М316637

НА ДОМ
Е ВЫДАЕТС

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
С С С Р

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

На правах рукописи

УТКИН Юрий Григорьевич

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ИСПЫТАНИЙ ШВОВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С НЕПРОВАРОМ СТАЛЕЙ СРЕДНЕЙ И НИЗКОЙ ПРОЧНОСТИ

(05.04.05 - Технология и машины сварочного производства)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 1977

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

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

На правах рукописи

УТКИН Юрий Григорьевич

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ИСПЫТАНИЙ ШВОВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С НЕПРОВАРОМ СТАЛЕЙ СРЕДНЕЙ И НИЗКОЙ ПРОЧНОСТИ

(05.04.05 – Технология и машины сварочного производства)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

МЭ16637

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана
1316637
Уткин Ю.Г. Разработка мето

Москва 1977

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

Научный руководитель – д.т.н., профессор ВИНОКУРОВ В.А.

Официальные оппоненты: д.т.н., доцент МАКАРОВ Э.Л.

к.т.н., ст.н.с. ПРОХОРОВ Н.Н.

Ведущее предприятие указано в решении Ученого Совета.

Защита диссертации состоится "15 " сентября 1977 г. на заседании специализированного Совета К053.15.03 по технологии и машинам сварочного производства Московского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшего технического училища имени Н.Э.Баумана по адресу: Москва, 107005, 2-я Бауманская ул., д.5.

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Училища.

Автореферат разослан " " 1977 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО СОВЕТА
д.т.н., доцент

ЯМПОЛЬСКИЙ В.М.

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ

МВТУ
им. Н. Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Одним из опасных концентраторов напряжений в сварных швах является непровар.

Актуальность проблемы. В настоящее время отсутствуют разработанные для практического применения способы определения характеристик пластичности сварных швов с непроваром сталей средней и низкой прочности. В то же время такие характеристики, определяемые в момент разрушения, необходимы, наряду с характеристиками прочности, для объективной оценки работоспособности сварных соединений. В особенности это существенно при работе сварных соединений в области низких температур и в случае высокой чувствительности металла к концентрации напряжений.

Целью данной работы явилось создание экспериментально-расчетного метода определения величины критического коэффициента интенсивности деформаций для сварных соединений с непроваром сталей средней и низкой прочности на базе экспериментальных и расчетных разработок, выполненных на моделях сварных соединений с концентраторами, имитирующими непровар, а также на образцах сварных соединений с натуральным непроваром из сталей средней и низкой прочности.

Методы исследования, использовавшиеся в данной работе, включали экспериментальные методы измерения деформаций на малых базах для определения средней деформации в ослабленном сечении и величины коэффициента интенсивности деформаций. Для этих же целей широко применялись методы тензометрирования при регистрации нагрузок и перемещений на шлейфовом осциллографе. При определении упругих характеристик образцов с концентраторами использовались индуктивные датчики. Для оценки кинетики упруго-пластического деформирования образцов балочного типа использовались методы теории упругости (аппарат механики разрушения и теория концентрации напряжений). Аналитическое решение об изгибе кривого бруса за пределами упругости выполнено методами теории упруго-пластических деформаций; численная реализация проводилась с использованием ЭВМ "Минск-22".

Научная новизна работы заключается в экспериментальном и расчетном обосновании способа определения характеристики разрушения – критического коэффициента интенсивности деформаций

V_{Ic} на образцах с острыми и глубокими концентраторами типа непровара для сталей средней и низкой прочности и их сварных соединений с непроваром; в установлении закономерностей поведения указанных образцов при упругом и упруго-пластическом деформировании, позволивших обосновать способ определения V_{Ic} путем нахождения связи между текущими значениями коэффициента V и раскрытия δ на ранних стадиях деформирования и использования этой связи для определения V_{Ic} по критическому раскрытию δ_c ; в получении аналитического решения для кривого бруса с целью качественной оценки кинетики упруго-пластического деформирования балочных образцов с концентраторами.

Практическая ценность работы заключается в разработке способа определения V_{Ic} .

Разработан руководящий материал в виде инструкции по проведению испытаний сварных соединений с непроваром для определения критического коэффициента интенсивности деформаций V_{Ic}.

Апробация разработанного способа испытания, а также оборудования и оснастки для испытаний, проведена на образцах с глубокими и острыми надрезами, имитирующими непровар, из стали Ст.3, а также на образцах с натуральными сварочными непроварами из сталей 10ХСНД, 09Г2С и Ст.3 при различных температурах при ударном и статическом нагружении. Основные положения работы доложены на научном семинаре кафедры "Машины и автоматизация сварочных процессов" МВТУ имени Н.Э.Баумана.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов и приложения-инструкции. Выполнена на 150 машинописных страницах, содержит 66 рисунков, 2 таблицы и 129 наименований литературных источников.

В главе I освещены состояние изучаемого вопроса и постановка задач исследования. Изучение проблемы разрушения металлоконструкций, выполненных из сталей средней и низкой прочности (низкоуглеродистые и низколегированные стали) с применением сварки, показало, что имеется большое число конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов, влияющих на переход конструкции к критическому состоянию.

Одним из опасных дефектов сварки в шве является непровар. Помимо того, что он является концентратором напряжений, металл

вблизи вершины непровара претерпевает значительные изменения под действием термопластического цикла сварки, которые приводят, как правило, к исчерпанию пластических свойств в небольшой области, прилегающей к непровару.

В последние годы широкое распространение получила механика разрушения, разрабатывающая методы определения характеристик разрушения на образцах с трещинами. Наибольшее распространение получил силовой критерий механики разрушения – критический коэффициент интенсивности напряжений K_c. В случае плоской деформации при нормальном отрыве – K_{Ic}.

Сварной стыковой шов с непроваром, со снятым усилением, имеет такую геометрическую форму, которую обычно рекомендуют для определения K_{Ic}. Однако использование непровара взамен трещины с целью определения K_{Ic} невозможно по следующим причинам: I. Острота и ориентация конца непровара могут изменяться по длине шва от форм, свойственных обычной усталостной трещине, до закруглений с конечным радиусом или небольшим ответвлением трещины в сторону; непровар может изменяться также и по глубине. 2. Средние разрушающие напряжения $\sigma_{ср.р.}$ при испытании швов натурального размера с непроваром сталей средней и низкой прочности обычно превосходят 0,8 $\sigma_т$ ($\sigma_т$ – предел текучести). С другой стороны, создание искусственных образцов большего размера с усталостной трещиной с целью достоверного определения K_{Ic} устраняет многие специфические особенности, возникающие вблизи конца непровара: I. Определенный для данного калибра шва термодеформационный цикл сварки. 2. Возможные последствия старения. 3. Особенности геометрической формы концентратора в виде непровара и др.

Возможно использование критического раскрытия дна непровара δ_c, однако δ_c в отличие от K_{Ic} не позволяет производить количественную расчетную оценку работоспособности конструкции.

С целью учета специфики формы сварных соединений (радиусы концентраторов и углы их раскрытия зачастую отличны от нуля) на кафедре сварки МВТУ им. Н.Э.Баумана было предложено оценивать сопротивляемость элементов сварных конструкций с помощью критического коэффициента интенсивности деформаций V_c (в слу-

чае плоской деформации и нормального отрыва - V_{1c}), определяемого в момент разрушения, и величины средней упруго-пластической деформации в сечении с концентратором, предшествующей разрушению - $\varepsilon_{cp.p.}$.

$$V_c = \varepsilon_{cp.p.} \alpha_\varepsilon \sqrt{\rho} = \varepsilon_{max} \sqrt{\rho} \ [мм^{1/2}]; \qquad (I)$$

(α_ε - коэффициент концентрации деформаций; $\varepsilon_{max} = \varepsilon_{cp.p.} \alpha_\varepsilon$ - максимальная деформация в концентраторе в момент разрушения; ρ - радиус концентратора в мм.).

Величина V_c комплексно оценивает свойства металла в зоне концентратора и его остроту, а величина $\varepsilon_{cp.p.}$ оценивает состояние всего ослабленного концентратором сечения в целом.

Комплекс $\alpha_\varepsilon \sqrt{\rho}$ слабо зависит от ρ , что удобно в случае оценки сварных соединений, где можно говорить лишь о некоторой примерной величине радиуса для определенного типа сварных соединений. Для непровара предлагается использовать величину $\rho = 0{,}1$ мм.

Непосредственную регистрацию величины ε_{max} в настоящее время осуществить, по-видимому, невозможно. Поэтому ее регистрируют косвенным образом с использованием деформации на так называемой характерной базе $\varepsilon_б$, величины коэффициента $k = \varepsilon_{cp}/\varepsilon_б$, найденного при упругом нагружении, а также коэффициента концентрации деформаций α_ε .

$$\varepsilon_{max} = \varepsilon_б \, k \, \alpha_\varepsilon \qquad (2)$$

В случае концентраторов в виде трещин коэффициенты интенсивности деформаций и напряжений связаны между собой следующей зависимостью, включающей в себя модуль упругости E :

$$V = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{K}{E} \qquad (3)$$

Для достижения намеченной цели работы, сформулированной выше, необходимо было решить следующие задачи: I) выбрать и опробовать пути определения V_{1c} на образцах сварных соединений с непроваром сталей средней и низкой прочности на основе экспериментального анализа напряженно-деформированного состояния и расчетного анализа на модели кривого бруса, дающего качественную картину развития упруго-пластических деформаций в образце с концентратором; 2) обосновать рациональную форму и размеры образцов для испытаний и схему нагружения; 3) разработать методические приемы проведения испытаний и необходимую оснастку; 4) экспериментально определить свойства наплавлен-

ного металла стыковых сварных соединений с непроваром некоторых марок сталей; 5) разработать инструкцию по определению критического коэффициента интенсивности деформаций для стыковых сварных соединений.

В главе 2 изложена сущность разрабатываемого способа определения коэффициента интенсивности деформаций по раскрытию δ. Если средние напряжения в момент разрушения превышают предел текучести, то разрушающая сила не может служить исходной величиной для определения V_{Ic}. Принципиально определение V_{Ic} в этом случае может быть выполнено либо на основе разработки математического аппарата, использующего положения теории пластичности, либо путем регистрации деформаций и перемещений в области концентратора с тем, чтобы по ним можно было определить V_{Ic}. Второй путь по сути заключается в косвенной регистрации ε_{max}. Нами ε_{max} регистрировалась по величине $\varepsilon_б$, а также по величине раскрытия напротив дна концентратора δ. При этом использовались следующие положения:

I. За критическое состояние принимается такое, когда ε_{max}, а, следовательно, и напряжение σ_{max} у концентратора достигают разрушающего уровня; при этом приближенно принимается, что это состояние достигается при максимуме нагрузки на образец.

2. Как будет показано в главе 4, зависимости между нагрузкой и величиной раскрытия, а также нагрузкой и величиной деформации $\varepsilon_б$ - линейны в пределах пока $\sigma_{ср} < \sigma_т$ несмотря на рост зоны пластических деформаций у концентратора. Это означает, что зависимости V-δ и V-$\varepsilon_б$ в этих условиях также линейны.

3. Принимается, что коэффициент пропорциональности между величинами V и δ или V и $\varepsilon_б$ сохраняет постоянное значение как в области линейной зависимости, когда $\sigma_{ср.} < \sigma_т$, так и в области, где $\sigma_{ср} > \sigma_т$. С использованием этих соображений на кафедре сварки МВТУ им. Н.Э.Баумана предложен следующий способ определения V_{Ic}. На линейном участке зависимости "нагрузка-раскрытие" ("напряжение - раскрытие"), пользуясь имеющимися в механике разрушения формулами для соответствующих типов образцов и схем нагружения, определять величину текущего значения коэффициента интенсивности напряжений $K_{I\,лин}$

по величине нагрузки; по формуле (3) пересчитать это значение в величину $V_{I\,лин}$. Находить коэффициент пропорциональности $Д_{лин} = V_{I\,лин} / \delta_{лин}$ ($\delta_{лин}$ – величина раскрытия на линейном участке диаграммы "нагрузка-раскрытие"). Считая $Д_{лин}$ единым на всем периоде нагружения и регистрируя δ_c в момент максимума нагрузки, определять V_{Ic} как

$$V_{Ic} = Д_{лин}\,\delta_c \qquad (4)$$

В работе, таким образом, определение V_{Ic} производилось и по формуле (I) с использованием (2), и по формуле (4).

В результате анализа возможных схем нагружения была выбрана схема изгиба образцов с одним или двумя односторонними концентраторами, причем во 2-м случае применялся процесс саморегулирования с использованием широкого пуансона для поддержания равных деформаций в обоих сечениях образца /I/. Схема изгиба требует меньших мощностей испытательного оборудования. Для испытаний по этой схеме было спроектировано специальное приспособление, позволяющее проводить испытания в условиях нормальных и низких температур при ударном и статическом нагружении как образцов с одним концентратором, так и с двумя. Применительно к образцам с непроваром было проведено опробование процесса саморегулирования на образцах с надрезом и были выяснены некоторые методические вопросы /I/.

Определены оптимальные размеры образцов для испытаний /2/. Должны испытываться образцы с натуральным сварочным непроваром с $h/H = 0{,}5$ (H – общая высота образца; h – величина непроваренной части сечения). Толщина образцов "$в$" во всех случаях должна быть не менее $2{,}5\,h$ для обеспечения плоской деформации в концентраторе, что было установлено при изучении деформированного состояния с тыльной стороны образца. Для выбранного типа образца при упругом нагружении был определен коэффициент $k = \varepsilon_{ср} / \varepsilon_б$ из формулы (2), который оказался независимым от h и равным I,3 /2/.

<u>В главе 3</u> приводится решение задачи об упруго-пластическом изгибе кривого бруса с целью качественной оценки кинетики развития упруго-пластических деформаций в образцах балочного типа при изгибе. Решение задач о деформированном состоянии образцов балочного типа является сложным и может служить предметом отдельного исследования. В ряде случае целесообразно про-

водить анализ на моделях, позволяющих получать аналитические решения. В качестве такой модели был выбран кривой брус, нагруженный моментом, внутренний радиус которого мал по сравнению с внешним. Задача решалась для случая плоской деформации, в полярных координатах. При этом использовалась диаграмма материала без упрочнения. Известные решения этой задачи, основанные на гипотезе ненадавливания волокон, не могли удовлетворить нас из-за своей приближенности.

При анализе задачи было выявлено, что деформация бруса имеет 4 этапа: чисто упругий, упруго-пластический с одной зоной пластичности, упруго-пластический с двумя зонами пластичности и пластический шарнир. Решение проводили до появления пластического шарнира. При этом с использованием упругого решения в виде функции напряжений Эри, условия пластичности Губера-Мизеса, а также краевых и граничных условий получили аналитические выражения для текущих состояний деформирования как для случая одной зоны пластичности, так для случая двух зон. В условиях непрерывного изменения размеров бруса при деформации далее решение проводили в приращениях с определением на каждом шаге новых размеров бруса и приращений деформаций и перемещений за каждый шаг. В результате получали непрерывную зависимость момента M, угла взаимного поворота концевых сечений 2φ, деформаций на внутреннем ε_a и наружном ε_b радиусах бруса, а также размеров первой пластической зоны P_I на внутренней поверхности и второй P_{II} на наружной.

Из упругого решения определялись также упругие характеристики $\alpha_\varepsilon = \varepsilon_a / \varepsilon_{cp}$ и $k = \varepsilon_{cp} / \varepsilon_b$; численное решение проводили для постоянного внутреннего радиуса бруса a_o =0,1мм. Наружный радиус варьировался и составлял b_o = 10,20,40,60 и 80 мм. Расчет проводили на ЭВМ "Минск-22". Для этого был разработан алгоритм и составлена программа. В результате решения было выяснено, что в условиях деформирования с одной зоной пластичности зависимость $M - \varphi$ - линейна. φ в данном случае является, по сути дела, величиной эквивалентной условному раскрытию δ, определяемому напротив дна надреза в образцах балочного типа. Эта величина может служить, также как и δ, связующим звеном между упругой и пластической стадиями при определении характеристик разрушения по способу, изложенному

в главе 2.

Величина деформации $\varepsilon_a = \varepsilon_{max}$ существенно зависит от положения точки поворота двух половин образца относительно друг друга, которое изменяется. Как показано в гл.4, при деформировании образцов балочного типа также происходит изменение положения точки поворота, но оно стабилизируется уже на ранних стадиях деформации, что обеспечивает возможность определения величины $D_{лин}$ и ее использование для вычисления V_{Ic}.

Моменту появления пластической деформации $\varepsilon_в$ с наружной стороны кривого бруса соответствует малый относительный размер зоны пластических деформаций у концентратора P_1/B_o. В рассматриваемых случаях он изменяется от 0,0262 для B_o = 80 мм до 0,064 для B_o = 10 мм.

Определены упругие характеристики бруса. Величина $k = \frac{\varepsilon_{сж}}{\varepsilon_в}$ не зависит от величины B_o и составляет 2,15, что качественно согласуется с экспериментальными данными для образцов балочного типа (глава 2).

В главе 4 представлены методика и результаты испытаний образцов с острыми надрезами, имитирующими непровар. Отработка методики испытаний с целью определения V_{Ic} проводилась на образцах из стали Ст.3 с острыми и глубокими надрезами (h/H = =0,5), ширина окончания которых составляла 0,25 мм, что соответствует радиусу надреза r = 0,125 мм. Испытывались образцы двух партий из одного и того же металла: с двумя надрезами с использованием процесса саморегулирования и с одним надрезом с использованием непрерывной записи характеристик разрушения на ленту осциллографа. Величины перемычек h варьировались в первой партии образцов от 12 до 35 мм, во второй - от 8 до 27 мм. Размеры образцов соответствовали оптимальным, определенным в гл.2.

Величину коэффициента интенсивности деформаций V_{Ic} на образцах с двумя надрезами определяли по формуле (1) с использованием (2).

Величина коэффициента k была определена ранее и принималась в расчетах равной 1,3; радиус концентратора принимался 0,125 мм; α_ε вычислялся по номограммам Нейбера.

Величину $\varepsilon_б$ определяли с использованием переоборудованного прибора ПМТ-3. Для этого с тыльной стороны образцов над концентраторами наносились базы величиной 1 мм, измеряемые с

точностью 0,001 мм до нагружения и на неразрушившемся образце после испытания. Разность отсчетов позволяет определять $\varepsilon_б$. На этих же образцах с двух боковых граней на двух уровнях по высоте сверлились базы для съемного деформометра.

Измеряя перемещения на двух уровнях, определяли величину критического раскрытия δ_c и положение точки поворота двух половин образца относительно друг друга, а также угол поворота этих половин.

Образцы второй серии испытывали по схеме чистого изгиба с записью перемещений на двух уровнях по высоте образца и нагрузки, что позволяло проследить изменение положения точки поворота, нагрузки и угла в зависимости от величины "δ", измеряемой напротив дна надреза через специальные кронштейны с шариками для установки датчиков перемещений в виде упругих элементов. Величину V_{Ic} при этом определяли через раскрытие "δ" по формуле (4). Эксперименты показали, что зависимость между напряжением и условным раскрытием напротив дна надреза линейна, пока среднее напряжение в сечении с концентратором меньше предела текучести $\sigma_т$, причем линейность наблюдается уже на ранних стадиях упруго-пластического деформирования за счет стабилизации точки поворота двух половин образца относительно друг друга. Линейной оказалось и зависимость между углом θ взаимного поворота двух половин образца и величиной δ на всем периоде нагружения, что дает основание считать, как уже указывалось по результатам решения задачи, угол θ хорошим связующим звеном между линейной стадией деформирования и пластической при определении V_{Ic}.

Определение коэффициентов двумя способами по формуле (I) с использованием $\varepsilon_б$ и по формуле (4) с использованием δ показало, что последние примерно вдвое меньше, чем первые, что может быть объяснено уменьшением коэффициента концентрации деформаций α_ε при упруго-пластическом деформировании по сравнению с упругим.

На образцах с острыми и глубокими концентраторами при изгибе целесообразно определять величину V_{Ic} через раскрытие "δ" или угол "θ", т.к. при этом отпадает необходимость в точном определении коэффициента концентрации деформаций.

Проведенные испытания показали, что уровень δ_c, а также координаты точки поворота c/h в момент разрушения у партий образцов с одним и двумя надрезами совпадают. Величина $\varepsilon_{бр}$ обратно пропорциональна $\sqrt{h}$; зависимость $\varepsilon_б - \theta$ близка к линейной.

Опыты, проведенные при упругом нагружении, показали, что упругая составляющая перемещения напротив дна надреза $\delta_{упр}$ сначала возрастает с удалением точки прикрепления кронштейнов для измерения перемещений от оси концентратора (увеличение x_i/h_i), а затем стабилизируется. Относительная координата точки стабилизации (x_i/h_i стаб.) пропорциональна $\sqrt{h}$; абсолютная величина упругих перемещений $\delta_{упр}$ увеличивается с увеличением h в $\sqrt{h}$ при одном и том же уровне V_I.

Поэтому при испытании партии образцов разного размера h целесообразно выбирать в качестве относительной координаты прикрепления кронштейнов минимально возможную (порядка 0,2), обеспечивающую надежное крепление кронштейна к образцу. Коэффициент $Д_{лин}$ обозначается при этом $Д_{лин\,0,2}$.

В главе 5 изложены методика и результаты экспериментального определения свойств наплавленного металла стыковых сварных соединений с непроваром из сталей Ст.3, 10ХСНД и 09Г2С при ударном и статическом нагружении.

С использованием полученных в предыдущих главах результатов были определены величины V_{Ic} на образцах с непроваром из стали Ст.3 и 10ХСНД толщиной 30 мм, сваренных проволокой св-08 и св-10НМ соответственно, а также из стали 09Г2С (проволока СВ-08ГА) толщиной 12 мм. В первом случае определение V_{Ic} проводилось с использованием и $\varepsilon_б$, и δ_c, а во втором только через $\varepsilon_б$. Определение $\varepsilon_б$ и δ_c проводилось на образцах с двумя непроварами. Для этого наносились базы с тыльной стороны и с двух боковых граней на двух уровнях. Первые предназначались для определения $\varepsilon_б$, вторые – для определения δ_c. Измерение деформаций и перемещений производилось на переоборудованном приборе ПМТ-3.

Разрушение образцов с двумя непроварами проводилось в приспособлении при ударном и статическом нагружении в условиях различных температур с использованием процесса саморегули-

рования.

Влияние температуры и скорости нагружения решающим образом передается не через $Д_{лин\ 0,2}$, а через δ_c. Поэтому коэффициент $Д_{лин\ 0,2}$ для определения V_{Ic} по величине δ определяли при статическом нагружении и нормальной температуре. Для этого образцы из стали Ст.3 и 10ХСНД с одним непроваром испытывались с непрерывной записью с использованием той же регистрирующей аппаратуры, что и при испытании образцов с надрезами. Для каждой марки стали испытывалось по 3 образца. Этот коэффициент использовался при всех температурах при ударном и статическом нагружении.

Как и при испытании образцов с надрезами критический коэффициент интенсивности деформаций V_{Ic}, определенный по величине δ_c, оказался примерно вдвое меньше, чем определенный по $\varepsilon_б$. С понижением температуры величина V_{Ic} уменьшается во всех случаях. При одних и тех же температурах и для одних и тех же образцов величина V_{Ic} выше при статическом, чем при ударном нагружении. При прочих равных условиях величина V_{Ic} выше у образцов из стали 10ХСНД, сваренных проволокой св-10НМ, чем из стали 3, сваренных проволокой св-08. Результаты могут быть использованы при расчетном определении запасов пластичности сварных соединений.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Для объективной оценки свойств металла шва сварных соединений с непроваром необходимо использовать предельное состояние разрушения. При этом для оценки свойств металла в корне непровара целесообразно использовать критический коэффициент интенсивности деформаций, а для оценки работоспособности всего сечения с непроваром – наряду с $\delta_{ср.р.}$ также и среднюю упруго-пластическую деформацию в этом сечении, предшествующую разрушению.

2. При использовании изгибной схемы нагружения, требующей меньших разрушающих нагрузок, целесообразно проводить испытания образцов с односторонними глубокими непроварами, глубина которых составляет примерно половину высоты образца. При этом имеется возможность корректного фиксирования предельного состояния

разрушения как в случае применения процесса саморегулирования, когда испытываются образцы с двумя непроварами, так и в случае непрерывной регистрации характеристик при испытании образцов с одним непроваром. В последнем случае за момент разрушения следует принимать максимум нагрузки.

3. При испытании образцов с непроваром с целью получения критического коэффициента интенсивности деформаций целесообразно использовать размеры образцов, обеспечивающих наличие участка плоской деформации у концентратора. Специальные эксперименты по изучению деформированного состояния с тыльной стороны изгибаемых образцов с односторонними острыми надрезами, имитирующими непровар, показали, что условия близкие к плоской деформации будут выполняться, если длина шва с непроваром (толщина образца) будет составлять 2,5 размера непрорезанной части сечения h или более; эти эксперименты позволили рекомендовать формулы для определения величины пролета l, длины L образца, а также расстояния "c" между двумя концентраторами.

4. Решение упруго-пластической задачи на модели кривого бруса с целью качественной оценки развития деформаций и перемещений в образцах с концентратором показало, что зависимость $M - \varphi$ на участке с одной зоной пластичности линейна, что указывает на возможность использования угла φ в качестве связующего звена между упруго-пластической и пластической стадиями деформирования при определении характеристик разрушения. Нелинейность деформации ε_a от φ объясняется изменением положения точки поворота двух половин образца относительно друг друга на всем периоде деформирования с одной зоной пластичности. Определенная расчетом величина упругого коэффициента $k = \varepsilon_{cp}/\varepsilon_B$ составила для кривого бруса 2,I5 независимо от характерного размера h, что качественно согласуется с экспериментальными данными по определению k на образцах балочного типа, где эта величина составила I,3 также независимо от h.

5. Эксперименты, проведенные с непрерывной записью процесса разрушения образцов с надрезом при изгибе, показали, что зависимость между напряжением и условным раскрытием напротив дна надреза в пределах $\sigma_{cp} < \sigma_T$ линейна, причем линейность эта наблюдается уже на ранних стадиях упруго-пласти-

ческого деформирования за счет стабилизации точки поворота двух половин образца относительно друг друга. Это позволяет находить величину критического коэффициента интенсивности деформаций по критическому раскрытию с использованием коэффициента $D_{лин} = V_{лин} / \delta_{лин}$, связывающего величины V и δ на линейном участке деформирования.

6. Линейная зависимость между углом взаимного поворота двух половин образца с односторонним надрезом и величиной нагрузки, в пределах $\sigma_{ср} < \sigma_т$, а также линейная зависимость между этим углом и величиной "δ" на всем периоде нагружения, указывает на возможность применения в качестве связующего звена между упруго-пластической и пластической стадиями деформирования не только величины условного раскрытия, но также и величины угла, что может быть использовано при определении критического коэффициента интенсивности деформаций. Это подтверждают и результаты решения задачи (вывод 4).

7. В результате испытаний серии образцов с надрезами были определены величины критических коэффициентов интенсивности деформаций по величине средней деформации и по величине раскрытия. Количественно последние оказались примерно вдвое меньше первых. Это различие может быть объяснено уменьшением коэффициента концентрации деформаций при упруго-пластическом деформировании по сравнению с упругим. На уменьшение α_ε указывает поведение точки поворота. При упругом нагружении она остается неподвижной; коэффициент концентрации деформаций составляет $\alpha_{\varepsilon упр}$. После перехода к упруго-пластическому деформированию точка поворота из координаты (0,28–0,3) h от вершины концентратора перемещается в точку с координатой (0,35–0,4)h и занимает в дальнейшем стабильное положение, которому соответствует величина $\alpha_{\varepsilon пласт}$.

8. На образцах с острыми и глубокими односторонними концентраторами при изгибе критический коэффициент интенсивности деформаций целесообразно определять по величине "δ" или "θ", так как при этом отпадает необходимость в точном определении величины α_ε. Однако следует иметь в виду, что упругая составляющая перемещений, измеренная на уровне дна концентратора, зависит от координаты прикрепления кронштейна для установки ре-

гистрирующей аппаратуры на образец. Поэтому при испытании образцов разного размера целесообразно выбирать в качестве относительной координаты прикрепления кронштейнов (упоров) минимально возможную (порядка $x_i/h_i = 0{,}2$), обеспечивающую надежное крепление кронштейна к образцу.

9. Проведенные по разработанному способу испытания сварных соединений с непроваром из сталей Ст.3 и 10ХСНД толщиной 30 мм и из стали 09Г2С толщиной 12 мм показали, что для одних и тех же условий испытаний величина V_{Ic} выше для низколегированных сталей; для одних и тех же образцов и температур выше при статическом нагружении, чем при ударном; с уменьшением температуры испытания величина V_{Ic} уменьшается для всех испытанных партий образцов.

Разработан руководящий материал в виде инструкции по проведению испытаний сварных соединений с непроваром для определения критического коэффициента интенсивности деформаций V_{Ic}.

Содержание диссертации отражено в работах:

1. Винокуров В.А., Трегубов Г.П., Уткин Ю.Г. Метод определения характеристик пластичности сварных соединений. В сб."Работоспособность машин и конструкций в условиях низких температур. Хладостойкость материалов". Часть П. Якутск, 1974.
2. Уткин Ю.Г., Винокуров В.А., Шип В.В. Определение свойств наплавленного металла сварных соединений. "Известия вузов. Машиностроение", 1975, № 11.
3. Винокуров В.А., Шип В.В., Уткин Ю.Г., Дымшиц А.В. "Разработка метода определения свойств основного металла и металла сварных соединений низкопрочных сталей". Тезисы докладов республиканской конференции "Механизация и автоматизация сварочного производства". Могилев, 1975.

Ю.Уткин

Тип.МВТУ им.Н.Э.Баумана, тир.100 экз. зак. 1066 Л-75649
объем 1 п.л. подп к печ 10.VI 1977г