

448150

МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ И
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ
УЧИЛИЩЕ имени Н.Э.БАУМАНА



На правах рукописи

АЛАДИСКИЙ ВЛАДИМИР ВИКТОРОВИЧ

УДК 621.791.052

РАЗРАБОТКА ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-
ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
С КОНЦЕНТРАТОРАМИ

05.03.06 – 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 имени Н.Э.Баумана

Научный руководитель - д.т.н., профессор Винокуров В.А.

Официальные оппоненты: д.т.н., профессор Киселев С.Н.

к.т.н., ст. научн. сотр. Прохоров Н.Н.

Ведущее предприятие - ЦНИИТМАШ

Защита состоится "12" февр 1987 г. на заседании специализированного Совета КОСЗ.15.03 в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище имени Н.Э.Баумана по адресу: 107005, г.Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

Ваш отзыв в 1-м экземпляре, заверенный печатью, просим высылать по указанному адресу.

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

Автореферат разослан "___" _____ 1987 г.

Ученый секретарь
специализированного Совета
к.т.н., доцент



В.И.Гирш

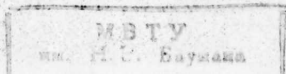
Актуальность проблемы. Одной из основных причин, приводящих к нерациональному и неэкономному расходу металла или преждевременному выходу сварных конструкций из строя, является несовпадение расчетной и конструкционной прочности. Для сближения расчетной и конструкционной прочности необходимо совершенствование расчетных методов и системы предельных состояний, по которым производится определение прочности.

Многие используемые предельные состояния связаны непосредственно с определением напряженно-деформированного состояния, возникающего в некоторой локализованной области сварного соединения, обычно вблизи концентраторов, имеющих в соединении. Общепринятые критерии напряженно-деформированного состояния не всегда правильно отражают ситуацию, возникающую в сварных соединениях, что может привести к неверной оценке прочности соединения, поэтому разработка новых критериев и методов определения напряженно-деформированного состояния сварных соединений является актуальной научной задачей.

Цель работы. Работа посвящена разработке современных численных методов определения напряженно-деформированного состояния сварных соединений с концентраторами; применению этих методов для установления закономерностей в образовании полей напряжений, деформаций и перемещений вблизи концентраторов, характерных для сварных соединений; обоснованию критерия локального перемещения как критерия напряженно-деформированного состояния, пригодного для оценки прочности сварных соединений при упругом и упруго-пластическом нагружении; использованию полученных результатов для определения прочности и расчетов сварных соединений с угловыми швами на выносливость.

Методы исследования. Расчетные методы включали в себя численные методы граничных интегральных уравнений и граничных локаций, метод наименьших квадратов, интегрирование дифференциальных уравнений механики деформируемого твердого тела методом конечных элементов, интегрирование систем дифференциальных уравнений методом экстраполяции.

Экспериментальный метод состоял в испытании образцов на статический изгиб, измерении перемещений и нагрузок путем тензометрирования.



Научная новизна работы.

1. В численные методы решения задач механики деформируемого твердого тела для более полного учета специфики напряженно-деформированного состояния сварных соединений, возникающего на стадиях их изготовления и эксплуатации, внесены усовершенствования:

а. для определения коэффициентов интенсивности напряжений в сварных соединениях с острыми вырезами применено двухэтапное решение методами граничных интегральных уравнений и граничных коллокаций;

б. в методе конечных элементов использованы уравнения равновесия конечного элемента и уравнения состояния в дифференциальной форме.

2. Показано, что критерий локального перемещения отличается от известных деформационных критериев большей общностью и позволяет описать напряженно-деформированное состояние сварных соединений при оценке их прочности при упругом, упруго-пластическом, неизотермическом и переменном нагружении.

3. Установлены закономерности образования концентрации напряжений в сварных соединениях с угловыми швами и получены зависимости коэффициентов локальной концентрации напряжений от размеров элементов соединений, катетов швов, толщины металла, схемы нагружения. Показано, что концентрация напряжений в сварных соединениях с угловыми швами уменьшается с увеличением катета в соединениях с рабочими швами, но увеличивается в соединениях с конструктивными швами.

Практическая ценность.

1. Разработан комплекс программ для ЭВМ, позволяющий определять напряженно-деформированное состояние сварных соединений с концентраторами при упругом и упруго-пластическом поведении металла при изотермическом и неизотермическом нагружении. Комплекс передан Ц/О "Атоммаш", где используется для оптимизации технологических процессов при электрошлаковой сварке.

2. Разработана методика определения характеристик трещиностойкости металла на образцах небольших размеров, разрушающихся после значительного пластического деформирования; предложена методика моделирования напряженно-деформированного состояния у вершины трещины при проведении испытаний на конструктивно-технологическую трещиностойкость при неизотермическом нагружении.

3. Для ряда сварных соединений с угловыми швами получены номограммы зависимостей коэффициентов локальной концентрации напряжений от размеров элементов соединения, катетов швов, толщины металла, схемы нагружения.

Апробация работы. Разработанные алгоритмы и программы используются для расчетного исследования влияния режимов электрошлаковой сварки и сопутствующего подогрева на уровень напряжений, деформаций и перемещений в деталях.

Методика определения трещиностойкости металла на образцах уменьшенных размеров использована в МВТУ им. Баумана для определения K_{TC} сварных соединений из сталей 20Х2НМФ и 20Х3НМ.

В МВТУ им. Баумана определены с использованием полученных номограмм локальные пределы выносливости для ряда сварных соединений с поперечными угловыми швами из низкоуглеродистых и низколегированных сталей; результаты включены в разрабатываемый РТМ по расчету сварных соединений на выносливость.

Основные положения работы докладывались на научном семинаре кафедры "Машины и автоматизация сварочных процессов" МВТУ им. Н.Э. Баумана.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных результатов по работе, общих выводов, списка литературы и приложений. Изложена на 107 страницах машинописного текста, содержит 51 рисунок, 4 таблицы и 98 наименований литературных источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава I. Современные методы определения напряженно-деформированного состояния для оценки работоспособности сварных соединений

Во многих практически важных случаях при оценке прочности сварных соединений с концентраторами используется напряженно-деформированное состояние, возникающее у концентратора. При этом выбор критерия напряженно-деформированного состояния зависит от условий нагружения соединения и вида концентратора. При упругом нагружении могут быть использованы силовые критерии: коэффициенты концентрации напряжений для соединений с концентраторами, имеющими ненулевой радиус закругления у вершины; коэффициенты интенсивности напряжений для соединений с трещиноподобными ост-

рыми концентраторами. В тех случаях, когда разрушению сварного соединения предшествуют значительные нелинейные пластические деформации, необходимо использовать деформационные критерии - такие, как коэффициенты интенсивности деформаций, раскрытие в вершине надреза, или энергетические критерии, например, J - интеграл, G - интегралы.

Ввиду того, что сварные соединения имеют такие формы и такие поля напряжений и деформаций, которые не характерны для классических задач в механике трещин и теории концентрации напряжений, многие эффективные методы, разработанные в механике деформируемого твердого тела, не используются в практических целях в отношении сварных конструкций. Определение напряженно-деформированного состояния сварных соединений с концентраторами может производиться численно с применением ЭВМ при использовании расчетных методов, развиваемых для задач механики деформируемого твердого тела. Для обеспечения необходимой точности результатов и эффективности расчетов при определении напряжений и деформаций в сварных соединениях алгоритмы, реализующие соответствующие численные методы, должны быть модифицированы с учетом характерных особенностей сварочных задач. При решении упругих задач целесообразно применение методов, наиболее полно учитывающих линейность задачи, таких как метод граничных интегральных уравнений и метод граничных коллокаций. Для упруго-пластических задач, требующих учета пластических деформаций, протекающих в сварном соединении, лучше других подходит метод конечных элементов.

Современные методы расчетов на прочность сварных соединений с концентраторами не всегда учитывают влияние геометрических параметров соединения и схемы нагружения на напряженно-деформированное состояние. Например, в расчетах сварных соединений с угловыми швами на выносливость не учитывается изменение уровня концентрации напряжений в зависимости от размеров элементов соединения, катетов швов и толщины металла. Применяемые в настоящее время в механике разрушения как силовые, так и деформационные критерии не всегда в полной мере учитывают процесс пластического деформирования вблизи концентратора, что делает невозможным точную оценку прочности сварных соединений, разрушающихся после значительного пластического деформирования. Кроме того, общепринятые критерии чрезмерно чувствительны к незначительным случай-

ным отклонениям формы концентратора и не дают интегральной оценки напряженно-деформированного состояния вблизи вершины, которое существенно для прочности.

Перспективным представляется использование предложенного Винокуровым В.А. критерия локального перемещения D у вершины выреза, который интегрально характеризует напряженно-деформированное состояние у вершины трещины или острого выреза при упругом и упруго-пластическом нагружении.

В работе были поставлены следующие задачи:

1. Разработка алгоритмов и программ для решения упругих задач о концентрации напряжений и для определения коэффициентов интенсивности напряжений методами граничных интегральных уравнений и граничных коллокаций.

2. Разработка комплекса программ, реализующих метод конечных элементов, для решения задач по определению напряженно-деформированного состояния сварных соединений с концентраторами при упруго-пластическом нагружении.

3. Обоснование пригодности критерия локального перемещения для количественной оценки напряженно-деформированного состояния вблизи концентраторов, свойственных сварным соединениям, при упругом и упруго-пластическом нагружении.

4. Исследование концентрации напряжений в сварных соединениях с угловыми лобовыми швами в зависимости от соотношений размеров элементов соединения, катетов швов, толщины металла и схемы передачи силового потока.

5. Применение разработанных программ и критерия локального перемещения для получения количественных характеристик трещиностойкости ряда сварных соединений для статического и усталостного, упругого и упруго-пластического нагружения.

Глава 2. Определение напряженно-деформированного состояния сварных соединений с концентраторами при упругом нагружении

Во многих случаях для определения напряженно-деформированного состояния сварных соединений при упругом нагружении приходится пользоваться численными методами с применением ЭВМ.

Наиболее современным численным методом механики сплошных сред является метод граничных интегральных уравнений (ГИУ), основанный на том, что для линейных эллиптических задач удастся дифференциальные уравнения для области, занятой телом, заменить интегральными уравнениями для границы области, т.е. понизить на

единицу размерность задачи. Для задач теории упругости получаемые интегральные уравнения связывают между собой граничные значения компонентов перемещений и усилий, часть из которых неизвестна, а часть задана. Неизвестные значения перемещений или усилий определяются при решении интегральных уравнений численными методами.

Для решения задач о концентрации напряжений в сварных соединениях при упругом нагружении был разработан комплекс программ, реализующий метод ГИУ применительно к плоским задачам теории упругости. Область, занимаемая рассматриваемым соединением, подразделяется на несколько подобластей, границы которых разбиваются на квадратичные граничные элементы с 3-мя узлами каждый. В пределах элемента глобальные координаты, перемещения и компоненты усилий изменяются по параболическому закону. Система линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных граничных значений решается методом последовательного исключения Гаусса.

Для проверки разработанных программ и оценки точности получаемых результатов было решено несколько тестовых задач о концентрации напряжений вблизи отверстий. Сопоставление результатов решений методом ГИУ с результатами аналитических решений показывает, что метод ГИУ позволяет получать решения с высокой точностью.

Использование метода ГИУ для определения напряженно-деформированного состояния у вершин острых концентраторов приводит к необходимости использования большого числа мелких элементов у вершины концентратора и резкому увеличению объема задачи и времени счета. Для определения коэффициентов интенсивности напряжений, характеризующих поля напряжений у вершины трещиноподобных дефектов в сварных соединениях, в настоящей работе использовался метод граничных коллокаций (МКК) и алгоритм, основанный на двух-этапном решении методом ГИУ и МКК.

Был решен ряд задач по определению коэффициентов интенсивности напряжений образцов с V -образным вырезом и небольшой трещиной в вершине выреза, а также для сварного стыкового соединения с непроваром с неснятым усилением. Показано, что в соединениях с трещиноподобными дефектами типа непроваров геометрические параметры соединения, например, угол V -образного выреза, размеры усиления шва, оказывают заметное влияние на уровень коэффициентов интенсивности напряжений.

Глава 3. Особенности применения метода конечных элементов для определения напряженно-деформированного состояния сварных соединений с концентраторами и разработка необходимых алгоритмов и программ

Задачи определения напряженно-деформированного состояния сварных соединений представляют собой задачи нелинейной механики деформируемого твердого тела, которые в общем виде являются не-изотермическими, физически и геометрически нелинейными, с существенной неоднородностью свойств металла в пределах соединения. Кроме того, сварные соединения имеют сложную форму. Это приводит к тому, что в подавляющем большинстве случаев решения могут быть получены только численными методами.

Основными положениями при разработке алгоритмов и программ были следующие: 1. расчет напряжений и деформаций проводится на основе неизотермической теории течения; 2. учитывается зависимость механических свойств металла от деформационного упрочнения, температуры, времени; 3. в качестве численного метода интегрирования уравнений неизотермической теории течения применяется метод конечных элементов (МКЭ); 4. рассматриваемое тело разбивается на квадратичные конечные элементы, в пределах которых перемещения задаются неполным полиномом третьей степени; 5. области вблизи вершин острых концентраторов окружаются сингулярными конечными элементами, обеспечивающими необходимую асимптотику в распределении деформаций.

Основной особенностью разработанного алгоритма является использование уравнений равновесия конечного элемента и уравнений состояния, характеризующих термомеханическое поведение металла, в форме дифференциальных соотношений в отличие от известных алгоритмов, в которых применяются линеаризованные формы уравнений равновесия и состояния.

Уравнения равновесия конечного элемента сплошной среды, ограниченного поверхностью A_0 и имеющего в начальной конфигурации объем V_0 , можно записать в виде (I):

$$\int_{V_0} \dot{\sigma}^{in} \varphi_{N,i} dV_0 = \dot{P}_{Nn} \quad (I)$$

где σ^{in} — компоненты тензора напряжений, $\varphi_{N,i}$ — производные функций формы, P_{Nn} — компоненты узловых сил; точка обозначает дифференцирование по времени. Для элементов, в которых заданы

объемные F_n или поверхностные S_n нагрузки, компоненты узловых сил могут быть определены из соотношений (2):

$$P_{nn} = \int_{V_0} F_n \varphi_n dV_0 + \int_{A_0} S_n \varphi_n dA_0 \quad (2)$$

В настоящей работе уравнения состояния, связывающие скорости напряжений $\dot{\sigma}^{ij}$ со скоростями деформаций $\dot{\epsilon}_{kl}$, записываются в дифференциальной форме (3):

$$\dot{\sigma}^{ij} = E^{ijkl} \dot{\epsilon}_{kl} + H^{ij} \quad (3)$$

Тензоры E^{ijkl} и H^{ij} для материала с поверхностью текучести, зависящей от упрочняемости металла, температуры и времени протекания процесса деформирования, определяются соотношениями (4), (5):

$$E^{ijkl} = G(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk}) + (K - \frac{2}{3}G)\delta_{ij}\delta_{kl} - \frac{3GS_{ij}S_{kl}}{\sigma_i^2(1+C_\chi)} \quad (4)$$

$$H^{ij} = S_{ij} \left(\frac{3G(C_T \dot{T} + C_t)}{\sigma_i(1+C_\chi)} + \frac{\dot{G}}{G} \right) + \delta_{ij} \left(\sigma_o \frac{\dot{K}}{K} - 3K\dot{\epsilon}_\alpha \right) \quad (5)$$

где δ_{ij} - символы Кронекера, G и K - модули упругости, S_{ij} - компоненты девиатора напряжений, σ_i - интенсивность напряжений, T - температура, σ_o - среднее напряжение, $\dot{\epsilon}_\alpha$ - скорость свободной температурной деформации; коэффициенты C_χ , C_T , C_t представляют собой тангенсы углов наклона касательных, проведенных к соответствующим зависимостям размера поверхности пластичности S от значений параметра Одвишта χ , температуры T , времени t .

После выражения компонент тензора деформаций $\dot{\epsilon}_{kl}$ через узловые перемещения и подстановки соотношения (3) в уравнения (I) получаем систему дифференциальных уравнений относительно узловых перемещений, которая решается численными методами.

Конечноэлементные модели сварных соединений, имеющих сложную форму, например, соединений с угловыми швами, состоят из большого количества элементов, частично криволинейных. Для уменьшения объема исходной информации была разработана программа автоматизированного построения плоских конечноэлементных моделей сварных соединений.

Разработанные алгоритмы и программы проверялись путем сопоставления результатов численных расчетов напряжений, деформаций и перемещений у вершины трещиноподобного дефекта с результатами

расчетов по аналитическим зависимостям.

Глава 4. Критерий локального перемещения у вершины острого концентратора

Для количественного описания напряженно-деформированного состояния вблизи вершины острых концентраторов в случае образования зон пластических деформаций возможно применение совокупности локальных перемещений точек, лежащих на расстоянии 0,5 мм от вершины трещины, т.е. D - критерия. В данной главе проведено методом конечных элементов определение напряженно-деформированного состояния вблизи вершины острого концентратора. Приведены примеры описания напряженно-деформированного состояния в процессе нагружения совокупностью локальных перемещений при упругом и упруго-пластическом поведении идеального упруго-пластического материала и металла с деформационным упрочнением для разных видов и размеров образцов, разных схем нагружения. Проведенные решения показывают, что локальные перемещения нелинейно изменяются с ростом нагрузки, выраженной в виде упругого коэффициента интенсивности напряжений. Схема нагружения, размеры образца, упрочняемость металла оказывают заметное влияние на уровень локальных перемещений при равных коэффициентах интенсивности напряжений. Если предположить, что разрушение металла обусловлено уровнем достигнутых деформаций вблизи вершины, то разрушение в случае растяжения произойдет при меньших значениях коэффициента интенсивности напряжений, чем при изгибе.

При упругом нагружении D - критерий может использоваться наравне с другими критериями линейной механики разрушения, такими как коэффициенты интенсивности напряжений, но подход, основанный на D - критерии, отличается от общепринятых большей общностью и наглядностью.

Получены решения ряда упругих задач по определению напряженно-деформированного состояния у концентраторов, свойственных сварным соединениям с лобовыми швами, результаты решения которых представлены в виде функций локальных перемещений, что позволило в единой форме описать напряженно-деформированное состояние у острых вырезов с разными углами при вершине и у трещиноподобных дефектов. Использование локальных перемещений позволяет не принимать во внимание радиус закругления у концентраторов, т.е. дает интегральную оценку напряженно-деформированного состояния у концентратора.

Наибольшие локальные перемещения для концентраторов в нахлесточных соединениях с угловыми швами (рис. I) возникают, в зависимости от размеров соединения, схемы нагружения и распределения силового потока, на базах AC_1 , AC_2 , AB и BE_1 , BE_2 . В соединениях со швами, передающими весь силовой поток или большую его часть, наиболее опасной является точка перехода от шва к основному металлу (точка B, рис. I). В тех случаях, когда швы не передают силового потока, а также, когда передается сжимающая нагрузка, наибольшая концентрация напряжений возникает у корня шва.

Решения, проведенные для сварных соединений с лобовыми швами с глубоким проплавлением и выпуклой границей шва, показали, что наибольшие локальные перемещения незначительно различаются для обыкновенных швов и выпуклых швов, близких между собой по размерам.

Глава 5. Практическое использование критерия локального перемещения

Дано описание метода моделирования напряженно-деформированного состояния металла вблизи вершины трещиноподобного дефекта с использованием критерия локального перемещения, который применяется в ОЛ МВТУ им. Н.Э. Баумана для оценки конструкционно-технологической трещиностойкости при термообработке крупных сварных валков из сталей 55Х2МФБ и 65ХЗМФА.

Показано, что трещиностойкость металла может быть определена с использованием подхода, основанного на D - критерии, на образцах, разрушение которых сопровождается значительными пластическими деформациями. Для электрошлакового сварного соединения из стали 20ХЗНМ получены критические значения локального перемещения, равные $0,0315 \pm 0,0019$ мм, соответствующие для данной стали критическим значениям коэффициента интенсивности напряжений, равным $187 \pm 8 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$.

С использованием критерия локального перемещения проведено исследование концентрации напряжений в сварных соединениях с угловыми швами. При упругом поведении металла могут быть введены понятия локального напряжения (6) и коэффициента локальной концентрации напряжений (7).

$$\sigma_D = DE/r \quad (6)$$

$$\alpha_D = \sigma_D / \sigma \quad (7)$$

где l — длина базы, на которой измеряется локальное перемещение, E — модуль упругости, σ — номинальное напряжение. В соответствии с рис. 1 определялись коэффициенты локальной концентрации напряжений: K_{D1} — на базе BE_1 , K_{D2} — на базе BE_2 и т.д. для различных размеров сварного соединения при разных схемах нагружения. Отношение толщины накладки к толщине основной пластины S_2/S_1 варьировалось в диапазоне от 0,4 до 1,2. Для каждого значения S_2/S_1 решались задачи с разными катетами. Толщина основной пластины менялась от 5 до 50 мм. Получены зависимости K_D от K/S_1 для разных соотношений S_2/S_1 у точки перехода от шва к основному металлу (рис. 2). Увеличение катета приводит для нагруженных швов (кривые 1) к уменьшению K_D , причем наименьшее значение коэффициента концентрации дают соединения с толщиной накладок, равной катету. Для ненагруженных швов значения K_D , наоборот, возрастают с ростом катета (кривые 2). Толщина накладок в этом случае не оказывает влияния на K_D .

Локальная концентрация напряжений определялась также в корне шва при различных схемах нагружения и передачи силового потока. Получены зависимости коэффициентов концентрации напряжений от толщины основной пластины S_1 . На основе полученных решений построена система номограмм.

Данные о коэффициентах локальной концентрации напряжений использованы совместно с Дубровским В.А. при определении характеристик выносливости сварных соединений с угловыми швами. По значениям пределов выносливости σ_0 для ряда сварных соединений из низкоуглеродистых и низколегированных сталей, изменяющимся в диапазоне от 35 до 200 МПа, и коэффициентам локальной концентрации напряжений K_D определены локальные пределы выносливости σ_{D0} .

$$\sigma_{D0} = K_D \sigma_0 \quad (8)$$

В отличие от σ_0 значения локального предела выносливости σ_{D0} мало зависят от толщины металла, соотношений размеров соединения, катетов швов, схемы нагружения. Для рассмотренных соединений значения локальных пределов выносливости при $N = 2 \cdot 10^6$ циклов изменяются в диапазоне от 270 до 459 МПа. Среднее значение равно 358 МПа, среднее квадратическое отклонение — 50 МПа.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан комплекс программ для расчетного определения напряженно-деформированного состояния сварных соединений с концентраторами для случаев упругого и упруго-пластического деформирования при изотермическом и неизотермическом нагружении, который включает в себя метод граничных коллокаций, метод граничных интегральных уравнений и метод конечных элементов. Указанные программы позволяют определять коэффициенты интенсивности напряжений и деформаций, коэффициенты концентрации напряжений и другие критерии напряженно-деформированного состояния у концентраторов.

2. Для учета специфических особенностей напряженно-деформированного состояния сварных соединений в алгоритмы, реализующие указанные выше методы, внесены некоторые усовершенствования, обеспечивающие необходимую точность и эффективность расчетов при решении сварочных задач. При определении коэффициентов интенсивности напряжений применялся алгоритм, основанный на двухэтапном решении методом граничных интегральных уравнений и методом граничных коллокаций. Для метода конечных элементов реализован в виде набора программ численный алгоритм, основанный на дифференциальной форме уравнений движения конечного элемента и уравнений состояния, что позволило охватить широкий класс задач с различными упруго-пластическими свойствами металла, зависящими от деформационного упрочнения, температуры и времени.

3. Разработаны программы автоматизированной подготовки данных для решения задач вышеуказанными методами.

4. Решен ряд тестовых задач, сопоставление результатов решения которых с известными аналитическими и численными результатами свидетельствует об удовлетворительной точности разработанных алгоритмов и программ.

5. С использованием метода граничных интегральных уравнений и метода граничных коллокаций исследованы зависимости коэффициентов интенсивности напряжений от формы сварного стыкового соединения с непроваром и от геометрических параметров образца с V - образным вырезом.

6. Методом конечных элементов проведено определение напряженно-деформированного состояния вблизи вершины трещиноподобного концентратора для различных схем упруго-пластического нагружения.

видов и размеров образцов. На стали 20ХЗНМ показана возможность определения критических коэффициентов интенсивности напряжений на образцах, разрушающихся после значительного пластического деформирования.

7. Получены зависимости распределения локальных перемещений для концентраторов, свойственных сварным соединениям с угловыми швами, для различных случаев передачи силового потока, а также для соединений с лобовыми швами с глубоким проплавлением и выпуклой границей шва. Показано, что для упругого поведения металла параметром напряженно-деформированного состояния вблизи концентраторов, характерных для сварных соединений с угловыми швами, может служить коэффициент локальной концентрации напряжений. Определены зависимости коэффициентов локальной концентрации напряжений и построены номограммы для широкого диапазона размеров элементов соединений, позволяющие осуществлять выбор оптимальных в отношении концентрации напряжений размеров соединений.

8. Для ряда сварных соединений с лобовыми швами из низкоуглеродистых и низколегированных сталей определены локальные пределы выносливости с учетом концентрации напряжений в соединениях.

9. Результаты расчетов концентрации напряжений в угловых швах использованы для построения номограмм в разрабатываемом методе расчета сварных соединений с угловыми швами на выносливость. ПО "Атомаш" передан комплекс программ по расчету напряженно-деформированного состояния при электрошлаковой сварке изделий оборудования АЭС, используемый для оптимизации технологических процессов ЭШС; ожидаемый экономический эффект - 86 тыс. руб. в год.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Исследование напряженно-деформированного состояния, возникающего при изготовлении и эксплуатации сварных соединений с концентраторами, может быть осуществлено численно с использованием ЭВМ на базе применяемых в механике сплошных сред методов граничных коллокаций, граничных интегральных уравнений и конечных элементов с учетом особенностей, характерных для сварочных задач.

2. Напряженно-деформированное состояние сварных соединений с трещиноподобными дефектами, характеризующееся при упругом нагружении коэффициентом интенсивности напряжений, существенно за-

висит от геометрических параметров соединения. Для сварного стыкового соединения с неповаром увеличение размеров усиления на $25 + 30 \%$ приводит к уменьшению коэффициента интенсивности напряжений на $16 + 18 \%$.

3. Напряженно-деформированное состояние у вершины острого концентратора может быть описано совокупностью локальных перемещений по различным направлениям. Наиболее отчетливо преимущества критерия локального перемещения проявляются в отношении сложного процесса неизотермического деформирования металла вблизи трещины при испытаниях на конструктивно-технологическую трещиностойкость и количественном описании уровня концентрации напряжений в сварных соединениях с угловыми швами для расчетов их на усталостную прочность.

4. Локальные перемещения, описывающие напряженно-деформированное состояние вблизи вершины трещины при упруго-пластическом нагружении, нелинейно изменяются с ростом нагрузки, выраженной в виде упругого коэффициента интенсивности напряжений, причем для разных схем нагружения, размеров образцов и свойств металла изменение локальных перемещений в зависимости от коэффициента интенсивности напряжений происходит различно.

5. Подход с применением критерия локального перемещения может быть использован при определении параметров трещиностойкости металла на образцах небольших размеров, разрушающихся после значительного пластического деформирования.

6. Концентрация напряжений в сварных соединениях с угловыми швами существенным образом зависит от размеров элементов соединения и схемы передачи силового потока. Для соединений с лобовыми швами наибольшая концентрация напряжений может возникать как у корня шва, так и в зоне перехода шва к основному металлу. При этом увеличение катета шва приводит к уменьшению концентрации напряжений для нагруженных швов, передающих силовой поток, и к увеличению концентрации для связующих швов, не передающих силового потока.

7. Существующие методы расчета сварных соединений на выносливость учитывают концентрацию напряжений недостаточно полно. Использование коэффициента локальной концентрации напряжений K_D , определяемого по номограммам, и понятия локального предела выносливости позволяет построить метод расчета сварных соединений на выносливость с учетом концентрации напряжений, зависящей от тол-

щины металла и размеров швов.

Основное содержание диссертации отражено в работах:

1. Аладинский В.В. Вычисление коэффициента интенсивности напряжений для стыкового сварного соединения с непроваром Изв. ВУЗов. Машиностроение.- 1980.- №10.- С. 13-16.
2. Аладинский В.В., Маханев В.О. Применение метода конечных элементов для решения некоторых нелинейных задач механики деформируемого твердого тела / Ин-т машиновед. М., 1985.- ч.1.- С. 168-172. - Деп. в ВНИТИ 13.12.85, № 8634-В.
3. Аладинский В.В., Павлович А.А., Винокуров В.А. Разработка метода определения сварочных напряжений // В сб.: Остаточные технологические напряжения: Труды II Всесоюзного симпозиума. - М., 1985.- С. 28-31.
4. Аладинский В.В., Винокуров В.А. Определение концентрации напряжений в сварных соединениях с угловыми швами // Изв. ВУЗов. Машиностроение.- 1986.- № 10.- С. 104-106.

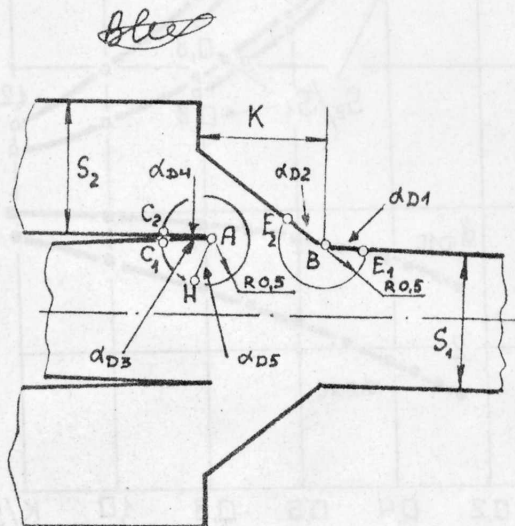


Рис. 1. Расположение в сварном соединении с угловыми швами баз для определения коэффициентов локальной концентрации напряжений

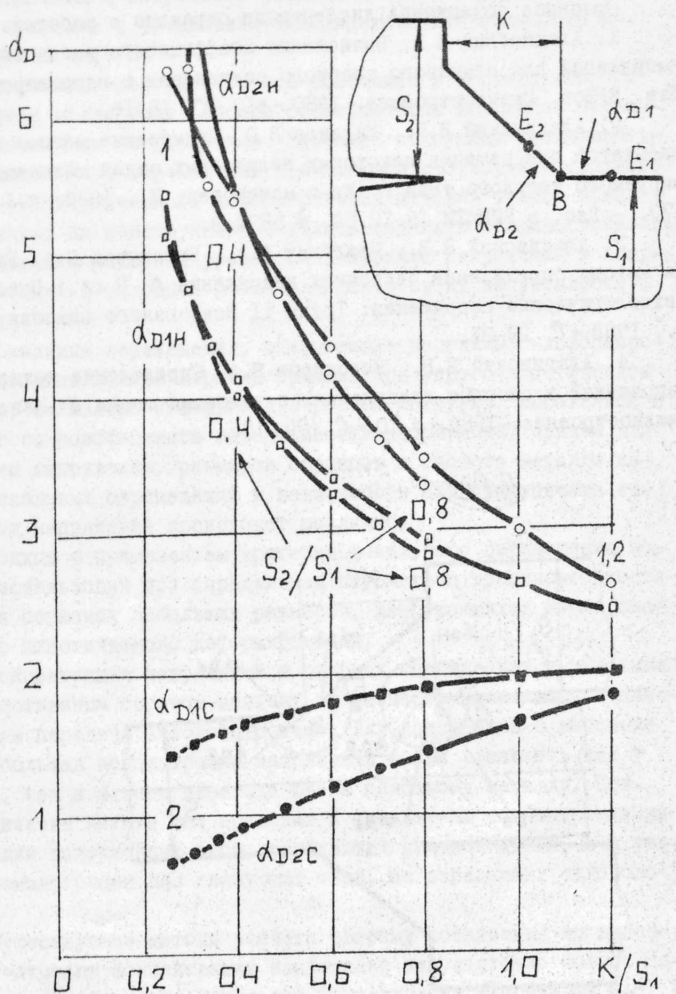


Рис. 2. Коэффициенты локальной концентрации напряжений в зоне перехода от шва к основному металлу