

9  $\frac{10 - 1}{1655}$

*На правах рукописи*



Пархоменко Александр Александрович

МЕТОД ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СВАРНЫХ  
СОЕДИНЕНИЙ С УГЛОВЫМИ ШВАМИ ПО  
КРИТЕРИЯМ ЛОКАЛЬНОГО НАПРЯЖЕННОГО  
СОСТОЯНИЯ

Специальность 05.03.06 - «Технологии и машины  
сварочного производства»

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Ростов-на-Дону 2009

Работа выполнена в ГОУ ВПО Донском государственном техническом университете (ДГТУ).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Лукьянов В. Ф.**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Соболь Б.В.** (ДГТУ, г.Ростов-на-Дону)

кандидат технических наук  
**Головин В.П.** (ООО НПП «ЭКΟΣ»,  
г.Ростов-на-Дону)

Ведущее предприятие: ОАО Таганрогский котлостроительный  
завод «Красный Котельщик»  
(г.Таганрог)

Защита состоится 24 ноября 2009 года в 15 часов на заседании  
диссертационного Совета Д212.058.01 в Донском государственном  
техническом университете по адресу: 344010, г. Ростов-на-Дону,  
пл. Гагарина 1, ауд. 252

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Донского  
государственного технического университета.

Ваш отзыв на автореферат в 1 экз., заверенный печатью,  
просим высылать по указанному адресу.

Автореферат разослан 21 октября 2009 года.

Учёный секретарь  
диссертационного совета,  
канд. техн. наук, доцент



Г. В. Чумаченко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы

Анализ используемых в нашей стране методов расчета на усталостную прочность сварных конструкций показал, что таких методов всего два:

- расчет по допускаемым напряжениям;
- расчет, основанный на группировке соединений по категориям.

Область применения метода расчета по допускаемым напряжениям крайне ограничена типом и формой соединений. Невозможность точного учета формы сварного шва и конструкции в целом приводит к тому, что основные положения данного метода в ряде случаев не соответствуют условиям действительной работы конструкций. Данный метод нашел более широкое применение в расчетах деталей машин. К тому же, метод расчета по допускаемым напряжениям получил наибольшее распространение в первой половине прошлого века и на данный момент морально устарел.

Расчет, основанный на группировке сварных соединений по категориям, в нашей стране регламентируется СНиП II-23-81. В его основу положено разделение видов сварных соединений на 8 групп в значительной степени в зависимости от эффективных коэффициентов концентрации напряжений. Для каждой группы СНиП II-23-81 устанавливает расчетное сопротивление усталости.

Близкий по существу, но более дифференцированный подход широко был использован при разработке нормативных документов (НД) стран Западной Европы.

На протяжении многих лет вопросам прогнозирования усталостной прочности сварных конструкций уделяется большое внимание, как в нашей стране, так и за рубежом.

Значительный вклад в решение этой проблемы внесли Г.А. Николаев, В.А. Винокуров, В.П. Леонов, В.П. Когаев, В.И. Труфяков, В.И. Махненко, А.В. Ильин, М.В. Шахматов, J.D. Harrison, D. Radaaj, S.J. Maddox, P.J. Naagensen и др.

В последние годы наблюдается развитие новых подходов к оценке усталостной прочности и долговечности, основанных на изучении локального напряженного состояния в зоне возможного разрушения. Развитие этих отходов особенно привлекательно для оценки усталостной прочности и долговечности сварных соединений с угловыми швами.

Очевидно, что поиск новых путей оценки долговечности сварных соединений с угловыми швами является актуальной задачей, тем более, что до сих пор в практике расчета сварных конструкций в России пользуются нормативными документами 80-х годов прошлого века.

### **Цель работы**

Разработка метода оценки долговечности сварных соединений с угловыми швами, основанного на подобию локального напряженного состояния в экспериментальном образце и реальной конструкции.

Для реализации поставленной цели необходимо было решить ряд задач:

1. Провести анализ отечественных и международных методов расчета усталостной прочности и долговечности сварных конструкций и выявить тенденции и пути развития этих методов.

2. Провести анализ отечественных и международных нормативных требований к качеству сварных соединений с целью определения возможности их гармонизации.

3. Изучить геометрию зоны перехода от шва к основному металлу, как зоны ответственной за разрушение сварных конструкций. Определить статистический образ геометрии зоны перехода от шва к основному металлу.

4. Разработать методы моделирования напряженного состояния в зоне перехода от шва к основному металлу в соединениях с угловыми швами.

5. Провести экспериментальное исследование механизма зарождения и развития разрушения в крупногабаритных элементах сварных конструкций.

6. Разработать методику прогнозирования долговечности сварных соединений с угловыми швами по критериям локального напряженного состояния.

### **Методы исследования**

Геометрия зоны перехода от шва к основному металлу изучалась на основе металлографических исследований макрошлифов с использованием микроскопа совместно с цифровой фото камерой.

Статистическая обработка полученных данных проводилась в программном комплексе Statistica.

Экспериментальное изучение напряженного состояния

проводилось методом тензометрирования.

Математическое моделирование напряженного состояния сварных конструкций производилось методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS.

Долговечность образцов оценивалась на основе усталостных испытаний крупногабаритных узлов сварных конструкций, позволяющих в полной мере сохранить технологическое и конструктивное подобие при усталостных испытаниях.

**Научной новизной** диссертационной работы является модель оценки усредненного на базе структурного элемента локального напряженного состояния в зоне перехода от углового шва к основному металлу  $\sigma_p$ , которая с учетом известного асимптотического решения для напряженно-деформированного состояния в вершине углового выреза может быть представлена в следующем виде:

$$\sigma_p = K * \sigma_{max} \frac{1}{\rho} \int_0^{\rho} r^{-\alpha} dr ,$$

где коэффициент интенсивности напряжений  $K$  зависит от глобальной геометрии сварного соединения, а показатель степени  $\alpha$  от угла сопряжения поверхностей шва и основного металла;

теоретически показано, что значение параметра  $K$  может быть определено на основе результатов измерения или расчета МКЭ напряжений на поверхности сварного соединения;

экспериментально с использованием крупногабаритных узлов сварных конструкций доказано, что значение усредненного локального напряжения  $\sigma_p$  может быть принято в качестве критерия для прогнозирования долговечности сварных конструкций с угловыми швами.

Определен статистический образ геометрии зоны перехода от шва к основному металлу для реальных сварных соединений с угловыми швами. Анализ статистического образа позволил рассмотреть распределения напряжений в зоне перехода от шва к основному металлу угловых швов с точки зрения механики разрушения.

#### **Практическая ценность и реализация результатов работы**

Разработан метод оценки долговечности основанный на подобии локального напряженного состояния в зоне перехода от

шва к основному металлу в экспериментальном образце и реальной конструкции. В отличие от существующих методов оценки долговечности сварных соединений данный метод позволяет на стадии проектирования детально оценивать влияние конструктивного оформления соединения на прочность.

На основе раздельного регулирования глобального и локального напряженного состояния в зоне разрушения предложены и апробированы пути повышения долговечности сварных конструкций.

Теоретические положения разработанного метода экспериментально подтверждены результатами испытания сварных крупногабаритных узлов конструкций.

Полученные результаты использованы в учебном процессе Донского государственного технического университета при изучении дисциплины «Проектирование сварных конструкций».

#### **На защиту выносятся:**

- модель оценки усредненного на базе структурного элемента локального напряженного состояния в зоне перехода от углового шва к основному металлу  $\sigma_{\text{н}}$ ;
- методика оценки долговечности сварных соединений основанная на подобию локального напряженного состояния в зоне перехода от шва к основному металлу в экспериментальном образце и реальной конструкции;
- результаты экспериментальных и теоретических исследований.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на:

- заседаниях кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства» ДГТУ, 2006-2009.
- VIII международной научно-технической конференции по динамике технологических систем, ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, 2007.
- международной научно-технической конференции в рамках Промышленного конгресса Юга России и международной специализированной выставки «Метмаш. Станкоинструмент – 2007», г. Ростов-на-Дону, 2007.
- 10-й международной научно-практической конференции «Технологии ремонта восстановления и упрочнения машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки», С-Петербург., 2008.
- ежегодных научно-технических конференциях студентов и

профессорско-преподавательского состава ДГТУ, 2006-2009.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 7 научных статей и докладов, в том числе одна работа опубликована в изданиях, рекомендованных ВАК.

**Объем и структура диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, содержащего 106 наименований.

Диссертация изложена на 152 страницах машинописного текста, содержит 21 таблицу, 69 рисунков.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**В первой главе** обоснована актуальность и необходимость решения поднятой проблемы, сформулирована цель и задачи диссертационной работы.

Проанализированы факторы, определяющие усталостную прочность сварных соединений.

Отмечено, что наибольшее влияние на усталостную прочность и долговечность конструкции оказывает локализация напряжений в районе расположения сварных швов и можно выделить три основные причины, вызывающие концентрацию напряжений в сварных конструкциях:

- технологические дефекты шва;
- геометрия самого шва;
- геометрия конструкции сварного соединения.

Проанализировано влияние этих трех причин локализации напряжений на усталостную прочность сварных конструкций.

Проведен анализ нормативных документов с целью гармонизации требований к нормам допустимости дефектов сварных соединений. Данный анализ в сочетании с тем, что оценку локального напряженного состояния металла вблизи дефектов сварного шва невозможно выполнить с приемлемой точностью, указывает, что нет смысла на стадии проектирования конструкции моделировать локальное напряженное состояние металла в вершине технологических дефектов с целью расчета долговечности конструкции. По-видимому, единственный путь предотвратить влияние технологических дефектов на прочность состоит в том, чтобы ограничить размеры несовершенств сварного шва до приемлемых для практики размеров и ввести в расчет коэффициенты запаса прочности.

В противоположность этому два других фактора –

геометрия очертания швов и конструктивное оформление сварного соединения подлежат регулированию за счет целенаправленных усилий со стороны конструктора и технолога.

Отмечено, что в качестве опасной зоны ответственной за разрушение конструкции при расчетах сварных соединений на усталостную прочность необходимо рассматривать зону перехода от шва к основному металлу.

В завершении главы рассмотрены используемые в нашей стране и зарубежом методы расчета сварных соединений на прочность при переменных нагрузках.

**Во второй главе** проводится теоретическое и экспериментальное изучение локального напряженного состояния сварных соединений. Геометрия зоны перехода от шва к основному металлу определяет напряженное состояние в данной зоне конструкции и, следовательно, влияет на долговечность сварного соединения. Угол перехода и радиус сопряжения шва с основным металлом определяют локальную геометрию профиля шва и оказывают определяющее влияние на уровень напряжений в этой зоне.

Форма профиля сварных швов, не является постоянной по длине шва и изменяется случайным образом. Проведенный анализ показал, что отечественные нормативные документы, в основной своей массе, не регламентируют параметры геометрии зоны перехода от шва к основному металлу. Это означает, что при приемке и контроле конструкций эти параметры не контролируются и зависят в основном от культуры производства в каждой конкретной отрасли. Отметим, что геометрические параметры профиля шва в зоне перехода зависят от многих параметров: способа и режимов сварки, сварочных материалов, типа швов и др., поэтому детерминированные параметры не в полной мере характеризуют профиль шва. Более полной характеристикой является статистический образ геометрии зоны перехода от шва к основному металлу.

С целью создания статистического образа зоны перехода от шва к основному металлу в металлоконструкциях был проведен анализ геометрии сварных соединений на предприятии ОАО Таганрогский котлостроительный завод «Красный котельщик». Основная сфера деятельности завода изготовление оборудования относящегося к котельному оборудованию (КО) и оборудованию

химических нефтехимических и взрывопожароопасных производств (ОХНВП).

Анализировались контрольные сварные соединения, выполненные ручной дуговой сваркой, механизированной сваркой в среде углекислого газа и автоматической сваркой под слоем флюса.

Статистическая обработка результатов измерений проведена в программном комплексе Statistica.

В результате обработки данных получено следующее:

- для всех рассмотренных способов сварки распределение значений радиусов перехода от шва к основному металлу соответствует закону Вейбулла-Гнеденко. Причем,  $x_{ii}$  равен «0», т.к. радиус перехода от шва к основному металлу не может быть менее «0».

- при автоматической сварке под слоем флюса и механизированной сварке в среде углекислого газа проволокой диаметром 1,6 мм распределение значений углов подхода соответствует логарифмически нормальному закону; при ручной дуговой сварке электродами УОНИ 13/55 и ЦЛ-20 - нормальному закону.

- статистические характеристики профиля шва зоны перехода от шва к основному металлу для рассмотренных способов сварки представлен в таблице 1 в виде средних значений (числитель) и  $6\sigma$  границ (знаменатель).

Таблица 1

Статистический образ зоны перехода от шва к основному металлу

Способ сварки	Сварочные материалы	Радиус перехода $r$ , мм	Угол сопряжения $\varphi$ , град
Ручная дуговая	УОНИ 13/55	0,92 / (0 - 2,70)	43,4 / (14,2 - 72,6)
	ЦЛ 20	1,01 / (0 - 2,41)	45,8 / (30 - 61,6)
АФ	Св-08ГА Флюс ФВТ-1	0,55 / (0 - 1,47)	56,5 / (18,9 - 94,1)
МП	Св-08Г2С	0,62 / (0 - 1,63)	42,9 / (22,2 - 63,6)

На завершающем этапе статистического анализа была проведена проверка полученного ряда совокупностей на соответствие их одной генеральной совокупности. Проверка

осуществлялась по критерию равенства дисперсий ряда совокупностей (критерию Бартлетта) и не подтвердила данную гипотезу.

В рамках диссертационной работы проведен эксперимент по анализу влияния радиуса перехода от шва к основному металлу ( $r$ ) на характер распределения напряжений в конструкции, с целью определения расстояния, на котором его влиянием можно пренебречь. Был нагружен статическим усилием крестообразный образец с различными радиусами  $r$  в направлении действия усилий: 2, 3, 5 и 10 мм. Образец имеет толщину  $t = 8$  мм, выполнен из стали СтЗсп. Образец вырезан на лазерном комплексе ЛК-2015, обеспечивающем точность обработки по контуру  $\pm 0,1$  мм. В ходе эксперимента были получены поля напряжений в зоне перехода от шва к основному металлу и ее окрестности (анализируется участок от зоны перехода длиной 100 мм). Тензометрические датчики наклеивались на торец образца.

Анализируя полученный характер распределения напряжений в экспериментальном образце можно заключить, что составляющие напряженного состояния -- глобальные и локальные напряжения локализованы на участке 35 – 40 мм от точки перехода.

Детальный анализ характера распределения напряжений на столь ограниченном по длине участке конструкции при помощи тензометрирования затруднен. Поэтому было принято решение провести уточнение полученных данных методом математического эксперимента на основе конечноэлементной модели построенной в программном комплексе ANSYS.

В результате установлено:

- радиус перехода  $r$  (микрогеометрия образца) оказывает существенное влияние на локальное НДС образца (при постоянной макрогеометрии) Например, максимальные напряжения при радиусе перехода  $r = 0$  в 2 – 3 раза превышают аналогичные напряжения при  $r = 5$  и 10 мм;

- напряжения связанные с макрогеометрией узла локализируются на участке 35 – 40 мм, а напряжений связанных с микрогеометрией в пределах 4 – 7 мм от зоны перехода от шва к основному металлу, что указывает на возможность раздельного представления влияния микро и макронапряжений на общее НДС конструкции.

При всей условности такого подхода (представления напряженного состояния конструкции в виде двух составляющих: глобальных напряжений связанных с макрогеометрией конструкции в целом и локальных напряжений связанных с микрогеометрией зоны перехода от шва к основному металлу) к анализу напряженного состояния, он позволяет найти пути раздельного влияния на каждую составляющую и расширяет возможности в поисках методов снижения концентрации напряжений за счет изменения конструктивных параметров соединения и технологических приемов. Эти вопросы подробно освещены в главе 3. К тому же такой подход упрощает методы расчетной оценки долговечности сварных конструкций, основанных на результатах экспериментов, поскольку позволяет выделить составляющую, обусловленную сваркой.

**В третьей главе** представлена методика, оборудование и результаты усталостных испытаний крупногабаритных сварных узлов типа «штуцер-лист» (соединений труб, штуцеров с корпусом изделия).

Усталостные испытания сварных соединений проводились в условиях циклического нагружения при двухосном изгибе. Образцы в виде диска диаметром 550 мм и 980 мм, опираемого по контуру, нагружались гидростатическим давлением на установках, спроектированных и изготовленных на кафедре «МиАСП» ДГТУ. Конструкция установок и размеры образцов позволяют в полной мере проводить исследования технологических факторов на долговечность сварных соединений из листового металла толщиной 15 – 40 мм с пределом текучести до 1500 МПа в условиях двухосного изгиба. Конструкция образцов представлена на рисунке 1.

Основываясь на полученных результатах усталостных испытаний образцов построены S-N кривые (рисунок 2) для конструкций тип I по рисунку 1.

Параллельно проводились исследования характера распределения напряжений в соединениях типа «штуцер-лист». Построение эпюр напряжений действующих на поверхности соединений с равными катетами (тип I и III) показало, что в зоне разрушения наблюдается значительная локализация напряжений.

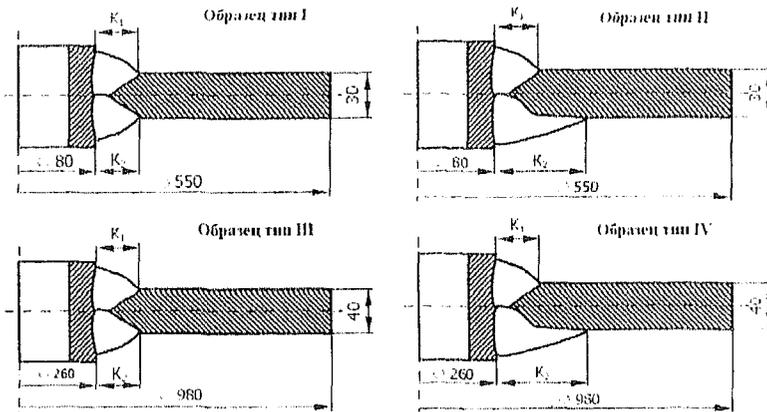


Рисунок 1. Конструкция образцов типа «штуцер-лист»  
(Тип I и III:  $K_1 = K_2$ ; Тип II и IV:  $K_2 = 2K_1$ )

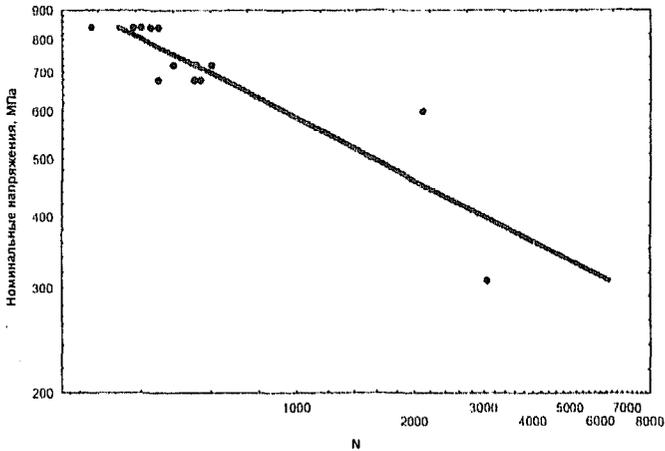


Рисунок 2. Долговечность до появления первой трещины при  
испытании соединений типа «штуцер-лист»  
(экспериментальные точки и аппроксимирующая прямая)

Столь резкое повышение напряжений в районе сварного соединения можно объяснить двумя причинами. Первая причина - это местное изменение жёсткости в районе присоединения штуцера к корпусу, зависит от конструктивного оформления

сварного соединения (глобальная геометрия), вторая – неплавный переход от основного металла к металлу шва (локальная геометрия). К сожалению, оба рассмотренных фактора вызывают повышение напряжений в одном наиболее опасном месте - в зоне перехода от шва к основному металлу.

Выделение локальной и глобальной составляющих напряженного состояния позволяет принимать конструктивные и технологические решения для повышения усталостной прочности, целенаправленно воздействуя либо на одну, либо на другую составляющую. Очевидно, что наибольший эффект может быть достигнут при целенаправленном регулировании и локальной и глобальной составляющих напряженного состояния.

Главным достоинством выделения двух составляющих напряженного состояния металла в районе перехода от шва к основному металлу является возможность моделирования принимаемых решений с помощью метода конечных элементов, опираясь на результаты, полученные из экспериментов одного из вариантов конструкции сварного узла.

Проведение математического эксперимента позволяет на основе анализа эпюр напряжений действующих в конструкции предложить конструктивное оформление соединения данного типа, которое обеспечивает снижение напряжений в зоне перехода от шва к основному металлу.

Характер эпюр можно регулировать соответствующим изменением размера катета подкрепляющего шва (т.е. геометрии сварного соединения).

Так применение со стороны сжатых волокон катета шва в два раза большего, чем со стороны растянутых волокон (тип II и IV по рисунку 1), позволило уменьшить уровень глобальных напряжений в зоне ожидаемого разрушения с 1980 МПа до 1650 МПа (упругое решение).

К более существенному снижению уровня напряжений в зоне предполагаемого разрушения приводит одновременное воздействие на глобальную и локальную составляющие.

Эпюры напряжений, построенные по результатам расчета методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS, и по результатам эксперимента, полученные измерением напряжений на поверхности образцов с помощью тензометрических датчиков, дают близкие результаты.

Теоретический и экспериментальный анализ распределения напряжений на поверхности соединений типа «штуцер-лист» с подкрепляющим швом наглядно доказывает возможность отдельного управления напряженным состоянием в зоне предполагаемого разрушения за счет изменения глобальной и локальной геометрии конструкции. Данный подход расширяет возможности в поисках методов снижения уровня напряженно-деформированного состояния конструкции в зоне предполагаемого разрушения.

**В четвёртой главе** представлен разработанный метод оценки усталостной прочности сварных соединений с угловыми швами, основанный на подобии локального напряженного состояния в экспериментальном образце и реальной конструкции.

Полученный статистический образ зоны перехода от шва к основному металлу, а так же результаты аналогичных работ других авторов, показывает высокую вероятность (до 0,15) появления участков швов с радиусом перехода от шва к основному металлу близкого к нулю  $r = 0 - 0,3$  мм. Это позволяет рассмотреть характер распределения напряжений в зоне перехода от шва к основному металлу угловых швов на основе методов механики разрушения. В отличие от обычно используемых в расчетах моделей трещиноподобных дефектов с параллельными кромками, зону потенциального места усталостного разрушения в сварных конструкциях с угловыми швами, зону перехода от шва к основному металлу, можно представить в терминах механики разрушения в виде углового выреза с углом раскрытия кромок  $\Psi$  значительно превышающем ноль градусов (рисунок 3).

В работах Williams M.L., Партона В.З. и Перлина П.И. и др. показано, что распределение напряжений в окрестности вершины углового выреза описывается уравнением:

$$\sigma_y = Kr^{-\alpha} S(\varphi) \quad (1)$$

где  $\sigma_y$  – напряжения вблизи вершины углового выреза;

$K$  – коэффициент интенсивности напряжений;

$r$  – линейная координата по лучу, вдоль которого определяют распределение напряжений в вершине углового выреза;

$\varphi$  – угловая координата луча, вдоль которого определяют распределение напряжений в вершине углового выреза.

$\alpha$  – показатель особенности, сингулярности напряженного

состояния в окрестности вершины углового выреза;

$S(\varphi)$  – корректирующая функция, зависящая только от угла  $\varphi$  наклона рассматриваемого луча.

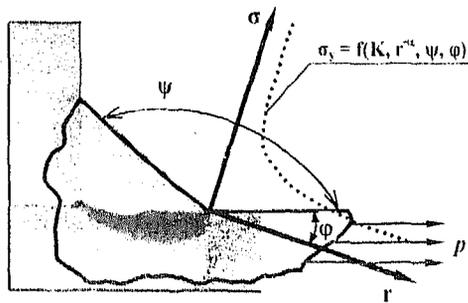


Рисунок 3. Зона потенциального места усталостного разрушения конструкции с угловым швом – вырез с углом раскрытия кромок  $\Psi$

Напряжения  $\sigma_y$  в окрестности вершины углового выреза стремятся к бесконечности. Характер стремления напряжений  $\sigma_y$  к бесконечности определяется показателем степени  $\alpha$  при  $r$ . Следует обратить внимание, что показатель особенности  $\alpha$  в вершине выреза с ростом угла раскрытия выреза  $\Psi$  уменьшается от 0,5, для обычно рассматриваемой в линейной механике разрушения трещины с параллельными кромками ( $\Psi=0$ ), до нуля при гладкой границе области ( $\Psi=\pi$ ). Значение показателя особенности  $\alpha$  можно определить из представленного в работах Williams M.L., Партона В.З. и Перлина П.И. и др. уравнения:

$$\sin[(2\psi)(1-\alpha)] = \pm(1-\alpha)\sin 2\psi \quad (2)$$

Таким образом, пользуясь методами механики трещин, можно установить характер распределение напряжений в зоне перехода от шва к основному металлу в сварных соединениях с угловыми швами, предполагая при этом, что значение радиуса перехода в этой зоне близко к нулю.

Важно отметить, что математические методы исследования напряженного состояния основаны на представлении о том, что твердое тело можно делить на бесконечно малые элементы. В тех случаях, когда градиент напряжений в исследуемой области велик, представление твердого тела как бесконечно делимого континуума не вносит существенной погрешности в анализ.

Большинство конструкционных материалов, в том числе

металлы, имеют неоднородную по механическим характеристикам кристаллическую структуру. Представить себе такие структуры как однородные при делении на бесконечно малые элементы можно только в расчетах при относительно невысоком градиенте напряжений. С ростом градиента напряжений, как это имеет место вблизи углового выреза, на распределение напряжений начинают влиять отдельные структурные элементы, такие как блоки зерен, отдельные зерна, различно ориентированные по отношению к силовому потоку, граница зерен и др.

Все это приводит к тому, что в вершине острых дефектов структурная неоднородность металла препятствует росту напряжений. Влияние структурной неоднородности достаточно хорошо изучено в работах отечественных и зарубежных исследователей и учитывается структурной характеристикой материала, имеющую линейную размерность. Эта характеристика зависит от природы материала и его структурного состояния, и получила название «структурного элемента». Размер структурного элемента принято обозначать  $\rho$ .

В связи с этим, для практических целей локальное напряженное состояние в вершине углового выреза предлагается характеризовать величиной напряжений, усредненных на базе структурного элемента  $\rho$ . Назовем эту величину – локальное усредненное напряжение  $\sigma_\rho$ , именно величину  $\sigma_\rho$  предлагается принять в качестве характеристики сопротивления разрушению сварной конструкции с угловыми швами.

Для углового выреза величину  $\sigma_\rho$  можно определить путем интегрирования уравнения 1, характеризующего распределение напряжений в окрестности вершины углового выреза:

$$\sigma_\rho = K * \sigma_{min} \cdot \frac{1}{\rho} \int_0^\rho r^n dr \quad (3)$$

где  $\rho$  – размер структурного элемента (основываясь на литературных данных о размерах характеристики  $\rho$  для материалов, используемых в сварных металлоконструкциях для низколегированных высокопрочных сталей в работе было принято, что размер структурного элемента  $\rho = 0,2$  мм);

$r$  – линейная координата по лучу, вдоль которого определяют распределение напряжений в вершине углового выреза (точки перехода от шва к основному металлу);

$\alpha$  – показатель особенности, сингулярности напряженного состояния в окрестности вершины углового выреза, величина которого зависит от угла  $\Psi$  и определяется по уравнению (2);

$\sigma_{ном}$  – номинальные напряжения, обусловленные действием приложенных к сварному соединению нагрузок.

$K^*$  – параметр, характеризующий коэффициент интенсивности напряжений при значении  $\sigma_{ном} = 1$ , тогда в уравнении (1):

$$K = \sigma_{ном} K^* \quad (4)$$

В отличие от получивших в настоящее время широкое распространение методов линейной механики разрушения, практическая реализация расчетов, основанных на уравнении (3), имеет определенные трудности, т.к. коэффициент  $K^*$  имеет размерность, зависящую от показателя степени при  $r$  и, следовательно, его величина будет различной для различных углов сопряжения  $\Psi$ . В диссертационной работе для определения значения коэффициента  $K^*$  использовали численные модели МКЭ.

Параметр  $K^*$  зависит, главным образом, от макрогеометрии сварного соединения и является постоянной величиной для конкретной геометрии сварной конструкции и условий ее нагружения (растяжение, изгиб, направление действующей силы).

Суть предлагаемого метода оценки значения  $K^*$  состоит в следующем. Для конкретной сварной конструкции с угловыми швами путем расчета с помощью МКЭ или измерения на экспериментальных моделях определяют зависимость  $\sigma_y = f(r)$ . В соответствии с (1) значения  $K^*$  вблизи зоны перехода от шва к основному металлу должны иметь одинаковую величину и, следовательно, полученные результаты расчета в координатах  $K^* = F(r)$  можно аппроксимировать прямой линией с углом наклона равным нулю.

Постоянство параметра  $K^*$  на участке в окрестности вершины углового выреза подтверждено численным экспериментом с использованием образца с двумя боковыми надрезами ( $\Psi=0$ ), для которого известно теоретическое решение. А так же для других, наиболее характерных для соединений с угловыми швами, значений  $\Psi$ , таких как 135, 150 и 165 градусов.

Таким образом, полученное экспериментальным путем значение  $K^*$  позволяет по уравнению (3) определить значение  $\sigma_r$  для любой геометрии сварной конструкции с угловыми швами.

Данное значение  $\sigma_p$  предлагается использовать в качестве критерия для прогнозирования долговечности сварных конструкций при их проектировании.

Для прогнозирования долговечности конструкции  $N$  на основе использования локальных усредненных напряжений необходимо экспериментально получить зависимость  $\sigma_p=f(N)$  путем испытания серии контрольных образцов заданной геометрии. Обычно результаты таких испытаний представляют в виде зависимости  $\sigma_{ном}=f(N)$ . Зная геометрию образцов, с помощью МКЭ и на основе изложенной выше модели (уравнение (3)) значения  $\sigma_{ном}$  пересчитывают в  $\sigma_p$ . Полученная таким образом зависимость  $\sigma_p=f(N)$ , является базовой кривой для оценки долговечности проектируемой конструкции с угловыми швами.

Далее, при анализе конкретной сварной конструкции, определяют значение напряжений  $\sigma_p$  в зоне перехода от углового шва к основному металлу и по предварительно полученной при испытании контрольных образцов базовой  $\sigma_p=f(N)$  кривой определить ее расчетную долговечность. Или задавшись требуемым уровнем долговечности проектируемой конструкции определить по базовой  $\sigma_p=f(N)$  кривой значение напряжений  $\sigma_p$  для этой конструкции. Затем, исходя из консервативного подхода к микрогеометрии проектируемой конструкции, из уравнения (3) определить уровень допускаемых номинальных напряжений для данной конструкции.

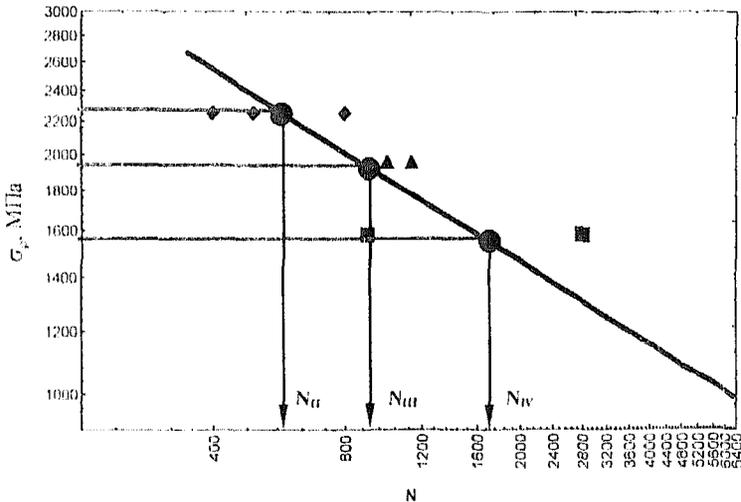
Одно из основных достоинств методики определения распределения напряжений  $\sigma_y=f(r)$  с использованием уравнения (1) на основе параметра  $K^*$  состоит в следующем. Благодаря использованию функции  $\Gamma$  с заданным значением параметра  $\alpha$  на основании уравнения (2) отпадает необходимость экспериментального измерения напряжений в точках, близко расположенных к вершине дефекта, или использовать МКЭ модели с чрезмерно мелкой сеткой.

С целью подтверждения адекватности предложенного метода расчета сварных конструкций на усталостную прочность был проведен расчет соединений типа «штуцер-лист», подробно рассмотренных в главе 3. В качестве контрольных образцов, на основании испытаний которых была построена зависимость  $\sigma_p=f(N)$ , использовались образцы диаметром 550 мм с симметричными угловыми швами рисунок 1 тип I. Результаты

усталостных испытаний данных образцов, выполненных из низколегированной стали с пределом текучести 900 – 1060 МПа, представлены в виде зависимости «номинальные напряжения – долговечность» на рисунке 2. По приведенному выше алгоритму зависимость  $\sigma_{н\text{юм}}=f(N)$  преобразовали в зависимость  $\sigma_p=f(N)$ .

В качестве сварной конструкции долговечность, которой необходимо определить расчетным путем, используя предложенный метод, были взяты соединения типа «штуцер-лист» трех видов тип II – IV по рисунку 1.

Результаты расчета локальных усредненных напряжений, полученные с использованием предложенной модели (уравнение (3)) для образцов тип II – IV и прогнозируемая для них долговечность представлены на рисунок 4. На рисунке сплошной линией обозначена базовая кривая  $\sigma_p=f(N)$ , полученная по результатам испытания контрольных сварных соединений (образцы тип I); круглыми точками – прогнозируемая долговечность  $N_{II}$  -  $N_{IV}$  для образцов, соответственно, тип II – IV; квадратными точками – результаты испытаний образцов тип IV; треугольными - тип III; ромбовидными – тип II.



Сопоставление полученных результатов подтверждает адекватность предложенного метода расчета долговечности сварных конструкций с угловыми швами. Расхождение полученной расчетным путем долговечности с данными усталостных испытаний составляет от 5 до 11 %.

Так же, в работе была проанализирована корректность использования предложенной методики для рассмотренных выше соединений типа «штыцер-лист» с радиусом в зоне перехода от шва к основному металлу  $r$  отличным от нуля. Полученные результаты показали, что изменение значения радиуса перехода в пределах  $0 < r < 0,3$  ошибка в прогнозировании долговечности не превышает 6 %.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ:**

1. В связи с тем, что оценку локального напряженного состояния металла вблизи дефектов сварного шва невозможно выполнить с приемлемой точностью, нет смысла на стадии проектирования конструкции моделировать локальное напряженное состояние металла в вершине технологических дефектов с целью расчета долговечности конструкции. Единственный путь предотвратить влияние технологических дефектов на долговечность состоит в том, чтобы ограничить размеры несовершенств сварного шва до приемлемых для практики размеров и ввести в расчет коэффициенты запаса прочности.

На стадии проектирования сварных соединений с угловыми швами необходимо уделить внимание моделированию локального напряженного состояния в зоне перехода от шва к основному металлу.

2. Разработан метод расчета долговечности сварных конструкций с угловыми швами, основанный на оценке усредненного на базе структурного элемента размером  $\rho$  локального напряженного состояния в зоне перехода от шва к основному металлу. С учетом известного асимптотического решения для напряженно-деформированного состояния в вершине углового выреза локальное усредненное напряжение  $\sigma_{\rho}$ , характеризующее долговечность может быть выражено в следующем виде:

$$\sigma_{\rho} = K^* \sigma_{ном} \frac{1}{\rho} \int_0^{\rho} r^{-\alpha} dr,$$

где коэффициент интенсивности напряжений  $K^*$  зависит от глобальной геометрии сварного соединения, а показатель степени  $\alpha$  от угла сопряжения поверхностей шва и основного металла.

3. Возможность учета реальной геометрии сварных соединений через параметр  $K^*$  и показатель степени  $\alpha$  и относительная простота расчетной модели позволяют на стадии проектирования рассматривать несколько альтернативных решений.

4. Теоретически показано, что значение параметра  $K^*$  может быть определено экспериментально на основе результатов измерения напряжений на поверхности сварного соединения или моделирования с помощью МКЭ.

5. Экспериментально с использованием крупногабаритных узлов сварных конструкций доказано, что значение локального усредненного напряжения  $\sigma_{\rho}$  может быть принято в качестве критерия для прогнозирования долговечности сварных конструкций с угловыми швами. Расхождение полученной расчетным путем долговечности с данными усталостных испытаний составляет от 5 до 11 %.

6. Проведено экспериментальное исследование механизма зарождения и развития разрушения в крупногабаритных элементах сварных конструкций. Установлено, что процесс разрушения сварного соединения «штуцер-лист», начинается на ранней стадии нагружения, как со стороны растянутых, так и со стороны сжатых волокон. Однако, скорость развития трещин со стороны сжатых волокон ниже, чем со стороны растянутых волокон. Обычно трещины со стороны сжатых волокон к моменту потери герметичности успевают пройти приблизительно 20% толщины основного металла.

7. Выявлено, что при циклическом нагружении сварного соединения с не обработанным швом именно зона перехода от шва к основному металлу, наиболее грубая ее часть, является инициатором зарождения разрушения конструкции. Характерным для малоциклового усталости сварных соединений с угловыми швами является практически одновременное зарождение большого числа трещин в наиболее грубых переходах от металла

шва к основному металлу на линии сплавления, что позволяет для расчета локального напряженного состояния использовать методы линейной механики разрушения.

8. Определен статистический образ геометрии зоны перехода от шва к основному металлу, для ручной дуговой сварки, механизированной сварки в среде углекислого газа и автоматической сварки под слоем флюса.

На основе полученных и обобщения сторонних данных установлено, что радиус перехода от шва к основному металлу, для всех рассмотренных способов сварки, варьируются в интервале от 0 до 5 мм, при этом с наибольшей вероятностью его значения колеблется от 0 до 2 мм. Углы подхода могут изменяться от 17 до 80 градусов.

9. Радиус перехода от шва к основному металлу для всех рассмотренных способов сварки с высокой вероятностью (до 0,15) может принимать значения близкие к нулю ( $r = 0 - 0,3$  мм). Т.е. с уверенностью можно констатировать факт, что в любой конструкции выполненной основными способами сварки будут присутствовать участки швов с радиусом перехода близким нулю. Этот факт позволяет рассматривать профиль сварных соединений с угловыми швами в зоне перехода от металла шва к основному металлу как угловой вырез и использовать для оценки локального напряженного состояния асимптотические решения.

10. Теоретический и экспериментальный анализ распределения напряжений на поверхности соединений типа «штуцер-лист» с подкрепляющим швом наглядно доказывает возможность раздельного управления напряженным состоянием в зоне предполагаемого разрушения за счет изменения глобальной и локальной геометрии конструкции. Данный подход расширяет возможности в поисках методов снижения напряженно-деформированного состояния конструкции за счет изменения конструктивных параметров соединения и технологических приемов и позволяет получить требуемую долговечность конструкции.

На примере сварного соединения «штуцер-лист» показана возможность повышения долговечности в 1,5 – 4 раза за счет целенаправленного изменения макрогеометрии соединения.

## **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ:**

1. Лукьянов В.Ф., Пархоменко А.А., Жабин А.Н. Требования к качеству сварных соединений в отечественных и международных нормативных документах // Сварщик профессионал. - 2006. - №3 - с. 3 – 5.
2. Пархоменко А.А. Современный метод расчета сварных соединений на усталостную прочность // Сварочное производство: сб. тр. молодых ученых/ ДГТУ. - Ростов н/Д, 2006 - 105с – с.16-21.
3. Пархоменко А.А. Расчет усталостной прочности сварных соединений на основе анализа локального напряженного состояния // Труды VIII Международной научно-технической конференции по динамике технологических систем/ ДГТУ. - Ростов н/Д, 2007. – Т.1. – 223 с – с. 70 - 75.
4. Пархоменко А.А. Расчет усталостной прочности сварных соединений на основе анализа напряженного состояния конструкции // Эффективные технологические процессы в металлургии, машиностроении и станкоинструментальной промышленности: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. в рамках Промышленного конгресса Юга России и междунар. специализир. выставки «Метмаш. Станкоинструмент – 2007», 3-5 сент./ ВЦ «Вертолэкспо». - Ростов н/Д, 2007. – 326 с – с. 71 - 74.
5. Людмирский Ю.Г., Пархоменко А.А., Пархоменко С.А. Повышение долговечности сварных соединений, работающих при циклических нагрузках // Сварочное производство: сб. тр. молодых ученых/ ДГТУ. - Ростов н/Д, 2008. – 151 с. – с. 109 – 116.
6. Дюргеров Н.Г., Сагиров Х.Н., Морозкин И.С., Пархоменко А.А. Восстановление и упрочнение деталей машин по кривым износа и эпюрам деформаций // Материалы 10-й Междунар. науч.-практ. конф. «Технологии ремонта восстановления и упрочнения машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки», 15 - 18 апр. – СПб., 2008. – Ч.1. – 316 с – с. 106 - 109.
7. Людмирский Ю.Г., Пархоменко А.А. Метод оценки напряженного состояния в зоне перехода от шва к основному металлу // Вестник ДГТУ. - 2008. - №3 (38). - 355 с. - с. 340 - 347.

---

В печать 19.10.09.

Объём 1,4 усл. п. л. Офсет. Бумага тип № 3.

Формат 60x84/16. Заказ № 429. Тираж 100 экз. Бесплатно

---

Издательский центр ДГТУ

Адрес университета и полиграфического предприятия:

344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

1672



2007246505