

05.02.10
А 365

На правах рукописи



Айметов Сергей Фаритович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ
СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ ИЗГИБЕ**

Специальность: 05.02.10 «Сварка, родственные процессы и технологии»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2011

Работа выполнена на кафедре «Оборудование и технология сварочного производства» Южно-Уральского государственного университета.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Шахматов Михаил Васильевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
Гончаров Александр Евгеньевич,
заведующий кафедрой «Технология и автоматизация сварочного производства» Курганского государственного университета (г. Курган)

кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Пуйко Алексей Васильевич
эксперт по техническим вопросам
ОАО «Трубодеталь» (г. Челябинск)

Ведущее предприятие – **ОАО «Челябинский механический завод»**
(г. Челябинск)

Защита диссертации состоится «01» июня 2011 г. в 14⁰⁰ часов в ауд. 201 (главный корпус) на заседании диссертационного совета Д212.298.06 при ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет».

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ГОУ ВПО «ЮУрГУ».

Автореферат разослан «25» апреля 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



И.А. Щуров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одним из важных направлений развития сварочного производства является повышение надежности сварных конструкций и совершенствование рациональных норм их проектирования. При изготовлении сварных конструкций вероятность возникновения дефектов достаточно высока. В настоящее время установлены весьма жесткие нормы на допустимые дефекты, размеры которых, зачастую, выбраны как минимально возможные. Следствием этого является значительный объем ремонтных работ по их исправлению, целесообразность которых нельзя признать всегда обоснованной. Сказанное свидетельствует о необходимости минимизации объема ремонтных работ по выборке и исправлению дефектов, незначительно влияющих на прочность соединений. В связи с этим на передний план выходят вопросы, связанные с определением диапазонов допустимых размеров дефектов на основе расчетной оценки несущей способности сварных соединений. Кроме того, исследования кафедры сварки ЧПИ (ЮУрГУ) показали возможность повышения надежности и работоспособности соединений за счет рационального проектирования геометрии сварных швов, которое также требует расчетного обоснования. Решение этих задач непосредственно связано с необходимостью создания уточненных надежных расчетных методов для оценки прочности сварных соединений с дефектами.

Большинство исследований в данном направлении выполнены для случая нагружения сварных соединений статическим растяжением. Методы и подходы, посвященные статическому изгибу соединений, в том числе и механически неоднородных, обладают рядом существенных недостатков, не позволяющих научно-обоснованно осуществлять рациональное проектирование и нормирование дефектов. В то же время, изгиб является одной из основных схем эксплуатационного нагружения конструкций, часто используется при технологических операциях, предшествующих операции сборки (гибка, правка и т.д.), применяется на стадии оценки механических свойств при испытании образцов, а также является предпочтительным на стадии определения ресурса пластичности сварных соединений и остаточного ресурса сварных конструкций. Поэтому разработка методов оценки работоспособности сварных соединений при статическом изгибе является **актуальной проблемой**.

Цель диссертации: разработка методов оценки несущей способности сварных соединений при поперечном изгибе с учетом их геометрических парамет-

ров, дефектов сварки и механической неоднородности, которые позволят осуществлять рациональное проектирование для повышения работоспособности сварных соединений и снижения (оптимизации) затрат при изготовлении сварных конструкций.

Для достижения указанной цели в настоящей работе решается ряд задач:

- разработка методов оценки прочности тавровых и нахлесточных сварных соединений при статическом поперечном изгибе в условиях вязкого разрушения, а также теоретический анализ влияния геометрических параметров соединений на их работоспособность;
- оценка трещиностойкости сварных соединений с угловыми швами, работающих при изгибе, с учетом размеров дефектов и геометрических параметров угловых швов;
- разработка метода расчета предельного сопротивления сварных соединений с угловыми швами, нагруженных изгибом, квазихрупкому разрушению;
- разработка метода оценки предельного изгибающего момента стыковых сварных соединений с мягкой прослойкой в условиях общей текучести;
- оценка влияния концентраторов (дефектов сварки) на напряженно-деформированное состояние и величину предельного изгибающего момента механически неоднородных стыковых сварных соединений.

Научная новизна работы. Впервые методом конечных элементов (МКЭ) исследовано напряженно-деформированное состояние (НДС) сварных соединений с угловыми швами при наличии непроваров в упруго-пластической стадии нагружения поперечным изгибом. Выявлены закономерности изменения положения «опасного» сечения в зависимости от геометрических параметров тавровых и нахлесточных соединений, а также способа задания изгибающей нагрузки.

В результате применения МКЭ в сочетании с методами линейной механики разрушения (ЛМР) получены зависимости, позволяющие описать напряженное состояние вблизи вершин трещиноподобных сварочных дефектов тавровых и нахлесточных соединений при нагружении поперечным изгибом в условиях хрупкого и квазихрупкого разрушений.

Для механически неоднородных стыковых сварных соединений, работающих в условиях поперечного изгиба, с использованием известных научных разработок кафедры установлены качественные и количественные закономерности изменения напряженно-деформированного состояния и величины контактного упрочнения в зависимости от степени механической неоднородности, относи-

тельных размеров мягкой прослойки, неравномерности распределения прочностных свойств по объему прослойки и размеров щелевидного дефекта.

Разработаны основы оптимального проектирования сварных соединений с непроварами, работающих в условиях изгиба, с точки зрения повышения их несущей способности.

Практическая значимость работы. Полученные уточненные методы расчетной оценки позволяют выполнять расчеты на прочность сварных соединений как на стадиях проектирования, изготовления (ремонта), так и на стадии эксплуатации в рамках мероприятий по диагностике сварных конструкций.

Результаты работы позволяют при конструктивно-технологическом проектировании выбирать рациональную форму разделки свариваемых кромок, выполнять оптимизацию геометрии сварных швов, производить подбор сварочных материалов для обеспечения равнопрочности соединений основному металлу.

Предложенные формулы позволяют осуществлять научно-обоснованное нормирование щелевидных сварочных дефектов (типа «непровар» и «подрез»).

Предложенные расчетные методики применимы для оценки механических свойств при испытании сварных образцов.

В приложении к диссертации приведены документы, подтверждающие использование полученных результатов работы на ряде предприятий промышленного комплекса.

Апробация работы.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на ежегодных научных конференциях ЮУрГУ (2007-2011 гг.); на конференции XXVI-ой российской школы по проблемам науки и технологии (2006 г., г. Миасс); на ежегодных научно-технических конференциях «Наука-Образование-Производство» НТИ (ф) ГОУ ВПО УГТУ-УПИ (2004 г., 2007 г., г. Н-Тагил).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, списка используемых литературных источников и приложений. Работа изложена на 179 страницах основного текста, содержит 73 рисунка, 11 таблиц и 5 страниц приложений. Список литературы содержит 156 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы диссертационной работы.

Первая глава. В первую очередь здесь рассмотрены основные типы сварных соединений с угловыми швами, применяемые в различных областях современной промышленности, определены наиболее распространенные схемы их нагружения статическим изгибом и выявлены наиболее неблагоприятные из них с позиции прочности. Выполнен анализ наиболее опасных сварочных дефектов с точки зрения преждевременного разрушения. Установлено, что такими являются дефекты щелевидной формы (трещиноподобные), например непровары, глубокие подрезы, несплавления, горячие и холодные трещины и т.д.

В главе рассмотрены существующие инженерные методики расчета тавровых и нахлесточных соединений с щелевидными дефектами при изгибе, а также теоретические и экспериментальные научные исследования, выполненные в данном направлении. Обзор выполнен на основе действующих отечественных и зарубежных нормативно-технических документов, работ В.А. Винокурова, С.А. Куркина, Г.А. Николаева, Л.Б. Шрона, В.И. Махненко, Ю.Н. Овчаренко и других. Практически все рассмотренные инженерные методики разработаны для соединений с равнокатетными швами и, зачастую, не учитывают реальное положение очага пластического течения. Чаще всего за расчетное принимается минимальное сечение углового шва, что не всегда оправдано. Большинство из рассмотренных научных исследований носят либо экспериментально-рекомендательный характер, либо требуют дополнительной проработки вопроса.

Отдельное внимание в главе уделено прочности механически неоднородных стыковых сварных соединений при изгибе. Рассмотрены условия появления и виды механической неоднородности, а также выполнен обзор основных теоретических и экспериментальных представлений о работоспособности данных соединений с дефектами и без дефектов. В рамках обзора были проанализированы работы О.А. Бакши, Р.З. Шрона, Б.Г. Кульневич, Т.В. Кульневич, М.В. Шахматова, В.В. Ерофеева, Л. М. Качанова, Н. Н. Малинина, Т.И. Ивановой и других. В результате установлено, что большинство исследований посвящено работоспособности механически неоднородных сварных соединений при растяжении, и лишь отдельные – при изгибе. В последних не рассматривается влияние дефектов. Кроме того, в литературе не имеется сведений о прочности соединений с учетом неполной реализации контактного упрочнения в условиях статического

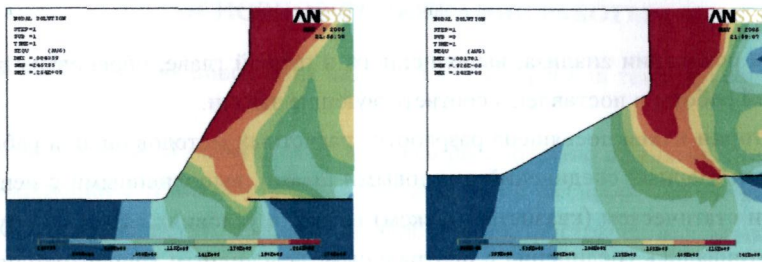
изгиба.

На основании анализа, выполненного в первой главе, обоснована цель настоящей работы и поставлены соответствующие задачи.

Вторая глава посвящена разработке расчетных методов оценки работоспособности сварных соединений с угловыми швами, выполненными с непроварами, при статическом (квазистатическом) изгибе в условиях вязкого разрушения. Рассматривались соединения с центральным шелевидным концентратором (тавровые и нахлесточные соединения, выполненные двухсторонними угловыми швами с непроваром) и соединения с примыкающим концентратором (соединения, выполненные односторонними угловыми швами).

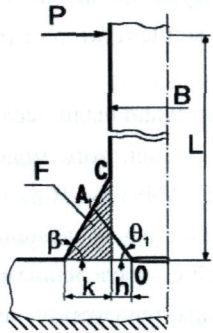
Для разработки математических моделей предварительно были исследованы НДС рассматриваемых соединений методом конечно-элементного моделирования (МКЭ), реализованным в программном комплексе «ANSYS». В рамках численного эксперимента для каждого типа сварных соединений предельным изгибающим моментом нагружали несколько серий моделей с определенными значениями глубины проплавления. Для каждой серии, характеризуемой некоторой постоянной величиной проплавления и объема наплавленного металла, угол наклона лобовой грани швов (β) изменяли от 30 до 75°. Установлено, что основное влияние на распределение напряжений в поперечных сечениях швов здесь оказывает нагруженность источников пластического течения металла: вершины непровара и зоны перехода «шов - основной металл ребра» (точка С на рис. 1 и 2). Очевидно, что при изгибе прочность угловых швов соединений определяется повышенной чувствительностью к поверхностным дефектам. В рамках численного эксперимента выявлено, что для соединений с двухсторонними швами «опасное» сечение (зона предполагаемого разрушения) приближается по форме к прямолинейному, а для соединений с односторонними швами – напротив, имеет ярко выраженную криволинейную форму. Причем, положение этого сечения отличается от минимального, принимаемого в инженерных расчетах, и определяется конструктивно-геометрическими параметрами: глубиной проплавления (h), площадью наплавленного металла (F), углом наклона лобовых граней швов (β), а также способом задания внешней нагрузки ($\chi=B/L$). В соответствии с полученными результатами были приняты расчетные схемы (рис. 1, в-д и рис. 2, в, г) и выбраны методы получения математических моделей.

Используя кинематическую теорему предельного равновесия для соединений, выполненных двухсторонними лобовыми швами, получено выражение для

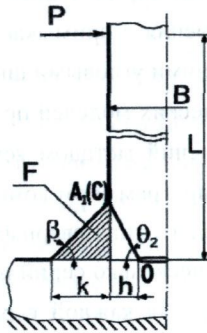


a)

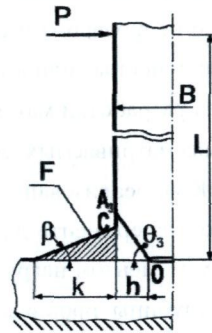
b)



a)

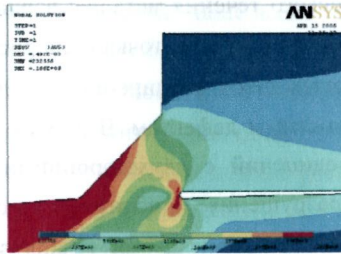


b)

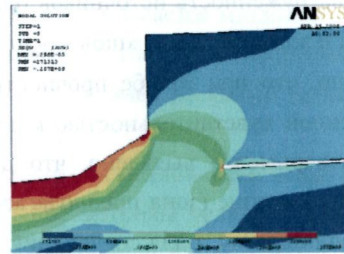


c)

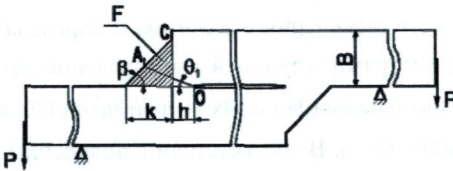
Рис. 1. НДС лобового шва таврового соединения при изгибе в различных диапазонах изменения угла β (a, б) и соответствующие расчетные схемы (в, г, д*)



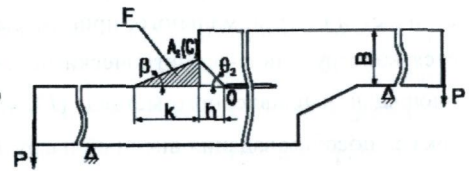
a)



b)



a)



b)

Рис. 2. НДС лобового шва нахлесточного соединения при изгибе в различных диапазонах изменения угла β (a, б) и соответствующие расчетные схемы (в, г)

* Представленная расчетная схема является теоретически возможной.

оценки предельного погонного изгибающего момента соединений:

$$M_{cp} = \frac{\sigma_B}{2\sqrt{3}} \cdot \psi_* \cdot K_{\eta\beta}, \text{ (условие прочности: } M_{изз} \leq M_{cp}), \quad (1)$$

где: σ_B – предел прочности; $\psi_* = B \cdot \sqrt{2F}$ (F – фактическая площадь наплавленного металла, B – толщина ребра для тавровых соединений, толщина соединяемых пластин); $K_{\eta\beta}$ – коэффициент, зависящий от геометрических параметров сварных соединений, который можно определить из следующих выражений:

1. Для тавровых соединений:

$$K_{\eta\beta} = \left(\eta + \frac{1}{\sqrt{tg\beta}} \right) \cdot \frac{\sin \beta}{\sin(\beta + \theta_i) \cdot \sin \theta_i}; \quad (2)$$

2. Для нахлесточных соединений

$$K_{\eta\beta} = \left(\eta + \frac{1}{\sqrt{tg\beta}} \right) \cdot \frac{\sin \beta}{\sin(\beta + \theta_i) \cdot \cos \theta_i}. \quad (3)$$

Здесь $\eta = \frac{h}{\sqrt{2F}}$ – относительная глубина проплавления пластин, θ_i – угол, определяющий положение «опасного» сечения.

Формулы и методика определения угла θ_i для тавровых и нахлесточных соединений подробно описаны в диссертации.

Решение для тавровых и нахлесточных соединений, выполненных односторонними угловыми швами, получено методом линий скольжения:

$$M_{cp} = \frac{\sigma_B}{\sqrt{3}} \cdot F \cdot K_{\beta} \cdot \left(\eta + \frac{1}{\sqrt{tg\beta}} \right)^2 \cdot \sin^2 \beta, \quad (4)$$

где K_{β} – коэффициент усиления, зависит от угла β наклона лобовой грани шва.

Методика определения коэффициента K_{β} описана в диссертации.

Приемлемость предлагаемых подходов проверена экспериментальными и численно-экспериментальными методами. В частности, сравнительный анализ результатов вычисления положений «опасных» сечений для различных типов соединений при изгибе с данными МКЭ показал их удовлетворительную сходимость. Проверка формул (1) – (4) на натурных образцах, нагруженных изгибающим моментом, также показала хорошее согласование теоретических и экспериментальных значений предельного изгибающего момента.

Полученные уточненные решения позволяют не только оценивать несущую способность тавровых и нахлесточных соединений, но и выполнять оптимиза-

цию их угловых швов, производить нормирование дефектов. Это, в свою очередь, позволяет разработать мероприятия по снижению объема наплавленного металла и значительно увеличить срок службы сварной конструкции.

В третьей главе рассмотрены вопросы оценки влияния трещиноподобных дефектов на прочность сварных соединений с лобовыми угловыми швами, работающих при изгибе в условиях хрупкого и квазихрупкого разрушений. В результате обзора литературных источников установлено, что в заданных условиях непровары и подрезы сварных соединений, зачастую, работают как трещины. Поэтому в качестве метода теоретических исследований были выбраны подходы линейной и нелинейной механики разрушения на базе МКЭ (ПК «ANSYS»).

В рамках решения хрупкой задачи был проведен предварительный анализ НДС вблизи вершин рассматриваемых дефектов. Установлено, что локальные напряжения в указанных зонах соединений определяются совместным действием K_I и K_{II} (коэффициенты интенсивности напряжений 1-го и 2-го порядков). Причем, для дефектов типа «непровар», в отличие от случая растяжения, при изгибе наблюдается варьирование K_{II} в достаточно широких пределах. В связи с этим, во избежание усложнения использования полученных решений, использовали частный случай теории обобщенного нормального разрыва, разработанной А.Е. Андрейкиным:

$$K_I^{\max} = \frac{K_I - 3 \cdot K_{II} \cdot \operatorname{tg} \frac{\theta_0}{2}}{\left(1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\theta_0}{2}\right)^{3/2}}, \text{ здесь } \theta_0 = 2 \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{K_I - \sqrt{K_I^2 + 8K_{II}^2}}{4K_{II}} \right), \quad (5)$$

где: K_I^{\max} - обобщенный коэффициент интенсивности напряжений.

Влияние K_{II} на напряженное состояние вблизи подрезов минимально. Поэтому при решении соответствующей задачи данный коэффициент не учитывался.

Определение коэффициентов K_I и K_{II} в зависимости от конструктивно-геометрических параметров соединений и размера дефектов осуществлялось на численных моделях МКЭ, нагруженных чистым поперечным изгибом. Непровары и подрезы моделировались «идеальными» трещинами длиной l . Для тавровых соединений с центральным непроваром (рис. 3, а) аналогично пластической задаче, использовались несколько серий моделей с определенными значениями глубины проплавления ($l/B=0.1 \dots 1$). Для каждой серии, характеризуемой некоторой постоянной величиной проплавления, угол β наклона лобовой грани швов

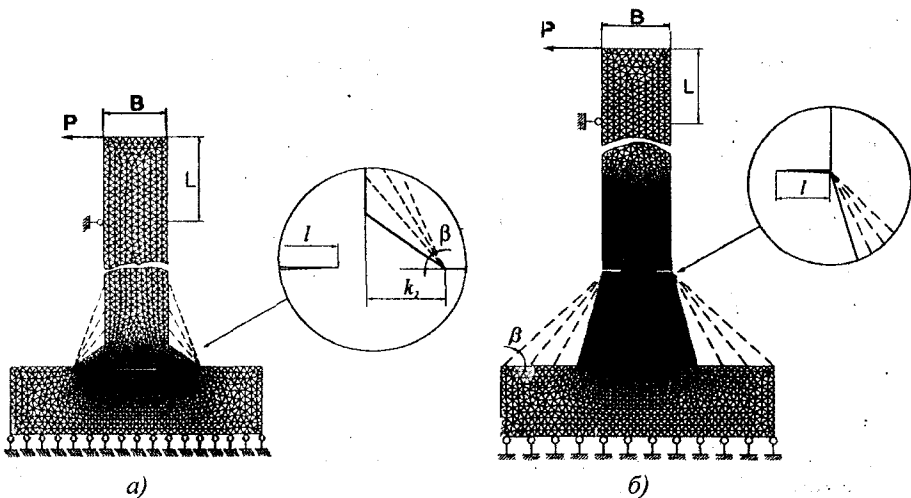


Рис. 3. Конечно-элементные модели тавровых соединений, выполненных двухсторонними швами: а - с центральным непроваром, б - с подрезами

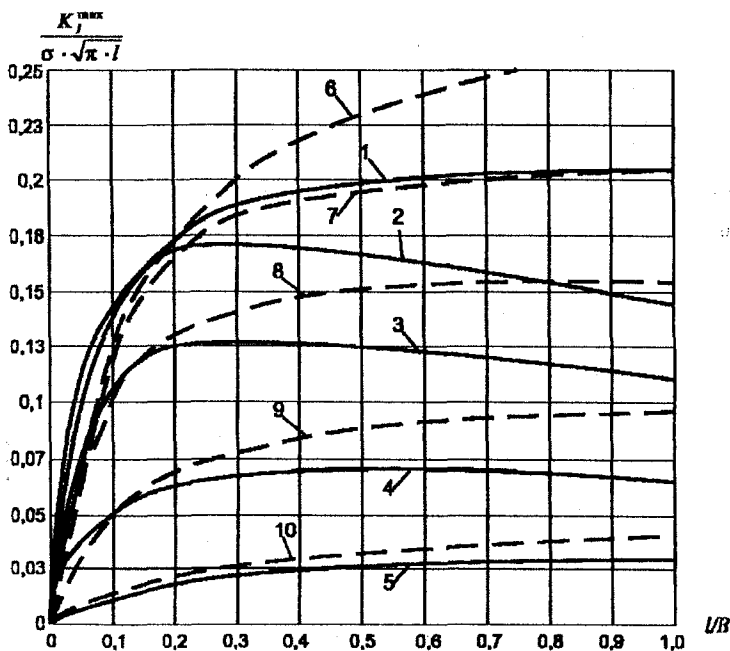


Рис. 4. Результаты вычислений коэффициентов интенсивности напряжений в области вершин непроваров двухсторонних тавровых соединений, полученные МКЭ: кривые 1, 6 - $\beta=30^\circ$, кривые 2, 7 - $\beta=45^\circ$, кривые 3, 8 - $\beta=60^\circ$, кривые 4, 9 - $\beta=75^\circ$, кривые 5, 10 - $\beta=90^\circ$ (— — — — — $k_2/B=0.5$, - - - - - $k_2/B=0.375$).

изменяли от 30 до 75°. Дополнительно, в процессе теоретического анализа варьировали параметр k_2/B от 0.375 до 0.5. Значения были получены в ходе решения линейно упругих задач для плоской деформации по методике, описанной в диссертации. В качестве примера на рис. 4 представлены результаты вычислений для тавровых соединений с центральным дефектом (рис. 3, а) в виде графических зависимостей.

Данные зависимости были аппроксимированы в виде следующего математического выражения:

$$K_I^{\max} = 3.76 M_{\text{изг}} \cdot \frac{l^{\frac{3}{2}}}{(B + \psi \cdot k_2)^3} \cdot 1.005 \sqrt{\sec \left\{ \frac{\pi}{2} \left[\frac{l}{B + \psi \cdot k_2} - 0.3 \right] \right\}}, \quad (6)$$

где: $M_{\text{изг}}$ – величина изгибающего момента; l – величина неперевара; B – толщина ребра таврового (крестового) соединения; ψ – параметр, зависящий от геометрических параметров соединения:

$$\psi = \left(\frac{2.85}{\text{tg}^2 \left(\beta + \frac{\pi}{4} \right)} - 2 \right) \left(1 - \frac{k_2}{1.22B} \right) + \left(2.85 - \frac{1}{4 \cdot \text{tg}^2 \beta} \right) \left(\frac{l}{B + k_2} \right)^{\frac{2}{3}}; \quad (7)$$

k_2 – катет сварного шва; β – угол наклона лобовой грани сварного шва.

Для вычисления коэффициентов интенсивности напряжений в области подрезов зоны «шов – основной металл» использовались модели, представленные на рис. 3, б. Оценка напряженного состояния в области вершины дефекта, расположенного в растянутой зоне, осуществляли с учетом изменения параметра $2l/B$ (0.05...0.45) и угла наклона лобовой грани β (30...75°). В результате вычислений получено следующее выражение:

$$K_I = \frac{M_{\text{изг}}}{(0.5B - l)^{3/2}} \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot \text{tg} \left(\frac{\pi \cdot l}{B} \right)}{\pi \cdot \sin \left(\frac{\pi \cdot l}{B} + 0.14 \right)}} \cdot \left[1 + \frac{0.43(B - 4l)}{(B + 4l)} \cdot \sqrt{\text{ctg}(\beta)} \right]. \quad (8)$$

Аналогичным образом выполнен анализ трещиностойкости для односторонних тавровых и нахлесточных соединений с дефектами. Соответствующие графические и математические зависимости представлены в диссертации.

Для решения квазихрупкой задачи изгиба соединений с угловыми швами в диссертации на основании критерия Е.М. Морозова с учетом рекомендаций

В.И. Махненко получено следующее выражение:

$$M_p = \frac{M_*}{\sqrt{1 + \left(\frac{M_*}{\eta K_{IC}}\right)^2 \cdot F(\psi)^2}}, \quad (9)$$

где: M_p - разрушающий изгибающий момент; M_* - предельный изгибающий момент при вязком разрушении, который можно определить по формулам (1)-(4); $\eta \geq 1.0$ - коэффициент, учитывающий наличие притупления ρ в вершине непровара соединения и малую толщину испытываемых образцов (расчетная формула представлена в диссертации); K_{IC} - вязкость разрушения (характеристика материала); $F(\psi)$ - поправочная функция, учитывающая геометрическую форму со-

единения, $F(\psi) = \frac{K_{I(\max)}}{M_p}$ ($K_{I(\max)}$ - коэффициент интенсивности напряжений,

равный $\max\{K_I^{непр}; K_I^\alpha\}$; $K_I^{непр} = K_I^{\max}$ и K_I^α - коэффициенты интенсивности вблизи вершин соответственно непровара и подреза).

Анализ полученных результатов в сравнении с данными экспериментальных исследований показал их удовлетворительное соответствие и подтвердил приемлемость предлагаемых подходов для оценки хрупкой и квазихрупкой прочности.

Четвертая глава посвящена разработке методов оценки работоспособности механически неоднородных стыковых сварных соединений при изгибе в условиях вязкого разрушения.

Основными параметрами, определяющими прочность механически неоднородных сварных соединений (рис. 5) при изгибе и растяжении в условиях плоской деформации, являются: степень механической неоднородности $K_B = \sigma_B^T / \sigma_B^M$, относительная толщина мягкой прослойки $\chi = h/B$, форма мягкой прослойки и неравномерность распределения прочностных свойств по объему прослойки.

В качестве основного метода теоретического исследования был выбран метод линий скольжения. Предварительно, для выявления основных закономерностей влияния вышеуказанных параметров на работоспособность соединений при изгибе был выполнен качественный анализ их предельного состояния при данном типе нагружения методом конечных элементов. В результате применения МКЭ были получены поля пластических деформаций, определены характерные напряженно-деформированные состояния для различного сочетания конструктивно-геометрических параметров соединений и построены эпюры нормальных

и касательных напряжений. Установлено, что механизм контактного упрочнения при растяжении (сжатии) и изгибе схожи. Но имеется ряд особенностей, не позволяющих использовать уже известные расчетные зависимости для случая с изгибом. Например, в отличие от растяжения при изгибе наблюдаются две линии ветвления пластического течения мягкой прослойки, расположенные симметрично относительно нейтральной оси Y в зоне растяжения и в зоне сжатия (рис. 5, в). Эти линии, представленные точками O_1 и O_2 , являются зонами максимальных нормальных напряжений и определяют место смены знака касательных напряжений. Положения этих точек в центральном сечении прослойки зависят от параметров K_B и χ , и соответствуют расстоянию от нейтральной оси, равному не более одной четверти высоты сечения ($B/4$) как в зоне растяжения, так и в зоне сжатия. Непосредственно возле нейтральной оси наблюдается смена знака нормальных напряжений и зона относительного застоя пластического течения.

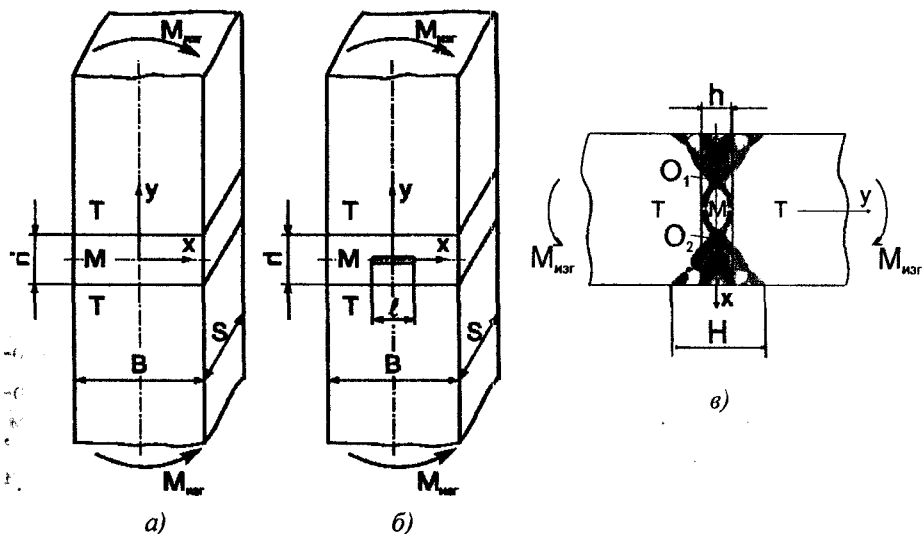


Рис. 5. Расчетные схемы механически неоднородных сварных соединений с полным проплавлением (а), центральным непроваром (б) и поле пластических перемещений бездефектного соединения с $K_B < 4$ и $\chi < 0.3$ (в) при изгибе.

Выявленные закономерности в сочетании с ранее установленными моделями механического поведения линий скольжения и условием неразрывности касательных напряжений позволили построить сетки линий скольжения. По полученным для наиболее характерных случаев сеткам было выполнено математическое описание напряженного состояния областей прослоек соединений, нагру-

женных изгибом. Используя полученные формулы для определения напряжений, условие статической эквивалентности внутренних напряжений и внешних усилий и данные работ Шахматова М.В., Ерофеева В.В. и Айметова Ф.Г. было предложено выражение для расчета предельного изгибающего момента неоднородных соединений с прямоугольной мягкой прослойкой:

$$M_{np} = M^{н*} \left[\frac{1}{2K_B - 1} + \frac{2(K_B - 1)}{2K_B - 1} K_{\chi^{н*}} \right], \quad (10)$$

где: $M^{н*} = \frac{1}{2} k_m B^2 S$ - предельный момент для пластины, выполненной из металла прослойки (М); $K_{\chi^{н*}}$ - коэффициент контактного упрочнения мягкой прослойки при статическом изгибе, зависящий от χ (формула для определения коэффициента представлена в диссертации).

Оценка влияния центрального щелевидного концентратора (непровара) на прочность механически неоднородных соединений при изгибе (рис. 5, б) осуществлялась по аналогичному алгоритму. Предварительный анализ МКЭ позволил выявить два характерных диапазона изменения относительных размеров дефекта. При $l/B < \chi$ влияние дефекта ограничивается изменением контактного упрочнения на участке возле нейтральной оси Y соединения (т.е. на участке между линиями ветвления пластического течения). Рост размера концентратора до $l/B \geq \chi$ ведет к изменению контактного упрочнения по всему сечению, увеличению расстояния между линиями ветвления, снижению влияния параметра K_B на прочность соединений. По полученным МКЭ полям пластических деформаций и эпюрам напряжений с использованием известных научных наработок кафедры были построены сетки линий скольжения. В результате математического описания сеток с учетом данных работ Шахматова М.В., Ерофеева В.В и Айметова Ф.Г. предложена формула для оценки величины предельного момента соединений с щелевым концентратором (непроваром) в центральной части мягкой прослойки:

$$M_{np}^l = M^{н*} \left[\frac{1 - (l/B)^2}{2K_B - 1} + \frac{2(K_B - 1)}{2K_B - 1} K_{\chi^{л*}} \right], \quad (11)$$

где: $K_{\chi^{л*}}$ - коэффициент контактного упрочнения мягкой прослойки с непроваром в центральной корневой части при нагружении статическим изгибом, зависящий от параметров χ и l/B (формулы для определения коэффициента в зависимости от диапазона изменения l/B представлены в диссертации).

Проверка полученных расчетных зависимостей, выполненная на натурных образцах из титанового сплава ПТ-3В и стали ЭП678, показала их удовлетворительное соответствие экспериментальным данным. При испытании образцов были сделаны поправки на неравномерное распределение механических свойств поперек мягких швов и прогибы образцов.

На основании анализа полученных расчетных данных, в т.ч. формул (10) и (11), в диссертации предложены расчетные методы, позволяющие осуществлять оптимизацию геометрических параметров прямоугольных мягких прослоек в зависимости от степени механической неоднородности и размера центрального непровара (при его наличии), а также выполнять нормирование дефектов.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. В ходе теоретического анализа, выполненного МКЭ, исследовано напряженно-деформированное состояние различных моделей тавровых и нахлесточных сварных соединений с непроварами при нагружении внешним поперечным изгибом. Показано, что несущая способность таких соединений в условиях вязкого разрушения в значительной степени определяется как геометрическими параметрами сварных швов, так и размерами дефектов. При этом положение «опасного» сечения не совпадает с минимальным, а его форма отличается некоторой кривизной, степень которой зависит от общей геометрии соединений.

2. В результате применения кинематической теоремы предельного равновесия и метода линий скольжения в совокупности с МКЭ были получены расчетные методы определения максимального показателя напряженного состояния различных типов соединений с угловыми лобовыми швами в условиях статического изгиба. Установлено, что предельный изгибающий момент в условиях вязкого разрушения определяется следующими параметрами: глубиной проплавления (h), площадью наплавленного металла (F), углом наклона лобовых граней швов (β), а также способом задания внешней нагрузки (χ). Причем, увеличение h способствует в значительной степени большему повышению прочности, чем это можно было бы ожидать только от увеличения площади опасного сечения.

3. Прочность соединений при изгибе характеризуется повышенной чувствительностью к поверхностным дефектам. Это выражается в более жесткой зависимости показателей напряженного состояния от размеров указанных несплошностей. Центральный дефект при незначительных размерах может оказывать минимальное влияние. Необходимо также учитывать следующее: плоскостные

сварочные дефекты типа непроваров и подрезов, зачастую, оказывают на хрупкую прочность сварных соединений такое же влияние, как и трещины.

4. В ходе численного эксперимента, выполненного на теоретических моделях сварных соединений с угловыми швами, основываясь на подходах ЛМР, были получены математические зависимости, позволяющие оценивать трещиностойкость таких соединений при воздействии поперечного изгиба. Анализ полученных результатов показал, что прочность рассматриваемых соединений в условиях хрупкого (квазихрупкого) разрушений в значительной степени зависит от их конструктивно-геометрических параметров: размера дефекта (l/B), величины катета шва (k_2/B) в плоскости непровара и угла наклона лобовой грани шва (β).

5. Использование комбинированного критерия для условий статического (квазистатического) нагружения рассматриваемых соединений с трещиноподобными дефектами позволяет с единых позиций рассматривать вязкое, хрупкое и квазихрупкое разрушения. При этом достоверные результаты могут быть получены на основе выведенных ранее зависимостей для определения характеристик трещиностойкости и макропластичности.

6. Полученные уточненные решения для оценки работоспособности нахлесточных и тавровых соединений в условиях вязкого, хрупкого и квазихрупкого разрушений позволяют на стадии эксплуатации повысить достоверность оценки выявляемых при диагностике дефектов, на стадии конструктивно-технологического проектирования выполнять оптимизацию их угловых швов для увеличения несущей способности и производить нормирование дефектов. Это, в свою очередь, позволяет разработать мероприятия по снижению объема наплавленного металла и значительно увеличить срок службы сварной конструкции.

7. Для тавровых соединений с неполным проплавлением оптимальными с точки зрения обеспечения максимальной прочности при растяжении и изгибе являются лобовые швы с углом наклона внешней грани к основанию: $\beta_{opt} = 60^\circ$ - для двухсторонних и $\beta_{opt} = 45 \dots 60^\circ$ - для односторонних соединений. В двухсторонних тавровых соединениях при увеличении глубины проплавления оптимальный угол грани может быть увеличен: $\beta_{opt} = 60 \dots 70^\circ$. В нахлесточных соединениях аналогичные углы рекомендуется выполнять: $\gamma_{opt} = (90^\circ - \beta) = 45 \dots 60^\circ$ - для двухсторонних и $\beta_{opt} = 45 \dots 60^\circ$ - для односторонних соединений.

8. Для малоуглеродистых и низколегированных сталей целесообразно применение более прочных («твердых») угловых швов, чем основной металл. Причем, достаточно превышения прочности шва на 20-25%, что можно обеспечить

правильно подобранным сочетанием сварочных материалов.

9. Предложен расчетный метод для определения предельного изгибающего момента (M_{np}) стыковых сварных соединений, содержащих мягкую прослойку. Величина M_{np} значительно зависит от степени механической неоднородности (K_B) и относительной толщины мягкой прослойки (χ). С уменьшением последней M_{np} возрастает по гиперболической зависимости. Качественно данная зависимость такая же, как и для статического растяжения, но в количественном плане диапазон относительных толщин мягких прослоек, где действует эффект контактного упрочнения, существенно сужен.

10. На основе теоретических и экспериментальных исследований предложена формула для определения предельного изгибающего момента для сварных соединений с щелевидным дефектом в центральной части мягкой прослойки. Анализ полученных выражений показал, что центральный дефект при своих незначительных размерах может оказывать минимальное влияние на степень контактного упрочнения и величину предельного изгибающего момента. При этом существует возможность получения равнопрочного сварного соединения при правильно подобранных физических и геометрических параметрах прослойки.

11. Предложенные расчетные зависимости позволяют на стадии конструктивно-технологического проектирования выбирать размеры ослабленных участков, присадочный материал для сварки, определяющий степень механической неоднородности соединения, и производить оценку опасности дефектов сварки при контроле качества сварных соединений.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Шахматов, М.В. Оценка несущей способности тавровых сварных соединений с непроварами в условиях вязкого разрушения при изгибе [Текст] / М.В. Шахматов, С.Ф. Айметов, Ф.Г. Айметов // Сварочное производство. – 2008. – №4. – С. 11–16.

2. Айметов, С.Ф. Работоспособность лобовых швов тавровых соединений при изгибе [Текст] / С.Ф. Айметов // Материалы научно-технической конференции «XXVI Российская школа по проблемам науки и технологий». – Миасс: МСНТ. – 2006. – С. 49.

3. Шахматов, М.В. Работоспособность лобовых швов нахлесточных соеди-

2-74
[]

нений при вязком разрушении в условиях изгиба [Текст] / М.В. Шахматов, С.Ф. Айметов, Ф.Г. Айметов // Сварщик–профессионал. – 2006. – №4. – С. 23-24.

4. Шахматов, М.В. Анализ сварных металлоконструкций грузоподъемных кранов общего назначения [Текст] / М.В. Шахматов, С.Ф. Айметов, Ф.Г. Айметов // Интеллектика, логистика, системология: сб. научн. тр. – Челябинск, 2004. – Вып. 13. – С. 173–182.

5. Шахматов, М.В. Влияние геометрии лобовых швов на несущую способность тавровых соединений с трещиноподобными дефектами при изгибе [Текст] / М.В. Шахматов, Ф.Г. Айметов, С.Ф. Айметов // Сварщик-профессионал. – 2006. – №2. – С.18–19.

6. Шахматов, М.В. К вопросу о расчетах сварных металлоконструкций кранов [Текст] / М.В. Шахматов, Ф.Г. Айметов, С.Ф. Айметов // Материалы научнотехнической конференции «Наука-Образование-Производство», посвященной 60-летию Нижнетагильского технологического института УГТУ-УПИ. В 3 т. Т. 2: Сварка, реновация и инженерия поверхности. Н-Тагил: НТИ (ф) ГОУ ВПО УГТУ-УПИ. – 2004. – С. 38-39.

7. Айметов, С.Ф. Оценка влияния параметров мягкой прослойки на прочность стыковых сварных соединений, нагруженных изгибом [Текст] / С.Ф. Айметов, Ф.Г. Айметов // Наука ЮУрГУ: материалы 61-й научной конференции. Секции технических наук. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – Т.2. – С. 86–89.

8. Шахматов, М.В. К вопросу о расчетах сопротивления усталости элементов металлоконструкций подъемных кранов [Текст] /М.В. Шахматов, С.Ф. Айметов // Интеллектика, логистика, системология: сб. научн. тр. – Челябинск: Изд. ЧНЦ РАЕН, РУО МАИ, ЧРО МАНПО, ЧРО МААНОЙ, 2003. – Вып. 9. – С. 38–40.

9. Щербаков, И.А. Оценка работоспособности и остаточного ресурса сварных конструкций мостовых перегружателей [Текст] / И.А. Щербаков, С.Ф. Айметов, М.В. Ерофеев // Материалы научнотехнической конференции «Наука-Образование-Производство». В 4 т. Т. 3: «Сварка – Реновация – Триботехника». Н-Тагил: НТИ (ф) ГОУ ВПО УГТУ-УПИ. – 2007. – С. 55.