

М87286

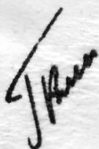
МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ
РЕВОЛЮЦИИ И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Э.БАУМАНА

На правах рукописи

ПЛИС Геннадий Владимирович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УДЕЛЬНОЙ
ЭНЕРГИИ ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ И
АНАЛИЗА ГЕОМЕТРИИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

05.09.06 - Технология и машины сварочного производства



АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

МОСКВА - 1993

Работа выполнена в Московском ордена Ленина и ордена Трудового
Красного знамени институте инженеров железнодорожного транспорта имени
Ф.Э.Дзержинского

Научный руководитель - доцент, к.т.н. ПЕТРОВ С.Ю.

Официальные оппоненты - проф., д.т.н. Сагалевич В.М.

- к.т.н. Давряков Ю.Ю.

Ведущее предприятие - ВНИИТ

Защита состоится "10" июня 1993г. на заседании специализирован-
ного Совета К053.15.02 в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской
Революции и ордена Трудового Красного Знамени государственном техни-
ческом университете имени Н.Э.Баумана по адресу:

107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

Ваш отзыв на автореферат в 1 экз., заверенный печатью, просим вы-
слать по указанному адресу.

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

Автореферат разослан "28

Ученый секретарь специализиро

к.т.н., доцент

Подписано к печати 26.04.93

Заказ № 49 Типография МГТ

487286

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Изыскание практических путей обеспечения требуемой прочности сварных соединений с минимальными затратами труда, сварочных материалов и электроэнергии - важная задача сварочной техники и технологии. Одним из таких путей является придание сварным соединениям рациональной геометрии. Последнее приводит к необходимости разработки соответствующей методики оценки прочности, позволяющей, в отличие от существующих, более полно учитывать особенности распределения напряжений в сварных соединениях в зависимости от параметров их геометрии.

Вагоны, мосты, корабли, самолеты и другие ответственные сооружения - вот далеко не полный перечень сварных конструкций, разрушение которых вызывает значительный материальный ущерб и человеческие жертвы. В связи с этим проблема обеспечения высокой надежности указанных конструкций обращает на себя особое внимание. Типичная и основная форма предельного состояния сварных конструкций - разрушение или повреждение как результат развития трещин от концентраторов. Поэтому, в последнее время теоретической основой для прогнозирования работоспособности и надежности конструкций служат вычислительные методы механики разрушения, на базе которых широкое развитие получила теория предельных состояний, позволившая приблизить результаты расчетов на прочность к уровню реальной прочности конструкции.

Таким образом, совершенствование методов оценки предельных состояний, способствующее максимальному сближению конструктивной и расчетной прочности сварных соединений и приданию им рациональной геометрии, является актуальной научной задачей.

Целью работы являлось повышение несущей способности сварных соединений и точности оценки их прочности на основе компьютерного моделирования, комплексного анализа опасности имеющихся концентраторов и учёта влияния геометрии сварного шва и свариваемых элементов.

Методы исследования. Расчетные методы включали в себя интегрирование дифференциальных уравнений механики деформируемого твердого тела методом конечных элементов, вычислительные методы механики разрушения, методы теории подобия и моделирования, методы корреляционного и регрессионного анализа, методы проектирования программных систем.

Экспериментальный метод состоял в испытании лабораторных образцов на статическое одноосное растяжение.

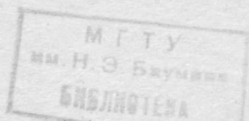
Научная новизна работы связана с совершенствованием со-

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1087286

Плис Г.В. Разработка методов



временного подхода механики разрушения, основанного на использовании удельной (плотности) энергии деформации, и его применением к раскрытию закономерностей наступления предельного состояния разрушения в сварных соединениях, имеющих следующий ряд особенностей:

- нагружены статически;
- имеют концентраторы напряжений, которые могут быть приняты как предельно острые;
- изготовлены из материалов, при разрушении которых в рассматриваемых условиях работы соединения стабильное подрастание трещины незначительно (практически, это те материалы, для которых удаётся установить значение K_{Ic}).

Установлено, что:

1. Предлагаемый расчетный коэффициент плотности энергии деформации S^p адекватно отражает опасность предельно острых концентраторов и может использоваться для оценки прочности рассматриваемых сварных соединений. На его основе предложена методика оценки статической прочности сварных соединений, позволяющая, в отличие от существующих, проводить комплексный анализ опасности имеющихся концентраторов и учитывать влияние геометрии сварного шва и свариваемых элементов.

2. Применительно к концентраторам сварных соединений независимость S^p от радиуса вычисления r (отклонение менее 5%) соблюдается в том случае, когда $r < 0.15b$, где b - наименьший из характерных размеров сечения сварного шва.

3. Повышение несущей способности сварных соединений и точности оценки их прочности возможно посредством комплексного анализа опасности имеющихся концентраторов с позиции одновременности наступления предельного состояния них и учета влияния геометрии сварного шва и свариваемых элементов.

4. Характер разрушения сварных соединений с трещиноподобным дефектом (посредством "отрыва" или "сдвига") может распознаваться по углу распространения трещины согласно известным зависимостям, установленным ранее в механике разрушения.

Практическая ценность.

1. Разработаны математические модели, алгоритмы и программы, реализующие МКЭ и позволяющие:

- решать упругопластические задачи по деформационной теории пластичности и теории течения с учетом геометрической нелинейности, неоднородности механических свойств и сингулярности напряжений у вершины концентраторов;
- производить численный анализ уровня опасности концентраторов на

основе расчета раскрытия в вершине трещины COD, локального перемещения D, контурного J-интеграла и предложенного коэффициента плотности энергии деформации;

- визуализировать схемы и результаты расчета в графическом виде с учетом возможности получения "твердой" копии в системе AutoCAD.

2. Для ряда сварных соединений различных видов показано, каким образом значительное повышение их прочности может быть достигнуто путём разгрузки наиболее опасного концентратора и загрузки менее опасных за счет изменения геометрических параметров сварного шва и свариваемых элементов.

3. Для стали Ст.3 на основе корреляционного и регрессионного анализа экспериментальных данных получено выражение, позволяющее при статическом нагружении рассчитывать угол разрушения лобового шва нахлесточных соединений в зависимости от параметров их геометрии.

4. Разработаны рекомендации по численной методике оценки статической прочности и анализу геометрии сварных соединений.

Апробация работы. Основные результаты данной работы были рассмотрены и одобрены на научном семинаре кафедры "Технология сварки, материаловедение и износостойкость деталей машин" МИИТа (9.03.93г.) и дважды на научных семинарах кафедры "Машины и автоматизация сварочных процессов" МГТУ им. Н.Э.Баумана (24.04.91г. и 12.03.93г.).

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 182 страницах машинописного текста, содержит 59 рисунков, 19 таблиц и 80 наименований литературных источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение

Дано обоснование актуальности выполненного исследования и представлены основные положения, вынесенные на защиту.

Глава 1. Состояние вопроса и постановка задач исследований

Существующие в настоящее время методы оценки прочности сварных соединений не всегда учитывают присущие последним особенности напряженно-деформированного состояния (НДС), условий работы, геометрии, схемы приложения нагрузок и ряд других факторов. В тоже время актуальным остается вопрос о создании рациональных сварных конструкций под углом зре-

ния требований металлоемкости, качества, надежности путем уточнения инженерных расчетов прочности и рационализации форм конструкций с использованием ЭВМ и САПР.

С целью сближения расчетной и конструкционной прочности сварных соединений в последнее время для анализа их работоспособности интенсивно разрабатываются методы использования наиболее распространенных критериев механики разрушения (МР).

У большинства металлов в вершине трещины развивается зона пластических деформаций, которая поглощает энергию и приводит к перераспределению напряжений, а следовательно к изменению несущей способности сварных конструкций. Во многих практических приложениях размеры пластической зоны у вершины концентратора сварного соединения становятся настолько большими, что предположение о малости эффекта текучести и наличия асимптотики становятся уже несправедливыми. Поэтому использование методов линейной МР и, в частности, коэффициентов интенсивности напряжений в этих случаях может быть не совсем корректным.

Для описания характеристик трещиностойкости в условиях значительной текучести наиболее широкое применение сейчас находят такие основные параметры механики разрушения, как раскрытие в вершине трещины σ_D , J -интеграл, локальное перемещение D , предельная поглощенная удельная энергия деформации ASPEF и коэффициент плотности энергии деформации S . Сравнительный анализ указанных критериев показал, что для оценки прочности сварных соединений перспективным представляется использование критерия плотности энергии деформации в сочетании с результатами, полученными для ASPEF-критерия. Таким образом, использование удельной энергии деформации позволяет:

- описывать поведение материала как в гладких образцах, так и в зонах плавных и предельно острых концентраторов;
- определять предельную нагрузку, соответствующую зарождению трещины, ее росту и неустойчивому распространению;
- прогнозировать работоспособность конструкции при усталостном нагружении;
- определять направление распространения произвольно ориентированной в пространстве трещины, величину "скачка" развивающейся трещины, а также в рамках единого подхода дать анализ развития зон пластичности у концентраторов напряжений;
- решать конкретную прочностную задачу по оценке статической работоспособности сварных соединений расчетным путем с использованием обычных механических характеристик материала (диаграмма растяжения, K_{IC}).

Несмотря на то, что эксперимент по-прежнему играет очень важную роль, во всем мире при проектировании отчетливо проявляется тенденция

ко все более широкому использованию вычислительных методов. Эта тенденция во многом связана с соображениями экономии. Удешевление оказывается еще более значительным, если учесть дальнейшее развитие численных методов. Анализ основных подходов к определению НДС сварных соединений показал, что наиболее полная и точная информация может быть получена на основе численного решения упругопластической задачи по методу конечных элементов (МКЭ) с учетом геометрической нелинейности и сингулярности напряжений у концентраторов.

Согласно рекомендациям различных нормативных документов по расчету и проектированию промышленных конструкций и деталей машин (например, вагонов) основными являются расчеты, проводимые при статических нагрузках (или динамических, приводимых через коэффициент динамики к статическим), так как именно они определяют размеры несущих элементов конструкции. Расчеты на усталость не могут быть проекторочными и являются вспомогательными, то есть проверочными. Их рекомендуют проводить для узлов конструкций, работающих в условиях длительного и интенсивного вибрационного нагружения. Таким образом, основное внимание в данной работе уделяется совершенствованию методов оценки предельных состояний при статическом нагружении.

На основании вышеизложенного для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработать алгоритмы и программы, позволяющие производить численный расчет НДС конструкций и вычисление на его основе параметров механики разрушения.
2. Исследовать возможности использования удельной энергии деформации для количественной оценки опасности концентраторов напряжений.
3. Изучить кинетику опасности концентраторов сварных соединений в зависимости от их геометрии и схемы передачи силового потока.
4. Провести экспериментальные исследования по анализу влияния геометрии сварных соединений на их статическую прочность и траекторию разрушения.
5. Разработать методику использования удельной энергии деформации для оценки прочности и анализа геометрии сварных соединений.

Глава 2. Численный анализ напряженно-деформированного состояния сварных соединений

Для корректного определения различных параметров механики разрушения даже в случае образцов, имеющих простую конфигурацию, необходимо проводить упругопластический анализ. С этой целью было разработано соответствующее программное обеспечение, ориентированное на аппаратные

возможности персональных компьютеров фирмы IBM. В качестве инструментальных средств использовались объектно-ориентированные языки Turbo Pascal, Borland C++, а также Microsoft Fortran. Некоторые, критические по времени выполнения, модули были написаны на языке Turbo Assembler.

Ниже перечислены основные возможности разрабатываемых программ.

1. Для упругопластических задач можно использовать как теорию течения, так и деформационную теорию пластичности. В качестве условия текучести применяется условие Мизеса.

2. Упругопластические задачи могут решаться методом последовательного наращивания нагрузки с учетом геометрической нелинейности или методом переменных параметров упругости.

3. Для каждого элемента при решении задач на каждой итерации могут рассчитываться тензор напряжений и деформаций, интенсивность напряжений и деформаций, плотность энергии деформации, толщина элементов (для плоского напряженного состояния), а также энергия деформации всего тела.

4. Значения функций, рассчитанные внутри элемента, для удобства в дальнейшей работе с ними разносятся по узлам сетки.

5. Анализ НДС можно производить на основе расчета таких параметров механики разрушения, как раскрытие в вершине трещины COD, локальное перемещение D , контурный J -интеграл, коэффициент плотности энергии деформации $\overline{S^p}$.

6. В процессе решения задач формируется исходная информация для графического постпроцессора, который осуществляет визуализацию схем и результатов расчета. При этом возможно дублирование выводимой на экран информации в систему автоматизированного проектирования AutoCAD с целью получения "твердой" копии и разработки программ для изготовления рассматриваемой детали на станках с ЧПУ.

На основании проведенного анализа концепций Дж.Си, П.Теокариса, Л.Жилемота, Н.Андрианопулоса и других был предложен новый подход по использованию удельной (плотности) энергии деформации в качестве параметра механики разрушения для оценки работоспособности сварных соединений. Сущность этого подхода заключается в том, что в качестве правой части используется предельное значение коэффициента плотности энергии деформации S_c , а в качестве левой - значение расчетного коэффициента плотности энергии деформации S^p . Таким образом, условие прочности характеризуется следующим неравенством: $S^p < S_c$.

Значение параметра S_c является характеристикой материала и не зависит от угла ориентации трещины по отношению к направлению прикладываемой нагрузки, что позволяет оценивать поведение материала у вершины концентратора при различных сочетаниях K_1 и K_2 :

$$S_c = W_c r_c = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)K_{Ic}^2}{2\pi E} = \frac{(2(1-\nu)-\nu^2)(1+\nu)K_{Ic}^2}{6\pi E}, \quad (1)$$

где для данного материала K_{Ic} и K_{IIc} - критические коэффициенты интенсивности напряжений, ν и E - соответственно коэффициент Пуассона и модуль Юнга, W_c - предельная поглощенная удельная энергия деформации, r_c - критический радиус.

Величина W_c представляет собой площадь под истинной диаграммой деформирования материала и может быть рассчитана непосредственно по экспериментальным данным. В Венгрии метод определения W_c стандартизован - MSZ 4929-76.

Таким образом, определение критического значения коэффициента плотности энергии деформации возможно по любой из зависимостей, представленных в формуле (1) исходя из известных механических характеристик рассматриваемого материала.

Расчетное значение коэффициента ПЭД S^p - это произведение численно определенного на некотором радиусе значения удельной энергии деформации W на величину этого радиуса r . При этом в качестве удельной энергии деформации можно принимать как минимальное значение на указанном радиусе

$$S_{\min}^p = W_{\min} r, \quad (2)$$

так и среднее

$$\overline{S^p} = \overline{W} r. \quad (3)$$

В данном случае W рассчитывается по следующей зависимости:

$$W = \int_0^{\epsilon} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}, \quad (4)$$

где σ_{ij} и ϵ_{ij} - соответственно тензор напряжений и деформаций в рассматриваемой точке.

НДС окрестности вершины трещины в настоящее время широко известно под названием НКР-поля — по имени авторов работ Хатчинсона, Райса и Розенгринга. Найденные ими в рамках деформационной теории пластичности аналитические решения имеют асимптотику $\frac{1}{r}$ в распределении плотности энергии деформации W . Очевидно, что произведение $W \cdot r$ (т.е., значение параметра S^p) должно оставаться величиной постоянной.

Проведенные численные исследования показали, что применительно к концентраторам сварных соединений независимость S^p от радиуса вычисления (отклонение менее 5%) соблюдается в том случае, когда $r < 0.15b$. Здесь b - наименьший из характерных сечения сварного шва.

Результаты численных исследований, проведенных на модели пластины с краевой трещиной при различных вариантах нагружений показали, что хотя средние значения $(\bar{S}^p)_{cp.}$ и $(S_{min}^p)_{cp.}$ для вычисленных на различных радиусах значений $\bar{S}^p$ и S_{min}^p практически совпадают, значения $\bar{S}^p$ более стабильны и имеют меньший разброс. Причем, по сравнению с контурным J -интегралом, независимость $\bar{S}^p$ от радиуса вычисления выражена более четко.

Указанное свойство расчетного коэффициента ПЭД позволяет вычислять его на укрупненных разбивках, что значительно снижает время расчета и объем обрабатываемой информации.

Таким образом, для повышения точности оценки НДС у вершины концентратора в качестве параметра $\bar{S}^p$ целесообразно принимать среднее значение для вычисленных по различным радиусам.

Далее в работе было изучено изменение уровня опасности концентраторов сварных соединений 4-х основных видов (стыковые, тавровые, угловые и нахлесточные) в зависимости от изменений параметров их геометрии и схемы передачи силового потока. Показано, каким образом значительно, экономически эффективное, повышение прочности сварных соединений может быть достигнуто путем варьирования целого ряда геометрических характеристик сварного шва и свариваемых элементов.

Повышение прочности сварного шва в данном случае обуславливается благоприятным смещением загруженности сечения шва в сторону безопасных концентраторов с целью разгрузки наиболее опасного, определяющего прочность сварной конструкции в целом. То есть, в качестве характерного признака достигнутой равномерной работы и максимальной прочности сварного шва следует принимать одновременное наступление предельного состояния в его наиболее опасных концентраторах.

Например, широко распространено мнение о том, что увеличение выпуклос и углового шва приводит к снижению его статической и циклической прочности вследствие увеличения концентрации напряжений в месте перехода от металла шва к основному металлу. Это действительно так, если учитывать, что шов выполнен с полным проваром и трещиноподобный концентратор в корне шва отсутствует. Однако, при наличии такого трещиноподобного концентратора (например, концентратор А в нахлесточном соединении - рис. 1) картина опасности концентраторов значительно меняется. В этом случае, как показали исследования, наиболее опасным концентратором является трещиноподобный дефект в корне шва, а не V-образный вырез (концентраторы В или С - рис. 1) в месте перехода от металла шва

к основному металлу (что вполне логично, так как трещина, как правило, всегда опаснее, чем менее выраженный концентратор - V-образный вырез). Увеличение выпуклости в данном случае действительно приводит к загрузке (увеличению опасности) концентратора В в зоне перехода от металла шва к основному металлу. Но при этом, что особенно важно и ранее не учитывалось, разгружается наиболее опасный трещиноподобный концентратор А в корне шва. А поскольку именно этот концентратор определяет прочность сварного соединения в целом, то его разгрузка (вследствие выравнивания напряжения по сечению шва и загрузки менее опасного концентратора) непосредственно способствует повышению как статической так и циклической работоспособности сварного соединения. Аналогичный эффект достигается и при изменении геометрии свариваемых элементов - использовании, например, подгиба накладки (образующегося после резки металла на пресс-ножницах). Как показали исследования, при определённых сочетаниях параметров геометрии рассматриваемых соединений возможна ситуация, когда наиболее загруженные концентраторы А и В становятся равноопасными, что соответствует достигнутой максимальной прочности сварного шва. Такого же типа результаты получены в работе и для других видов соединений.

Глава 3. Экспериментальные исследования статической прочности сварных соединений

Для проверки адекватности предлагаемого подхода и отработки точности расчетной методики определения статической прочности сварных соединений были проведены соответствующие экспериментальные исследования на статическое одноосное растяжение лабораторных образцов с целью определения для них разрушающей нагрузки. Образцы (всего 9 типов) изготавливались из простой, дешевой, хорошо освоенной металлургической промышленностью, стали Ст.3. Для уточнения ее механических характеристик, ранее и в дальнейшем используемых при численном моделировании, использовались цилиндрические образцы типа 1. Исследования образцов типа 2-5 показали, что как в случае отсутствия концентратора напряжений, так и при его наличии, статическая прочность материала в зоне разрушения у сварных образцов по сравнению с обычными (несварными) на 5-10% выше. Следовательно, неучет остаточных напряжений и реальных механических характеристик металла шва и околошовной зоны приводит к тому, что значения предельной нагрузки, рассчитанные в результате численного моделирования соединения из Ст.3, могут быть несколько ниже реальной, экспериментально установленной разрушающей нагрузки. Образцы типа 6-9 рассматривались с целью количественного сравнения в дальнейшем результатов расчета и эксперимента, и представляли собой четыре основных вида соединений - стыковые, тавровые,

угловые, нахлесточные, математическая модель которых численно рассматривалась ранее. Исследования этих образцов показали, что при одинаковых геометрических параметрах и прочих равных условиях наиболее прочный лобовой шов нахлесточного соединения, затем таврового и наименее прочный - лобовой шов углового соединения.

Другой важной задачей экспериментальных исследований являлось определение влияния геометрии сварных соединений на их прочность и траекторию разрушения. Проведенные численные исследования показали, что изменение геометрических параметров сварного соединения может оказывать значительное влияние на НДС последнего. Для экспериментальной проверки численно установленных зависимостей использовались образцы, представляющие собой нахлесточное соединение с различными параметрами геометрии сварного шва и свариваемых элементов. Результаты экспериментальных исследований по определению статической прочности нахлесточных соединений в зависимости от параметров их геометрии позволяют сделать вывод о том, что между расчетными и экспериментальными данными наблюдается полное качественное соответствие, позволяющее использовать параметр $\bar{S}^p$ для выбора рациональной формы сварных соединений.

Для стали Ст.3 на основе корреляционного и регрессионного анализа экспериментальных данных получено уравнение, которое позволяет определить численное значение направления разрушения нахлесточного соединения при статическом нагружении в зависимости от параметров его геометрии. Показано, что лобовой шов нахлесточного соединения в общем случае работает в равной степени как на "сдвиг", так и на "отрыв", что характеризуется углом разрушения 25-60°. Разрушение указанного шва посредством чистого "сдвига" согласно классической механики разрушения должно сопровождаться углом разрушения около 80°. Таким образом, методики оценки прочности угловых швов, не учитывающие работу последних на "отрыв", могут приводить к значительному расхождению между расчетной и реальной прочностью сварных соединений.

Глава 4. Использование удельной энергии деформации для оценки прочности и анализа геометрии сварных соединений

С целью количественной оценки погрешности расчета статической прочности сварных соединений на основе предлагаемого $\bar{S}^p$ -подхода в сравнении с погрешностью расчета по другим существующим методикам рассчитывалась предельная нагрузка для соединений, реальная статическая прочность которых определялась экспериментально на образцах типа 6-9 (глава 3).

Для расчетного определения статической прочности сварных соединений на основе предлагаемого подхода использовалось упругопластическое решение по теории течения с учетом геометрической нелинейности и механических характеристик материала, уточненных на образцах типа 1 (глава 3). Проведенные ранее численные и экспериментальные исследования показали, что прочность рассматриваемых сварных соединений определяется прочностью локальной области в зоне наиболее опасного трещиноподобного концентратора в корне шва. То есть, в качестве разрушающей принималась нагрузка, соответствующая наступлению предельного состояния (согласно предложенному в главе 2 условию прочности) у вершины "непровара" корня шва.

Для сравнения определялась также статическая прочность рассматриваемых соединений на основании использования методик СНиП, разработанного А.С.Куркиным (МГТУ им. Н.Э.Баумана) и позволяющего учесть направление вектора нагрузки метода расчета на прочность сварных соединений с угловыми швами, а также предложенного Н.Л.Зайцевым (ИЭС им. Е.О.Патона) метода определения предельной нагрузки для лобовых швов. Погрешность каждой методики определялась процентным отношением расчетной прочности соединений от реальной (средней разрушающей нагрузки для испытанных образцов каждого типа). Основные результаты по исследованию точности используемых методик представлены в табл. 1. Из анализа указанной таблицы видно, что использование предложенного подхода позволяет получить более точное решение для различных видов соединений, хотя для этого необходим пройти достаточно сложную процедуру численного моделирования.

Таблица 1

Погрешность определения статической прочности сварных соединений по различным методикам

Поз.	Тип соединения	Расчетные методики								Экспер.
		СНиП		МГТУ		ИЭС Патона		SP		
		$P_{разр.}$	Погр.	$P_{разр.}$	Погр.	$P_{разр.}$	Погр.	$P_{разр.}$	Погр.	
		кг.	%	кг.	%	кг.	%	кг.	%	
1	Стыковое	15960	0.03	—	—	—	—	13105	18.02	15985
2	Тавровое	5586	54.59	6303	48.75	15357	24.85	13525	9.96	12300
3	Угловое	2793	46.64	552	35.98	7679	46.68	4950	5.44	5235
4	Нахлесточн.	5586	62.14	8379	44.05	15357	2.55	11300	24.54	14975

Таким образом, предложенная методика оценки статической прочности сварного соединения предусматривает следующую последовательность операций:

1. Определяется критическое значение коэффициента плотности энергии деформации S_c по формуле (1).

2. Определяется расчетное значение коэффициента плотности энергии деформации $\overline{S^p}$ по формуле (3).

3. Сравниваются значения S_c и $\overline{S^p}$. Если $\overline{S^p} > S_c$, то у вершины концентратора начнется разрушение материала. В противном случае - материал указанную нагрузку выдержит.

Параметр $\overline{S^p}$ может использоваться не только для анализа статической прочности, но и для выбора рациональной геометрии сварных соединений в случае как статического, так и усталостного нагружения. Ранее традиционным критерием качества (рациональности) геометрии сварных соединений являлся коэффициент концентрации напряжений или коэффициент концентрации деформаций. Между ними и сопротивлением усталости элементов конструкции (эффективным коэффициентом концентрации напряжений) существует однозначная, хотя и не прямопропорциональная зависимость. При возникновении текучести в материале названные величины перестают совпадать и их необходимо рассматривать отдельно. Использование удельной энергии деформации позволяет избежать указанных недостатков и в рамках единого подхода дать анализ увеличения уровня НДС у вершины концентратора как в упругой области, так и в пластической. То есть, увеличение $\overline{S^p}$ в упругой области соответствует увеличению концентрации напряжений, а в пластической - увеличению концентрации деформаций. Кроме того, использование параметра $\overline{S^p}$ по сравнению с коэффициентом концентрации напряжений или деформаций более предпочтительно вследствие его достаточной нечувствительности к типу разбоя и размерам элементов у вершины концентратора, а также независимости от радиуса вычисления.

В работе показано, каким образом, следуя концепции Дж.Си, параметр $\overline{S^p}$ может также использоваться непосредственно для прогнозирования работоспособности конструкции в условиях усталостного нагружения. Однако, это направление исследований выходит за рамки данной работы и автором более детально не рассматривалось.

Таким образом, предлагаемый подход по использованию удельной энергии деформации для оценки прочности сварных соединений имеет следующие преимущества перед другими численными подходами:

- имеет простую математическую форму и достаточно просто реализу-

ется в алгоритмах и программах;

- позволяет оценить статическую прочность сварных соединений расчетным путем на основе обычных механических характеристик материала (диаграмма растяжения, K_{1c}), имеющих достаточно простое экспериментальное определение;

- при статическом и усталостном нагружении в рамках единого подхода позволяет определять направление распространения произвольно ориентированной в пространстве трещины и величину её "скачка", а также дать анализ развития зон пластичности у концентраторов напряжений.

Преимущества предлагаемого подхода перед аналитическими методиками оценки прочности сварных соединений заключается в том, что он позволяет учитывать:

- особенности геометрии соединения и её влияние на уровень опасности концентраторов;

- распределение механических свойств;

- схему приложения нагрузок;

- пластичность швов и свариваемых элементов (для пластичных материалов);

- остаточные напряжения (на основе решения термоупругопластической задачи);

В качестве примера практического использования предложенной методики для оценки прочности сварных конструкций и разработки технологий их изготовления в работе рассматривался анализ прочности стыковых швов усиливающей накладки хребтовой балки вагона-лесовоза.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Повышение несущей способности сварных соединений и точности оценки их прочности в рамках использования существующих подходов представляется недостаточно эффективным. Более перспективным является направление, связанное с использованием механики разрушения и ее деформационно-энергетических критериев. Это приводит к необходимости разработки методики оценки прочности сварных соединений, позволяющей более полно и в комплексе учитывать особенности наступления предельного состояния разрушения сварных соединений в зависимости от параметров их геометрии.

2. Для получения наиболее полной и точной информации о напряженно-деформированном состоянии сварных соединений в данной работе разработаны соответствующие математические модели, алгоритмы и программы, реализующие МКЭ и позволяющие:

- решать упругопластические задачи по деформационной теории пла-

стичности и теории течения с учетом геометрической нелинейности, неоднородности механических свойств и сингулярности напряжений у вершины концентраторов;

- производить анализ уровня опасности концентраторов на основе численного расчета раскрытия в вершине трещины COD, локального перемещения D , контурного J -интеграла и предложенного коэффициента плотности энергии деформации;

- визуализировать схемы и результаты расчета в графическом виде с учетом возможности получения "твердой" копии в системе AutoCAD.

3. В результате проведенных численных и экспериментальных исследований показано, что для комплексной оценки предельного состояния у концентраторов сварных соединений в силу универсальности, независимости от радиуса вычисления, достаточной нечувствительности к размерам элементов вследствие своей интегрально-энергетической сущности целесообразно использовать подход по расчету предлагаемого $\overline{S^p}$ -параметра.

4. Применительно к концентраторам сварных соединений независимость $\overline{S^p}$ от радиуса вычисления r (отклонение менее 5%) соблюдается в том случае, когда $r < 0.15b$, где b - наименьший из характерных размеров сечения сварного шва.

5. Проведенный численный и экспериментальный анализ загруженности сечения сварного шва и его концентраторов в зависимости от вида и геометрии сварного соединения показал, что повышение прочности сварного шва обусловлено благоприятным смещением загруженности сечения шва в сторону безопасных концентраторов вследствие разгрузки наиболее опасного, определяющего прочность сварной конструкции в целом. Характерным признаком достигнутой равномерной работы и максимальной прочности сварного шва является одновременное наступление предельного состояния в его наиболее опасных концентраторах.

6. Для лобовых швов, имеющих в корне трещиноподобный дефект типа "непровар", рациональной с позиции прочности является допускаемая соответствующим ГОСТом выпуклая поверхность шва. При отсутствии указанного концентратора в рассматриваемых швах - рациональной является допускаемая тем же ГОСТом вогнутая поверхность шва.

7. В результате проведения экспериментальных исследований установлено, что как в случае отсутствия концентратора напряжений, так и при его наличии, статическая прочность материала в зоне разрушения сварных образцов из Ст.3 по сравнению с обычными, несварными, на 5-10% выше. Таким образом, учет остаточных напряжений и реальных механических характеристик металла шва и околошовной зоны приводит к увеличению запаса расчетной статической прочности конструкции, изготовленной из выше-

указанного материала.

8. Для стали Ст.3 на основе корреляционного и регрессионного анализа экспериментальных данных получено выражение, позволяющее рассчитывать угол разрушения сварного шва нахлесточных соединений в зависимости от геометрических параметров последних.

9. Характер разрушения сварных соединений с трещиноподобным дефектом (посредством "отрыва" или "сдвига") может распознаваться по углу распространения трещины согласно известным зависимостям, установленным ранее в механике разрушения.

10. На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований применения предлагаемого $\overline{S^p}$ -подхода к оценке уровня опасности концентраторов напряжений предложена методика оценки статической прочности и анализа рациональности геометрии сварных соединений, максимальная погрешность при использовании которой в рассматриваемых случаях не превышала 25%, что вдвое ниже погрешности других существующих методик. Результаты исследований в виде разработанной методики и программного обеспечения, а также практических рекомендаций по выбору рациональной геометрии сварных соединений, используются Стахановским ПО вагоностроения с ожидаемым экономическим эффектом около 4,3 млн. руб. в ценах на январь - февраль 1993 года.

Основное содержание работы отражено в следующих статьях:

1. Петров С.Ю., Плис Г.В. Перспективы использования удельной энергии деформации для анализа прочности сварных соединений / Московский институт инженеров железнодорожного транспорта им. Ф.Э.Дзержинского. - Москва, 1993. - 17 с. - Деп. в ЦНИИТЭИ МПС № 5868-ЖДЭЗ

2. Петров С.Ю., Плис Г.В. Использование критерия удельной энергии деформации для оценки прочности сварных конструкций // Производство и надежность сварных конструкций: Тезисы докладов научно - технической конференции стран СНГ. - Москва, 1993. - С. 23.

3. Петров С.Ю., Плис Г.В. Методика использования удельной энергии деформации для оценки прочности и анализа геометрии сварных соединений / Московский институт инженеров железнодорожного транспорта им. Ф.Э.Дзержинского. - Москва, 1993. - 23 с. - Деп. в ЦНИИТЭИ МПС № 5869-ЖДЭЗ

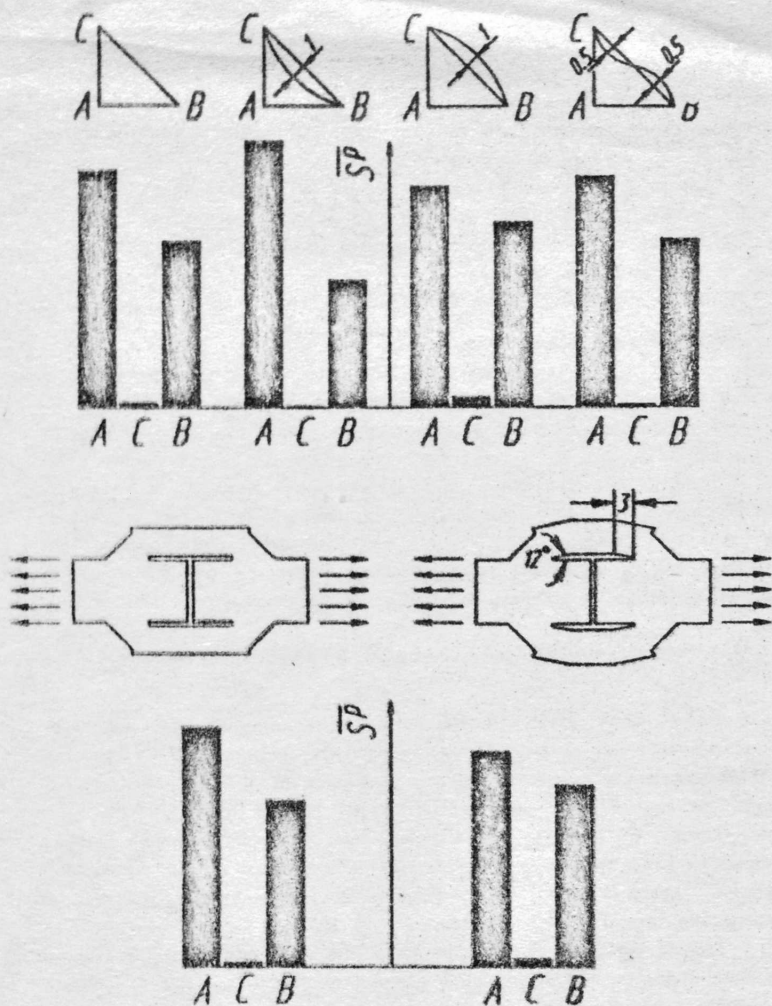


Рис. 1. Влияние геометрии сварного шва и свариваемых элементов на уровень опасности имеющихся концентраторов