещине в гладком образце. Критическое значение этого критерия $(G_{I\Delta})_p$ характеризует сопротивляемость места перехода разрушению.

6. На основе понятия $G_{I\Delta}$ в работе предлагается энергетическая характеристика $\mathcal{G}_{I\Delta\kappa}$. Она может быть условно представлена длиной туннельной трещины в бесконечной растягиваемой пластине, с которой отождествляется рассматриваемая геометрическая форма концентратора и конкретная схема нагружения соединения. Рекомендуется для ориентировочной оценки мест перехода.

7. Напряженно-деформированное состояние места перехода на стадии упруго-пластического нагружения ($\sigma_{cp} \geq \sigma_T$) может оцениваться деформационными критериями ε_{cp} и $V_{I\Delta}$. Критические значения этих критериев $(\varepsilon_{cp})_p$, $(V_{I\Delta})_p$ оценивают сопротивляемость разрушению.

8. Сравнительный анализ напряжений и деформаций у вершин одинаковых V-образных вырезов, полученный методом конечного элемента, для нормальной и увеличенной моделей исследуемого соединения с угловым швом показал, что пути развития напряжений и деформаций в окрестности вершин могут совпадать при упругой работе увеличенной модели и упруго-пластической работе нормальной модели. Тем самым утверждается так называемый принцип автономии для соединений с угловыми швами.

Указанный анализ также показал, что одинаковым величинам коэффициентов интенсивности напряжений $C_{I\Delta}$ при упругой работе ($\sigma_{cp} < \sigma_T$) увеличенной модели и при упругой работе нормальной модели, а также формально для начальных моментов упруго-пластической работы ($\sigma_{cp} \geq \sigma_T$) нормальной модели, соответствуют одинаковые напряженно-деформированные состояния, несмотря на наличие в последней модели относительно выраженной зоны пластичности не только в месте перехода, но и на тыльной стороне.

9. Сварные образцы с угловыми швами, подвергнутые термомеханическому воздействию в печах при температуре 653 К (380°C) и начальных напряжениях изгиба в месте перехода 300 МПа, с различными сроками выдержки по времени (исходное состояние; 1,5; 4,0 и 8,0 месяцев) испытаны по специально разработанной методике. Она заключалась в изгибе образцов сосредоточенной силой P с одно-

временной записью диаграммы $\epsilon_s - P$ вплоть до полного разрушения с фиксированием момента появления макротрещины в месте перехода.

10. Экспериментальные данные, полученные в работе для исходного состояния; 1,5; 4,0 и 8,0 месяцев, показывают, что основные изменения по пластичности и разрушающим нагрузками произошли за первые 1,5 месяца термодформационного воздействия. Основное влияние на свойства сварных соединений на этом этапе — термическое. Сварные соединения от точки к точке (временной) уменьшают пластические свойства. Моменты появления макротрещины в месте перехода и полного разрушения соединения все более сближаются.

11. Разработаны методические указания и приспособление для испытаний образцов со стыковыми и угловыми швами с целью упрощенного определения характеристики пластичности $\epsilon_{ср.р}$.

Методические указания и приспособление внедрены во ВНИИСТе для оценки сопротивляемости сварных стыковых соединений труб разрушению в местах перехода от шва к основному металлу.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Винокуров В.А., Куркин А.С., Овчаренко Ю.Н. Критерии оценки статической прочности и пластичности сварных соединений с угловыми швами. — В кн.: Прочность сварных конструкций и требования контроля. Труды МВТУ им. Н.Э.Баумана . — М.: МВТУ им.Н.Э.Баумана, 1980, № 337, с.35–49.
2. Винокуров В.А., Овчаренко Ю.Н., Куркин А.С. Оценка статической прочности и пластичности сварных соединений с угловыми швами. Тезисы докладов Юбилейной У Всесоюзной межвузовской научно-технической конференции, посвященной 150-летию МВТУ им.Н.Э.Баумана 4–6 декабря 1979 г. — М.: МВТУ им.Н.Э.Баумана, 1979, с.2–4.
3. Овчаренко Ю.Н., Винокуров В.А. Оценка геометрии угловых и стыковых швов. — Известия вузов. Машиностроение, 1979, № 4, с.129–131.
4. Овчаренко Ю.Н. V-образные вырезы в линейной механике разрушения. — М., 1977. — 16 с. — Рукопись представлена МВТУ им.Н.Э.Баумана. Деп. в ВНИИТИ 29 ноября 1977, № 4359–77.
5. Vinokurov V.A., Ovcharenko J.N. Criteria of welded joints resistance to fracture. — In: Practical applications of fracture mechanics to the prevention of failure of welded structures. — Bratislava: International Institute of welding Annual Assembly, 1979, p. 121–128.

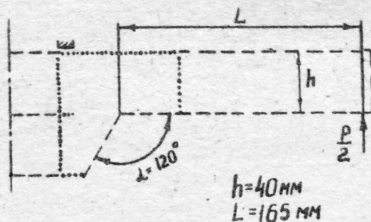


Рис.1. Модель соединения по МГК

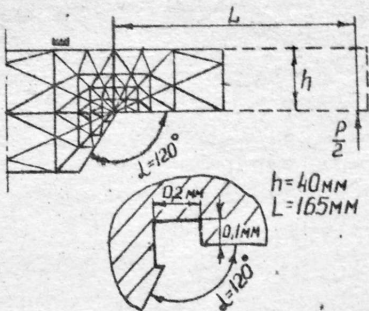


Рис.2. Модель соединения по МКО

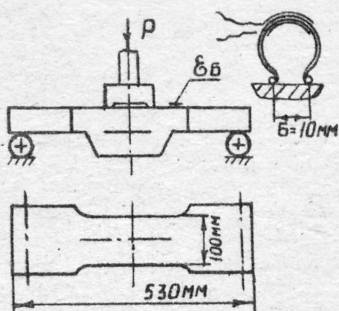


Рис.3. Схема испытания сварного образца

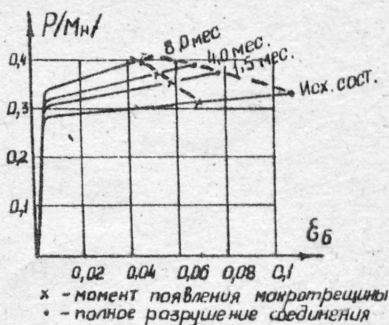


Рис.4. Диаграммы испытаний

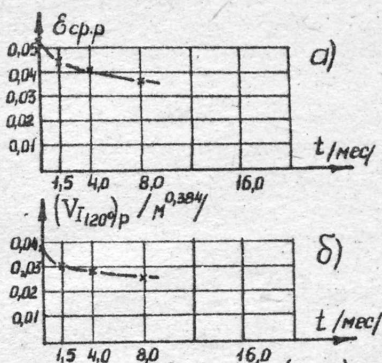


Рис.5. Критерии $\epsilon_{ср.р.}$ и $(V_{120^\circ})_p$ в зависимости от времени термомеханического воздействия.

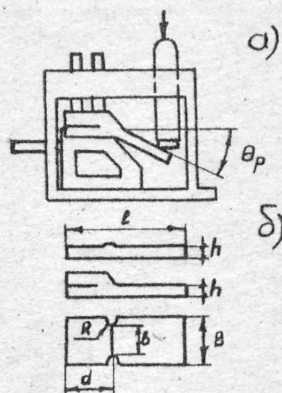


Рис.6. Определение $\epsilon_{ср.р.}$ по критическому углу загиба