

М 484483

ГОСКОМИТЕТ ПО НАРОДНОМУ ОБРАЗОВАНИЮ
СССР

Московское
ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового
Красного Знамени высшее техническое училище имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

УДК 621.791.052

САЛИКОВ Владимир Анатольевич

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ И ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
С ПРОДОЛЬНЫМИ УГЛОВЫМИ ШВАМИ ДЛЯ РАСЧЕТА
НА УСТАЛОСТЬ

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 - доктор технических наук,
профессор ВИНУКUROB B.A.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор ВЕРШИНСКИЙ A.B.
кандидат технических наук,
доцент ЧЕРНАВСКИЙ Д.М.

Ведущее предприятие - ЦНИИПСК имени Мельникова,
г. Москва

Защита диссертации состоится "9" марта 1989 г. в
часов на заседании специализированного совета K053.I5.03
в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ор-
дена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище им.
Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская, 5.

Ваши отзывы на автореферат в I экз., заверенный печатью,
просим выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ им.

Г.И.Вр. 1989 года.

В.И. ГИРШ

М 484783

И,О п.л.

принт МВТУ им. Н.Э.Баумана

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ .

Актуальность темы. Одна из главных задач, стоящих перед народным хозяйством – это повышение надежности и долговечности проектируемых машин и конструкций, снижение их металлоемкости и трудоемкости изготовления. Основной причиной, приводящей к преждевременному выходу сварных конструкций из строя и неэкономному расходу металла, является несовпадение расчетной и конструкционной прочности. Наиболее остро эта проблема стоит для сварных конструкций с угловыми швами, работающими при переменном нагружении. Существующие отечественные и зарубежные методы расчета сварных соединений с угловыми швами на выносливость слабо учитывают влияние главного фактора – концентрации напряжений. Концентрация напряжений в сварных соединениях, зависящая от размеров соединяемых элементов и швов, учитывается только в разработанном в МВТУ им. Н.Э. Баумана методе расчета сварных соединений с поперечными угловыми швами на выносливость. В то же время значительная часть сварных конструкций имеет соединения с продольными угловыми швами. Разработанный в МВТУ им. Н.Э. Баумана метод расчета не может быть непосредственно распространен на соединения с продольными угловыми швами, так как нет программных средств для вычисления локальной концентрации напряжений в таких соединениях и не известен предел выносливости соединений с продольными швами, выраженный в локальных напряжениях.

Настоящая работа является частью программы исследований, выполняемых в соответствии с Программой ГКНТ по проблеме 0.72.01 (Приложение № 7 к постановлению ГКНТ и АН СССР от 10.11.1985г. № 573/137).

Цель работы состоит в разработке рекомендаций по расчету на выносливость сварных соединений с продольными угловыми швами с учетом концентрации напряжений.

Методы исследования. Расчетные методы включали в себя метод конечных элементов, методы математической статистики.

Экспериментальный метод состоял в определении прочности сварных соединений с продольными угловыми швами при переменных нагрузках на машине EUS-100 .

Научная новизна. I. С использованием разработанного метода определения концентрации напряжений в сварных соединениях с продольными угловыми швами установлено, что коэффициент локальной концентрации напряжений в них в 2,5–4 раза выше, чем в соедине-

I

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1484783

Саликов В.А. Определение на

М В Т У
им. Н. Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

ниях с поперечными швами. Максимальные значения напряжений наблюдаются в ближайшей точке перехода основного металла к шву.

2. Локальные пределы выносливости в сварных соединениях с продольными швами обратно пропорциональны коэффициентам локальной концентрации напряжений в них; они в 1,7-2 раза выше, чем в соединениях с поперечными угловыми швами.

Практическая ценность.

1. Разработан комплекс программ, позволяющий определять объемное распределение напряжений в сварных соединениях с продольными угловыми швами, в том числе и у вершины предельно острого концентратора напряжений.

2. Получены значения пределов выносливости (по критерию зарождения трещины $\ell = 1-3$ мм), для 5 серий образцов с продольными угловыми швами.

3. Разработаны рекомендации по расчету сварных соединений с продольными угловыми швами на выносливость с учетом концентрации напряжений, вызванной размерами соединяемых элементов и швов.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы использованы для разработки рекомендаций по расчету сварных соединений с продольными угловыми швами с учетом концентрации напряжений на выносливость. Разработанный метод расчета соединений с продольными швами используется для расчета сварных конструкций на ПО "ЖДАНОВТЯЖМАШ".

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, шести глав, общих выводов, списка литературы и приложения. Изложена на 197 страницах машинописного текста, содержит 60 рисунков, 20 таблиц и 129 наименований литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава I. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ
Экспериментальному определению выносливости сварных соединений с продольными угловыми швами посвящено довольно много исследований. Испытания проводились в нашей стране Труфяковым В.И., Дучинским Б.Н., Кудрявцевым Н.В., Гохбергом М.М., Клыковым Н.А., Ямановым В.М., Бать А.А. и другими, за рубежом Герни Т., Мюнзе В., Меддоксом С., Харрисоном Д., Берге С., Пухнером О., Вилсоном В. и другими.

Наибольшее число исследований относится к соединениям с присоединяемыми ребрами. В то же время даже для таких соединений нет однозначного ответа на вопрос, изменение каких линейных размеров соединяемых элементов приводит к наиболее существенному изменению концентрации напряжений. Наименее исследованы соединения с присоединенными продольными угловыми швами промежуточными элементами (проставками). Для таких соединений не известен даже уровень концентрации напряжений. В то же время из существующих литературных данных следует, что абсолютные размеры соединений с продольными угловыми швами и в особенности соотношение размеров соединяемых элементов оказывает существенное влияние на выносливость соединений. Пределы выносливости соединений с продольными швами одного типа, различающихся размерами соединяемых элементов и швов, могут отличаться в несколько раз.

Существующие методы расчета сварных соединений с угловыми швами на выносливость, как отечественные, так и зарубежные, не учитывают влияния концентрации напряжений в соединениях с продольными швами на пределы выносливости в зависящей от размеров соединяемых элементов и швов.

В отраслевой лаборатории "Прочность сварных конструкций" МВТУ им. Н.Э. Баумана, Дубровским В.А. под руководством Винокурова В.А. разработан метод расчета сварных соединений с поперечными угловыми швами на выносливость, учитывающий концентрацию напряжений, зависящую от схемы передачи силового потока в соединении и его конкретных размеров. Метод расчета использует положения механики разрушения для описания напряженно-деформированного состояния в предельно острых концентраторах напряжений таких, как галтель и корень шва. Расчетная формула для определения допускаемого номинального напряжения при произвольной характеристике цикла R имеет вид

$$[\sigma_R] = \gamma_R \cdot \frac{[\sigma_{R_0}]}{\sqrt{A_R}} \quad (1)$$

где γ_R - коэффициент, учитывающий асимметрию цикла R ; $[\sigma_{R_0}]$ - локальный предел выносливости при асимметрии цикла $R=0$ для соединений с поперечными швами; A_R - значение локальной концентрации напряжений в соединении.

Однако непосредственное распространение данного метода на соединения с продольными швами невозможно ввиду того, что не известны значения локальной концентрации напряжений A_R и локального предела выносливости $[\sigma_{R_0}]$ для таких соединений. Для вы-

числения σ_n в соединениях с продольными угловыми швами необходимо решить задачу методом конечных элементов об объемном распределении напряжений и деформаций в соединении, с учетом их сингулярности у вершины предельно острого концентратора в месте окончания шва. Для корректного описания напряженно-деформированного состояния у вершины концентратора наиболее целесообразно использовать специальные конечные элементы, обеспечивающие стремление напряжений к бесконечности в вершине концентратора. До настоящего времени программ и решений по определению σ_n в соединениях с продольными угловыми швами не было.

Для определения НДС и прочности сварных соединений с продольными угловыми швами с целью разработки метода расчета сварных соединений на усталость были поставлены следующие задачи.

1. Разработать комплекс программ для численного определения НДС сварных соединений с продольными швами.

2. Исследовать зависимость НДС конца продольного сварного шва от геометрических параметров и схемы передачи силового потока.

3. Провести экспериментальные исследования на выносливость сварных соединений из сталей СтЗсп и 09Г2 для различных катетов швов.

4. Определить значения допускаемых локальных напряжений для сварных соединений с продольными швами при переменных нагрузках.

5. Разработать метод расчета на прочность сварных соединений с продольными швами, работающими при переменных нагрузках.

Глава 2. РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НДС И ЛОКАЛЬНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В СОЕДИНЕНИЯХ С ПРОДОЛЬНЫМИ УГЛОВЫМИ ШВАМИ

Для определения полной концентрации напряжений применен двухстадийный подход, что обусловлено большими объемами требуемой оперативной памяти машины (либо времени счета). Первая стадия решения задачи - это определение объемного распределения напряжений и деформаций в целом соединении. В результате решения находится распределение напряжений, вызванное передачей силового потока в сварных соединениях с продольными угловыми швами. Затем выделяется фрагмент соединения с максимальной концентрацией нормальных напряжений в нем. Таким местом в указанных соединениях является окончание продольного шва. Вторая стадия решения задачи - это определение в выделенном фрагменте, нагру-

женном по контуру силами, найденными при решении задачи на первой стадии. На этом этапе определяется местная концентрация напряжений, зависящая от формы и размеров окончания шва. При этом учитывается наличие в соединении предельно острого концентратора и сингулярность напряжений у его вершины. При решении подобных задач по ряду соображений наиболее целесообразно применение метода конечных элементов. В качестве характеристики НДС сварных соединений с продольными швами используется деформационный критерий в виде средней деформации на небольшой базе непосредственно перед вершиной концентратора. В качестве локальной базы, на которой деформации и напряжения принимаются постоянными взята база 0,5 мм. Данная база выбрана из следующих соображений. Во-первых, необходимо как можно ближе приблизиться к вершине концентратора для отражения того, что напряжение у вершины стремится к бесконечности. Во-вторых, так как имеем дело с кристаллическим материалом, необходимо выйти за пределы зоны, где материал анизотропен.

Локальная концентрация напряжений определяется как отношение вычисленного среднего локального напряжения $\bar{\sigma}_0$ к номинальному значению напряжений $\bar{\sigma}$ и обозначается λ_n . Значение λ_n зависит от линейных размеров детали, но не зависит от радиуса у вершины концентратора, который принят равным нулю. В отличие от существующих методов расчета на прочность при переменных нагрузках в разработанном методе учитывается концентрация напряжений, зависящая от размеров. Номинальный предел выносливости $\bar{\sigma}_{N,A}$ обратно пропорционален λ_n

$$\bar{\sigma}_{N,A} = \frac{\bar{\sigma}_{D,N,A}}{\lambda_n} \quad (2)$$

где индексы N и A указывают на зависимость номинального и локального пределов выносливости $\bar{\sigma}_{N,A}$ от числа циклов N и характеристики цикла нагружения A . Значение λ_n в соединениях с продольными угловыми швами определяется по перемещениям точек сферы радиуса 0,5 мм, окружающих концентратор. Для этого применяется специальное разбиение на конечные элементы. Причем к вершине концентратора подходят специальные элементы, позволяющие описывать распределение деформаций у вершины следующего вида

$$\epsilon_{i,j} = C_0 r^{-1/2} + C_1 r^{-1} + C_2 \quad (3)$$

где r - расстояние до вершины.

Ввиду того, что исходная информация для решения подобных

задач может составлять сотни и даже миллионы цифр был разработан комплекс программ по автоматизированной подготовке данных. Автоматизированная подготовка данных осуществляется как для задач первого этапа, так и для задач второго этапа.

Для повышения эффективности решения задач МКЭ применен метод упорядочения ширины полосы матрицы жесткости, называемый обратным упорядочением Катхилла-Макки. Для проверки правильности работы программы разбиения осуществлялось графическое представление результатов подготовки данных. Правильность работы механической задачи МКЭ осуществлялась сравнением решений, полученных для простейших случаев, с результатами, полученными аналитически по теории упругости, а также сравнением объемных задач приведенных к плоской деформации с решениями для плоской задачи. Во всех случаях получено полное совпадение результатов.

Глава 3. РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМНОГО НДС СОЕДИНЕНИЙ С ПРОДОЛЬНЫМИ УГЛОВЫМИ ШВАМИ И ЛОКАЛЬНАЯ КОНЦЕНТРАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ

Расчет проводили для соединений с продольными угловыми швами, которые по внешнему виду и передаче силового потока могут быть разделены на шесть групп (рис 1). Типы соединений, входящих в эти группы, а также и сами рассматриваемые группы были выбраны в соответствии с имеющимися литературными данными по выносливости соединений. Расчеты проведены также для соединений, испытанных автором в отраслевой лаборатории "Прочность сварных конструкций" МНТИЭМАШ в МВТУ им. Н.Э.Баумана. Размеры рассчитанных соединений приведены в таблице I. Для этих соединений получены распределения объемных напряжений и деформаций. Для описания соединений использовалось до 316 конечных двадцатиузловых квадратичных элементов с общим числом узлов более 2000. Во всех рассчитанных случаях наблюдалось совпадение места, где возникали максимальные нормальные напряжения, с местом начала разрушения во время испытаний. Таким местом является начало или окончание продольного шва.

Анализ распределений касательных напряжений, полученных для всех видов сварных соединений с продольными швами, показал, что следует различать напряженное состояние на каждом из двух катетов одного и того же шва. Так, для катета, через который входит силовой поток, максимальные напряжения $\tau_{\text{из}}$ наблюдаются

у конца шва, а в случае катета, через который выходит силовой поток, максимум ϵ_{yz} смещен от края шва на величину 0,5...0,7 катета.

Было установлено, что:

а) в сварных соединениях типа I изменение катета с 10 мм до 7 мм не приводит к существенному изменению концентрации напряжений;

б) наибольшее влияние на уровень концентрации напряжений в сварных соединениях типа III и IV оказывает длина ребра;

в) для рассмотренных соединений типа V изменение шва в пределах от 10 мм до 5 мм приводит к большему изменению уровня концентрации напряжений, чем изменение длины шва с 220 мм до 120 мм.

В таблице I приведены полученные значения локальной концентрации напряжений ϵ_p в соединениях с продольными угловыми швами, которые определялись по формулам:

$$\epsilon_p = \sigma \cdot E / \tau \quad (4)$$

$$\epsilon_p = \sigma_p / 6 \quad (5)$$

где τ — длина базы, на которой измеряется локальное перемещение; E — модуль упругости; σ — номинальное напряжение.

При сравнении значений локальной концентрации напряжений в соединениях с поперечными швами, вычисленных Аладинским В.В. ($\epsilon_p = 1,86...12,5$), с полученными значениями ϵ_p для соединений с продольными швами ($\epsilon_p = 5,2...32$), установлено, что вторые обладают локальной концентрацией напряжений в 2...4 раза более высокой, чем соединения с поперечными швами.

Глава 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ПРОДОЛЬНЫМИ УГЛОВЫМИ ШВАМИ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗКАХ

Экспериментальная часть работы выполнена в отраслевой лаборатории "Прочность сварных конструкций" МИНТЯЖМАШ в МВТУ им. Н.Э.Баумана на испытательной машине EUS-100. Эксперименты проводили в течение 1986-1988 годов. Было испытано пять серий образцов с продольными угловыми швами из сталей СтЗсп и 09Г2 (табл.2).

Все образцы были изготовлены в условиях производства на Калужском машиностроительном заводе. Образцы сваривали полуавтоматом А-537, проволокой Св-08Г2С, диаметром $d = 1,6$ мм в среде CO_2 . Испытания проводили на трех уровнях нагружения с частотой 460...550 цикл/мин и характеристике цикла $R = 0,3$ при растяжении. Баз

Таблица I

Соединения		K	B ₁	L ₁	δ ₁	B ₂	L ₂	δ ₂	H ₂	L ₃	θ	L _н
Группа	Тип	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	град.	
I	I	10	60	300	12	180	140	12	-	-	90	14,5
	2	7	60	300	12	180	140	12	-	-	90	15,0
	3	10	60	300	12	180	140	12	-	-	135	14,0
	4	7	60	300	12	80	140	12	-	-	90	12,5
II	I	10	60	180	12	80	20	12	-	120	90	5,2
III	I	6	40	180	12	50	85	8	-	-	90	6,9
	2	8	75	400	12,6	38	75	12,6	-	-	90	7,4
IV	I	10	80	470	20	80	120	20	-	-	90	11,3
	2	8	37	267	12	100	75	12	-	-	90	6,7
	3	6	30	290	12	30	80	10	-	-	90	6,8
	4	8	51	305	14	38	76	14	-	-	90	8,0
V	I	10	80	330	18	50	120	10	60	75	90	12,3
	2	7	80	330	18	50	120	10	60	75	90	14,0
	3	5	80	330	18	50	120	10	60	75	90	15,9
	4	10	80	340	18	50	130	10	60	75	90	11,9
	5	10	80	430	18	50	220	10	60	75	90	10,8
VI	I	10	80	350	20	38	130	12	-	100	90	15,0
	2	10	80	470	20	80	120	10	-	20	90	32,0

испытаний принималась равной $2 \cdot 10^6$ циклов.

В каждой серии испытывали 8...10 образцов. Образцы термообработке не подвергались. Испытания образцов каждой серии проводили по критерию достижения трещины длины $l = 1...3$ мм, которую фиксировали с помощью специальных датчиков. Датчики наклеивали на образцы у мест предполагаемого зарождения трещины. Для образцов подобного типа таких мест восемь. Во всех случаях трещины зарождались из этих мест. В ряде случаев трещины зарождались одновременно в нескольких местах (до 4-х трещин от различных концов швов).

Номинальные пределы выносливости определяли с применением статистической обработки на ЭВМ. Значения номинальных пределов выносливости приведены в таблице 2 при вероятности неразрушимости $P = 0,5$ и базе $N = 2 \cdot 10^6$ циклов.

По данным испытаниям образцов из стали СтЗсп (серии I и 2) с катетом 7 мм и 10 мм установлено, что уменьшение катета в данных пределах не приводит к уменьшению предела выносливости.

Таблица 2

№ пп серии	Тип соединения (в соответствии с табл. I)	Марка стали	Размер катета шва K , мм	Число испытанных образцов в серии	Номинальный предел выносливости σ_{-1} , МПа
1	I - 2	Ст3	7	8	63
2	I - I	Ст3	10	10	62
3	I - 2	09Г2	7	9	66
4	I - I	09Г2	10	9	65
5	I - 4	09Г2	7	9	79

Так, для соединений с катетом 7 мм (тип I - 2) $\sigma_{-1} = 63$ МПа, а для соединений с катетом 10 мм (тип I - I) $\sigma_{-1} = 62$ МПа.

Для соединений из стали 09Г2 (серии 3 и 4) уменьшение катета с 7 мм до 10 мм также не приводит к снижению предела выносливости σ_{-1} (66 МПа и 65 МПа соответственно).

Применение низколегированной стали 09Г2 вместо стали Ст3п повышает номинальный предел выносливости соединений на 5%. Соединения серии 5 отличались шириной проставки b_2 (рис 1). Уменьшение ширины проставки с 360 мм до 160 мм вызывает повышение предела выносливости приблизительно на 16...20% (66 МПа и 79 МПа соответственно).

Изменение катета с 10 до 7 мм для серий 1, 2 и 3, 4 практически не повлияло ни на изменение α_D (14,5 и 15,0 соответственно), ни на значение предела выносливости. При уменьшении ширины проставки с 330 мм до 160 мм (серии 3 и 5) значение σ_{-1} повышается с 66 МПа до 79 МПа, а α_D снижается с 15 до 12,5, что находится в обратно пропорциональной зависимости. Этот результат подтверждает основную гипотезу, использованную при разработке метода расчета по локальным напряжениям, о независимости локальных пределов выносливости от формы сварных соединений.

Глава 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ ЛОКАЛЬНЫХ РАЗРУШАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗКАХ И ОБОСНОВАНИЕ УРОВНЯ ДОПУСКАЕМЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ СОЕДИНЕНИЙ С ПРОДОЛЖИТЕЛЬНЫМИ ШВАМИ

Вычисление значений локальных разрушающих напряжений при переменных нагрузках производится по формуле

$$\sigma_{Dk} = \alpha_D \cdot \sigma_{maxk} \quad (6)$$

где α_D - локальная концентрация напряжений, соответствующая данному соединению; σ_{maxk} - значение номинального разрушаю-

щего напряжения, полученного в результате испытания соединения при заданной асимметрии цикла

По формуле (6) рассчитывали все 242 значения разрушающих напряжений, полученных в результате экспериментальных исследований соединений с продольными угловыми швами. Все результаты разделены на две группы по критерию завершения разрушения (по полному разрушению и по трещине длиной $l = 1 \dots 5$ мм).

Обработка полученных значений σ_{λ} проводилась по двухфакторному регрессионному анализу. В качестве зависимой величины устанавливалось значение σ_{λ} , а независимыми – асимметрия цикла R и число циклов до завершения испытания N . Получены регрессионные уравнения для вероятности неразрушимости $P = 0,5$. Было проведено сравнение полученных значений $[\sigma_{\lambda}]_{0,5}$ и средних квадратических отклонений S для двух групп. Установлено, что данные, полученные по критерию $l = 1 \dots 5$ мм и полному разрушению, могут обрабатываться совместно. В результате совместной обработки результатов получено, что на базе $2 \cdot 10^6$ циклов соединениям с продольными швами соответствует локальный предел выносливости $[\sigma_{\lambda}]_{0,5} = 740$ МПа для вероятности разрушимости $P = 0,5$.

По результатам совместной статистической обработки локальных разрушающих напряжений сварных соединений в функции α_{λ} установлено, что средние значения логарифма отношения локальных разрушающих напряжений располагаются примерно по горизонтальной линии, что указывает на слабую зависимость значений локального предела выносливости от α_{λ} . Поэтому номинальный предел выносливости $[\sigma_{\lambda}]_P$ для практических расчетов можно определять по следующей формуле

$$[\sigma_{\lambda}]_P = [\sigma_{\lambda}]_P / \alpha_{\lambda} \quad (7)$$

где $[\sigma_{\lambda}]_P$ – локальный предел выносливости, установленный по заданной вероятности неразрушимости P при асимметрии цикла R .

Сравнение локального предела выносливости для продольных швов с известным значением для поперечных швов показало, что для соединений с продольными швами $[\sigma_{\lambda}]_{0,5}$ в 1,8 раза выше, чем для соединений с поперечными швами (740 МПа и 400 МПа соответственно). Данное различие можно объяснить, если воспользоваться статистической теорией подобия усталостных разрушений, разработанной Когаевым В.П..

Установлено, что в соединениях с поперечными угловыми швами объем высоконапряженного металла, в котором σ больше некото-

рого значения U , при котором возможно возникновение трещины, больше, чем у соединений с продольными швами, в десятки и даже сотни раз. Для ориентировочной оценки влияния объема на прочность получено уравнение, связывающее выносливость соединений с продольными и поперечными швами

$$b_{p \max \text{ попер.}} = \frac{b_{p \max \text{ прод.}} - U}{m \sqrt{V}} + U \quad (8)$$

где b_p - длина концентратора в соединении с поперечными швами; $m = 5,2$; $U = 70$ - коэффициенты. Для получения большего числа экспериментальных данных.

Согласно литературным данным, в диапазоне вероятностей $0,01 \leq P \leq 0,99$ для описания функций распределения пределов выносливости через $b_{\max}$ наиболее целесообразно пользоваться нормальным законом распределения величины $\lg(b_{\max})$. Определены допускаемые локальные напряжения при $R = 0$ для различных N с различной вероятностью неразрушимости P по положению линий, которые проходят параллельно линии средних значений и соответствуют различным вероятностям P .

Допускаемые локальные напряжения в области растяжения при других асимметриях цикла могут быть вычислены по формулам, полученным по результатам проведенной статистической обработки. В области сжатия значение допускаемого локального напряжения получено из приведенного в литературе соотношения

$$b_{\text{сж}}/b_{\perp} = 2 \quad (9)$$

где $b_{\text{сж}}$ - номинальный предел выносливости при пульсирующем сжатии; $b_{\perp}$ - номинальный предел выносливости при симметричном цикле нагружения. По полученным значениям допускаемых напряжений при $N = 2 \cdot 10^6$ циклов и $P = 0,5$ построена диаграмма локальных предельных напряжений, в координатах $b_{\max D_A}$ ($b_{\min D_A}$) и $b_{m D_A}$, где $b_{\max D_A}$ ($b_{\min D_A}$) и $b_{m D_A}$ - соответственно максимальное (минимальное) и среднее локальное напряжение.

Значения локальных пределов выносливости $[b_{D_A}]$ при различных R признано целесообразным выразить через значения локального предела выносливости $[b_{D_0}]_P$ при $R = 0$ и коэффициент γ_A . Формула, связывающая $[b_{D_A}]_P$ с $[b_{D_0}]_P$, имеет следующий вид

$$[b_{D_A}]_P = \gamma_A \cdot [b_{D_0}]_P \quad (10)$$

Значения γ_A приведены в виде уравнений в зависимости от R , которые получены в результате статистической обработки и по литературным данным.

Глава 6. МЕТОД РАСЧЕТА НА ВЫНОСЛИВОСТЬ СОЕДИНЕНИЙ С ПРОДОЛЬНЫМИ УГЛОВЫМИ ШВАМИ

Расчет сварных соединений по данному методу производится по номинальным допускаемым напряжениям в основном металле. Необходимо, чтобы выполнялось следующее условие

$$\sigma_{\max R} \leq [\sigma_R]_P \quad (II)$$

где $\sigma_{\max R}$ - наибольшее номинальное напряжение в основном металле при произвольной характеристике цикла нагружения R , МПа; $[\sigma_R]_P$ - допускаемое номинальное напряжение в основном металле при произвольной характеристике цикла нагружения R для принятой в расчете на выносливость вероятности неразрушимости P , МПа.

Формула для определения допускаемого номинального напряжения в соотношении (II) получена из соотношения (7), (10) и имеет вид

$$[\sigma_R]_P = \gamma_R \cdot \frac{[\sigma_{\sigma_0}]_P}{\sigma_0^{\alpha_0}} \leq [\sigma'] \quad (12)$$

где γ_R , $[\sigma_{\sigma_0}]_P$, σ_0 , α_0 - см. формулы (7) и (10); $[\sigma']$ - допускаемое напряжение в сварном соединении при расчете на статическую прочность.

Значения $[\sigma_{\sigma_0}]_P$ (при $P = 0,5; 0,95; 0,96; 0,97; 0,98; 0,99$) и γ_R в формуле (12) приведены соответственно в табл. 4 и табл. 3. Данный метод предназначен для расчетов сварных соединений при $10^5 \leq N \leq 5 \cdot 10^6$ циклов.

В случае необходимости расчета сварных соединений с продольными угловыми швами, отличных от приведенных на рис. 1 и табл. I, необходимо вычисление σ_0 с помощью разработанного комплекса программ.

В работе приведены примеры расчета сварных соединений с продольными угловыми швами с помощью разработанного метода.

Проведено сравнение различных методов с разработанными. Сравнивались методы СНиП-23-81, РД-50-551-85 и метод МВТУ с помощью относительного показателя, в качестве которого приняли коэффициент запаса по выносливости n_c .

$$n_c = \sigma_R / [\sigma_R]$$

где σ_R - опытный предел выносливости при вероятности неразрушения $P = 0,5$ и $N = 2 \cdot 10^6$ циклов, МПа; $[\sigma_R]$ - допускаемые напряжения или расчетное сопротивление при $N = 2 \cdot 10^6$ циклов, принятые в различных методах расчета, МПа.

Анализ полученных результатов показал, что коэффициенты запаса n_c в ряде случаев оказываются ниже единицы, и, следовательно

но, разрушение должно наступить раньше назначенной базы (число циклов до разрушения может быть в 10 раз ниже базового).

При расчете по методу МВТУ n_c во всех случаях больше единицы (табл.5). При расчете по методу МВТУ меньше также и значение среднего квадратического отклонения. Так для СНИП-23-81 при $0,52 \leq n_c \leq 1,8$ $S=0,36$; для РД-50-551-85 при $0,4 \leq n_c \leq 2,5$ $S=0,69$, а для метода МВТУ при $1,18 \leq n_c \leq 2,2$ $S=0,29$.

Таблица 3

Вид нагружения	Характеристика цикла нагружения	Формула для вычисления коэффициента χ_R
Растяжение	$-1 \leq R \leq 1$	$\chi_R = \frac{1}{1 - 0,835R}$
Сжатие	$-1 \leq R \leq 1$	$\chi_R = 2 / (1 - R); [5]_R \leq [6]$

Применение разработанного метода расчета соединений с продольными угловыми швами и комплекса программ для расчета таких соединений позволит получить экономический эффект при изготовлении и эксплуатации сварных конструкций разработанных на ПО "ЖДАНОТЯЖМАШ" в размере 40000 рублей за счет повышения срока службы разрабатываемых изделий.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Существующие методы расчета сварных соединений с продольными угловыми швами учитывают концентрацию напряжений недостаточно полно. Учет концентрации напряжений производится только в зависимости от типа соединения, но не от его размеров.
2. Разработан комплекс программ, позволяющий рассчитывать методом конечных элементов объемное напряженно-деформированное состояние в сварных соединениях с продольными угловыми швами. Применение этих программ дает возможность вычислять локальные перемещения вблизи окончания продольного углового шва и определять коэффициенты локальной концентрации напряжений α_D .
3. Впервые определено объемное поле деформаций и напряжений у окончания продольного углового шва для различных типов сварных соединений. Вычислены коэффициенты локальной концентрации напряжений α_D 18 соединений. Значения α_D оказались в пределах от 5,2 до 32.
4. Сравнение значений локальной концентрации напряжений у продольных и поперечных швов показало, что они больше у продольных швов в 2...4 раза.
5. Испытания сварных соединений с продольными швами обнаружили,

- что для соединений с вваренной проставкой, выполненных из Ст3 и стали 09Г2, уменьшение катета шва с 10 мм до 7 мм не приводит к изменению предела выносливости на базе $N=2 \cdot 10^6$ циклов. Сопоставление результатов испытаний для соединений, выполненных из Ст3 и стали 09Г2, указывает на несколько более высокий предел выносливости для стали 09Г2 (около 7%).
6. Обработка экспериментальных данных испытаний соединений с продольными швами (собственных и опубликованных в литературе, всего 242 точки), с помощью вычисленных коэффициентов локальной концентрации α_d , позволила определить локальный предел выносливости, на базе $N = 2 \cdot 10^6$ циклов, для соединений с продольными угловыми швами, который составил $\sigma_{d,0} = 740$ МПа при $R = 0,5$ и $\sigma_{d,0} = 464$ при $R = 0,95$.
 7. Установлено, что локальные пределы выносливости в сварных соединениях с продольными швами в 1,7...2,0 раза выше, чем у соединений с поперечными швами.
 8. Использование статистической теории подобия усталостного разрушения позволило объяснить указанное в пункте 7 различие локальных пределов выносливости для соединений с поперечными и продольными швами. Различие уровня пределов выносливости в соединениях с продольными и поперечными угловыми швами связано с различием объемов высоконапряженного металла у вершины концентраторов. Установлена зависимость, позволяющая определять пределы выносливости от объема высоконапряженного металла у концентратора напряжений.
 9. Разработанный метод расчета на выносливость позволил в отличие от существующих методов учесть концентрацию напряжений в зависимости от размеров сварных соединений с продольными угловыми швами и характера передачи нагрузки.
 10. Сравнение метода расчета МВТУ им. Н.Э. Баумана с другими методами показывает, что фактические коэффициенты запаса по пределам выносливости в методе МВТУ находятся в диапазоне от 1,18 до 2,2, в то время как в существующих методах они колеблются от 0,4 до 2,5. Это позволяет не допускать возможности преждевременного выхода из строя сварных конструкций.
 - II. Применение разработанного метода расчета соединений с продольными угловыми швами и комплекса программ для расчета таких соединений позволит получить экономический эффект при изготовлении и эксплуатации стержневых конструкций разрабатываемых

мх на ПО "ЭЛАНОВТЯМАЛ" в размере 40000 рублей.

Основное содержание диссертации отражено в работах:

- I. Пути совершенствования сварных конструкций / Г.А.Николаев, В.А.Винокуров, В.В.Аладинский, В.А.Саликов // Тр.МВТУ. - 1988. - № 511. - Вып. 3. - С. 4 - 20.
2. Определение концентрации напряжений в сварных соединениях с продольными угловыми швами численными методами / В.А.Саликов, В.А.Винокуров, А.С.Куркин, В.В. Аладинский // Известия вузов. Машиностроение. - 1988. - № II. - С. 127 - 131.

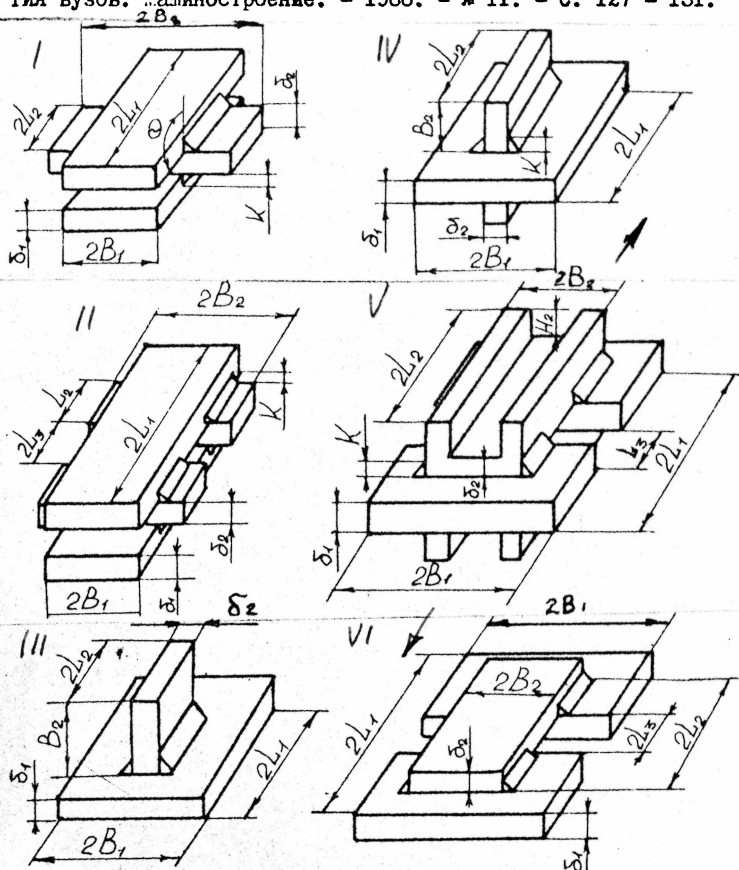


Рис. I. Основные типы рассматриваемых соединений

Таблица 4

Вероятность неразрушения, P	Уравнение для определения допускаемого локаль- ного напряжения для числа циклов N и аси- метрии цикла $R = 0$	
0,5	$\lg [S_{\sigma_0}]_{0,5} = 4,7303 - 0,2954I$	$\lg N$
0,95	$\lg [S_{\sigma_0}]_{0,95} = 4,5280 - 0,2954I$	$\lg N$
0,96	$\lg [S_{\sigma_0}]_{0,96} = 4,5150 - 0,2954I$	$\lg N$
0,97	$\lg [S_{\sigma_0}]_{0,97} = 4,4990 - 0,2954I$	$\lg N$
0,98	$\lg [S_{\sigma_0}]_{0,98} = 4,4777 - 0,2954I$	$\lg N$
0,99	$\lg [S_{\sigma_0}]_{0,99} = 4,4443 - 0,2954I$	$\lg N$

Таблица 5

№ III	S_{σ_0} , МПа при $N = 2 \cdot 10^6$ циклов	Метод расчета				
		СНИП-23-81		РД-50-551-85		МВТУ
		Фактич. коэф. за- паса n_s	Фактичес. долговеч. N_s	Фактич. коэф. запаса n_s	Фактич. долгов. N_s	Фактичес. коэфф. запаса n_s
I.	62	0,7	$5,6 \cdot 10^5$	0,56	$5 \cdot 10^5$	1,4
2.	60	0,64	$4 \cdot 10^5$	0,55	$5 \cdot 10^5$	1,4
3.	66	0,71	$5,8 \cdot 10^5$	0,6	$6,0 \cdot 10^5$	1,5
4.	65	0,71	$5,8 \cdot 10^5$	0,6	$6,0 \cdot 10^5$	1,5
5.	77	0,83	$1 \cdot 10^6$	0,7	$8,8 \cdot 10^5$	1,47
6.	60	1,1		0,86	$1,4 \cdot 10^6$	1,8
7.	90	1,29		0,56	$5 \cdot 10^5$	1,64
8.	62	0,79	$8,2 \cdot 10^5$	2,5		2,2
9.	62	0,79	$8,2 \cdot 10^5$	2,5		2,0
10.	64	0,7	$5,6 \cdot 10^5$	0,9	$1,65 \cdot 10^6$	1,49
11.	28	0,52	$1,9 \cdot 10^5$	0,4	$2,1 \cdot 10^5$	1,3
12.	95	1,0		1,0		1,51
13.	69	1,3		0,62	$6,5 \cdot 10^5$	1,84
14.	46	0,66	$4,3 \cdot 10^5$	1,84		1,22
15.	110	1,6		1,6		1,82
16.	90	1,25		1,3		1,6
17.	120	1,8		1,7		2,1
18.	122	1,3		1,1		1,3
19.	88	1,2		1,26		1,22
20.	43	0,6	$3,2 \cdot 10^5$	1,7		1,18