

4449872

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ,
С С С Р

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

На правах рукописи

ДУБРОВСКИЙ Владимир Анатольевич

УДК 621.791.052

РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА НА ВЫНОСЛИВОСТЬ СВАРНЫХ
СОЕДИНЕНИЙ С ПОПЕРЕЧНЫМИ УГЛОВЫМИ ШВАМИ С УЧЕТОМ
КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ

(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 ВИНУКОВ В.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор ВЕРШИНСКИЙ А.В.
кандидат технических наук,
с.н.с. ЛУЦК О.А.

Ведущее предприятие – ВНИИТМАШ, г. Москва

Защита диссертации состоится "9" апреля 1987 г. в
часов на заседании специализированного совета К053.15.03

в Московском
ордена Труда
им. Н.Э.Баумана

и
ише
5.

Ваши о
просим высл

тью,

С дисс
Н.Э.Баумана

им.

Авторе

11449872

Ученый
специализи
к.т.н

и

Л-44645

Подписано
Тираж 100

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Повышение надежности и долговечности проектируемых машин и конструкций, снижение их металлоемкости и трудоемкости изготовления, предусмотренные решениями XXVII съезда КПСС, неразрывно связаны с совершенствованием методов расчета. Так как большая часть конструкций эксплуатируется при переменных нагрузках, то совершенствование методов расчета особенно актуально в отношении соединений, рассчитываемых на выносливость.

В сварных конструкциях наиболее часто используют соединения с угловыми швами. Существующие отечественные и зарубежные методы расчета сварных соединений на выносливость учитывают влияние ряда основных факторов. Однако, влияние главного фактора — концентрации напряжений отражено этими методами расчета недостаточно. Зависимость концентрации напряжений от размеров сварных соединений (толщины основного металла, размера катета шва и их соотношений) современными методами расчета не учитывается. Неучет указанной концентрации напряжений приводит в одних случаях к перерасходу основного и наплавленного металла, а в других — к преждевременному выходу конструкций из строя в эксплуатации.

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

Цель работы состоит в разработке метода расчета на выносливость сварных соединений с поперечными угловыми швами с учетом концентрации напряжений.

Методы исследования. Прочность сварных соединений с поперечными угловыми швами при переменных нагрузках определяли экспериментально на машине EUS-100. Влияние размера катета шва на выносливость оценивали по результатам статистической обработки экспериментальных данных на ЭВМ "СМ-2". Общие закономерности изменения локальных разрушающих напряжений в зависимости от числа циклов и характеристики нагружения исследовали с применением методов математической статистики.

Научная новизна. Показана целесообразность и возможность использования локального напряжения в расчетах сварных соединений на выносливость в качестве средства учета концентрации напряжений, вызванной размерами толщин металла, катетов угловых швов и их соотношений.



Практическая ценность работы. Проведены испытания девяти серий образцов с поперечными угловыми швами и получены значения номинальных пределов выносливости. Установлена зависимость изменения номинального предела выносливости от размера катета шва и доли силового потока, передаваемого поперечными швами.

Разработан метод расчета сварных соединений с поперечными угловыми швами на выносливость с учетом концентрации напряжений, вызванной размерами толщин металла, катетов швов и их соотношений.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы использованы: а) при разработке проекта РТМ "Метод расчета на выносливость сварных соединений с поперечными угловыми швами с учетом концентрации напряжений"; б) для улучшения сварных конструкций ряда машин, выпускаемых Калужским машиностроительным заводом.

Основные положения работы докладывались на Всесоюзной научно-технической конференции "Современные проблемы технологии машиностроения" в г.Москве (29-31 января 1986 г.), на Всесоюзной научно-технической конференции "Экономия материальных, энергетических и трудовых ресурсов в сварочном производстве" в г.Челябинске (23-25 сентября 1986 г.) и на научном семинаре кафедры "Машины и автоматизация сварочных процессов" МВТУ им.Н.Э.Баумана (29 сентября 1986 г.).

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов и приложений. Изложена на 115 страницах машинописного текста, содержит 44 рисунка, 28 таблиц и 134 наименования литературных источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава I. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Прочность сварных соединений при переменных нагрузках зависит от конструкционных, технологических и эксплуатационных факторов. Среди конструкционных факторов основное влияние на выносливость оказывает концентрация напряжений.

В работах советских (Николаев Г.А., Навроцкий Д.И., Данилов С.А., Дучинский Б.Н., Макаров И.И., Прокофьева-Михайловская Л.Э., Гохберг М.М., Труфяков В.И., Кудрявцев И.В., Бакши О.А., Клыков Н.А., Серенсен С.В., Когаев В.П., Махутов Н.А., Иванова В.С. и др.) и зарубежных (Мюнзе В.Х., Форрест П., Вильсон В.М., Гарней Т., Солакиан А. и др.) ученых показано, что концентрация напряжений в сварных соединениях с поперечными угловыми швами

сильно влияет на выносливость и зависит от толщины основного металла S_1 , соотношения толщин основной пластины и накладки S_2/S_1 и катета шва K .

Среди технологических факторов наибольшее влияние оказывают радиус перехода, остаточные напряжения и неоднородность механических свойств. В соединениях с угловыми швами концентрацию напряжений в зоне перехода от основного металла к шву неизменно связывают с радиусом перехода, который безусловно влияет на ее уровень.

Однако измерения рассеяния радиусов по длине швов, проведенные Лукьяновым В.Ф., Луцком О.А., Аснисом А.Е., Ивашенко Г.А., Шроном Л.Б. и др., показывают, что радиусы могут принимать сколь угодно малые значения вплоть до нулевых. Это означает, что здесь имеет место случай, типичный для механики предельно острых концентраторов — радиус равен нулю. В такой ситуации представляется разумным не вводить радиус как расчетный фактор, а считать, что его влияние в статистическом плане проявится в конкретных уровнях выносливости сварных соединений. В соответствии с указанным подходом для оценки концентрации напряжений могут быть использованы либо критерии линейной механики $\sqrt{\sigma}$ -образных концентраторов, рассмотренные в работах Черепанова Г.П., Овчаренко Ю.Н. и др., либо критерий локального перемещения $\mathcal{D}$, предложенный Винокуровым В.А. При упругом нагружении в соответствии с указанной концепцией перемещение $\mathcal{D}$ на базе 0,5 мм у вершины предельно острого концентратора (в том числе и трещины), отнесенное к базе 0,5 мм, рассматривается как локальное напряжение $\sigma_{\mathcal{D}}$, а отношение $\sigma_{\mathcal{D}}$ к номинальному среднему напряжению σ — как коэффициент локальной концентрации напряжений $\alpha_{\mathcal{D}}$ ($\alpha_{\mathcal{D}} = \sigma_{\mathcal{D}}/\sigma$). Принципиальное отличие этого коэффициента концентрации напряжений (или деформаций) от традиционного $\alpha = \sigma_{\max}/\sigma$ состоит в том, что $\alpha_{\mathcal{D}}$ не зависит от радиуса закругления у вершины концентратора (при малых значениях радиуса).

Среди эксплуатационных факторов на прочность сварных соединений при переменных нагрузках наибольшее влияние оказывают характеристика цикла R и число циклов нагружений N .

Немногочисленные экспериментальные данные показывают, что размеры сварных соединений существенно влияют на выносливость сварных соединений с поперечными угловыми швами. Имеющиеся в литературе данные по влиянию размера катета лобового шва на предел выносливости получены на сварных образцах из зарубежных ста-

лей. Влияние степени нагруженности сварных швов на изменение пределов выносливости однотипных сварных образцов не изучалось.

Ни зарубежные, ни отечественные методы расчета на выносливость не учитывают влияние концентрации напряжений на пределы выносливости в зависимости от толщин металла S_1 и S_2 , катетов швов K и их соотношений (обозначения см. табл. I).

В отраслевой лаборатории "Прочность сварных конструкций" МВТУ им. Н.Э. Баумана, методом конечных элементов получены значения коэффициентов α_D при решении упругой задачи для сварных соединений с поперечными угловыми швами, типы которых приведены в табл. I. Это позволяет ставить вопрос о создании метода расчета на выносливость таких соединений с учетом указанной концентрации напряжений.

При выполнении настоящей работы в ней были поставлены следующие задачи.

1. Провести экспериментальные исследования влияния размеров сварного соединения S_1 , S_2/S_1 , K (см. табл. I) на выносливость и сопоставить результаты с изменением α_D .

2. Исследовать выносливость сварных соединений из сталей СтЗсп и 09Г2 и сравнить результаты.

3. Выполнить статистическую обработку значений локальных разрушающих напряжений, полученных на основе использования номинальных разрушающих напряжений в сварных соединениях с поперечными угловыми швами, в зависимости от числа циклов, типа концентратора, характеристики цикла, марок сталей для получения диаграммы локальных пределов выносливости.

4. Разработать структуру метода расчета сварных соединений с поперечными угловыми швами на выносливость.

5. Разработать текст руководящего технического материала для расчета сварных соединений при переменных нагрузках.

Глава 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫНОСЛИВОСТИ

СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ПОПЕРЕЧНЫМИ УГЛОВЫМИ ШВАМИ

Экспериментальная часть работы выполнена в Отраслевой лаборатории "Прочность сварных конструкций" Минтяжмаша в МВТУ им. Н.Э. Баумана на испытательной машине *FUS*-100. Эксперименты проводили в течение 1984-1986 годов. Было испытано девять серий образцов с поперечными угловыми швами из сталей 10ХСНД, СтЗсп и 09Г2 (табл. I). Из них семь серий образцов имели нагруженные швы (табл. I, поз. I-7) и по одной серии с частично нагруженными

ми (табл. I, поз. 8) и ненагруженными (табл. I, поз. 9) швами.

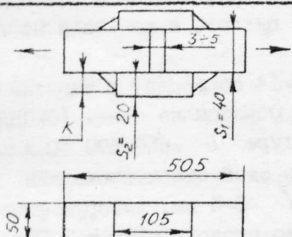
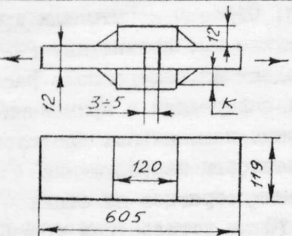
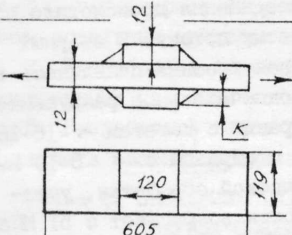
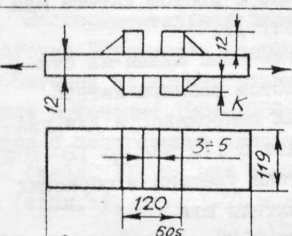
Все образцы были изготовлены в условиях производства на Калужском машиностроительном заводе. Образцы сваривали в "лодочку" полуавтоматом А-537, проволокой Св-08Г2С, диаметром $d = 1,6$ мм в среде CO_2 . Испытания проводили на пяти уровнях нагружения с частотой $f = 460-550$ цикл/мин и характеристике цикла $R = 0,3$ при растяжении. При испытании образцов из стали 10ХСНД база испытания принималась равной $2 \cdot 10^6$ циклов, а из стали СтЗсп и 09Г2 - $5 \cdot 10^6$ циклов.

В каждой серии испытывали от 10 до 14 образцов, в зависимости от рассеяния результатов испытаний. Образцы из стали 10ХСНД подвергали высокому отпуску при температуре $T = 650-670$ °С и выдержке 3,5 часа. Испытания образцов из этой стали проводили по критерию достижения трещиной длины $\ell = 3-5$ мм, которую фиксировали визуально. Испытания образцов из сталей СтЗсп и 09Г2 проводили по критерию полного разрушения. Образцы испытывали круглосуточно. В некоторых случаях были вынужденные остановки. Результаты испытания этих образцов не выпадают из общего поля рассеяния. Номинальные пределы выносливости определяли с применением статистической обработки и ЭВМ. Значения номинальных пределов выносливости приведены в табл. I при вероятности неразрушения $P = 0,5$ и базе $N = 2 \cdot 10^6$ циклов. При испытании образцов из стали 10ХСНД с угловыми швами с катетом $K = 8-10$ мм усталостная трещина появлялась в корне шва и разрушение соединения происходило по шву в направлении, перпендикулярном силовому потоку. В сварных образцах с катетом $K = 12-14$ мм усталостная трещина появлялась в месте перехода шва в основной металл, а окончательное разрушение образцов происходило по швам. Сварные образцы с катетом $K = 16-18$ мм разрушались по тому же механизму, что и образцы с $K = 8-10$ мм. По результатам испытания, после статистической обработки, установлено, что номинальный предел выносливости возрастает с 51 МПа до 54 МПа, а затем до 62 МПа соответственно с ростом катета шва $K = 8-10$ мм до 12-14 мм и 16-18 мм (табл. I).

Испытания сварных соединений с нагруженными швами из сталей СтЗсп и 09Г2 также показали, что с ростом размера катета шва с 7-9 мм до 9-11 мм номинальный предел выносливости для указанных соединений соответственно возрастает с 112 МПа до 120 МПа и с 140 МПа до 146 МПа (табл. I). Усталостная трещина в образцах из этих серий появлялась чаще всего от галтели шва.

Испытания сварных соединений из стали 09Г2 с частично наг-

Таблица I.

№ п/п се- рии	Эскиз сварного соеди- нения с поперечными угловыми швами	Марка стали	Размер катета шва К (в зна- менате- ле сре- днее значе- ние) мм	Число ис- пытанных образцов в серии	Номиналь- ный пре- дел вы- носливо- сти $\sigma_{0.2}$, МПа	
I		ИХСНД	$\frac{8-10}{9}$	I4	5I	
2			$\frac{12-14}{13}$	I3	54	
3			$\frac{16-18}{17}$	IO	62	
4		СтЗсп	$\frac{7-9}{8}$	II	II2	
5			$\frac{9-11}{10}$	I2	I20	
6		09Г2	$\frac{7-9}{8}$	IO	I40	
7				I2	I46	
8			$\frac{9-11}{10}$	I2	I52	
9				IO	I59	

руженными швами показали, что усталостная трещина всегда появляется от галтели шва и распространяется от концентратора перпендикулярно действию силового потока. В сварных соединениях с ненагруженными швами усталостная трещина также распространяется перпендикулярно действию приложенной нагрузки, но появляется чаще всего от корня шва.

По данным испытания образцов из стали 09Г2 с катетом шва $K=9-11$ мм установлено, что с увеличением нагрузки, передаваемой швами, предел выносливости снижается. Так, для соединений с ненагруженными швами $\sigma_{q3} = 159$ МПа, для частично нагруженных швов (47% нагрузки передается швами) $\sigma_{q3} = 152$ МПа, а для нагруженных швов $\sigma_{q3} = 146$ МПа (табл. I).

Сравнение зависимости номинального предела выносливости σ_{q3} и коэффициента α_D от изменения размера катета шва K показало, что между ними существует примерно обратная связь. С ростом катета шва K с 8-10 мм до 16-18 мм предел выносливости возрастает (табл. I), а коэффициент локальной концентрации напряжений снижается с 12,7 до 8,7. Аналогичный результат наблюдается и для сварных соединений с нагруженными швами из сталей СтЗсп и 09Г2, показывающий при увеличении катета шва с 7-9 мм до 9-11 мм рост предела выносливости (табл. I) и снижение α_D соответственно с 4,16 до 3,5. При уменьшении доли силового потока, передаваемого швами, номинальный предел выносливости возрастает (табл. I, поз. 7-9), а коэффициент α_D снижается с 3,5 до 2,6 и 2,38 соответственно для соединений с нагруженными, частично нагруженными и ненагруженными швами.

Места появления и направление распространения усталостных трещин соответствуют наибольшим расчетным значениям перемещений D .

Глава 3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МЕТОДА РАСЧЕТА НА ВЫНОСЛИВОСТЬ

Для нескольких видов сварных соединений из низкоуглеродистых и низколегированных сталей в диапазоне долговечностей $10^5 \leq N \leq 5 \cdot 10^6$ циклов и различных R по известным значениям α_D были пересчитаны по формуле $\sigma_{D_R} = \alpha_D \cdot \sigma_R$, полученные при испытании и взятые из литературы, номинальные разрушающие напряжения в локальные. Для каждого значения R между полученными локальными разрушающими напряжениями σ_{D_R} и долговечностями N устанавливали зависимость в виде прямой линии в логарифмических

координатах

$$\lg \sigma_{Dr} = b - a \cdot \lg N, \quad (I)$$

где a и b - коэффициенты, определяемые по методу наименьших квадратов.

Уравнение (I) представляет собой линию средних значений с вероятностью неразрушения $P = 0,5$. По результатам статистической обработки было установлено, что рассеяние локальных разрушающих напряжений заметно меньше, чем номинальных. Рассеяние значений локальных напряжений объясняется тем, что кроме учтенного в обработке конструкционного фактора в виде α_D , на выносливость также влияет рассеяние технологических факторов: радиусов перехода, уровней остаточных напряжений и неоднородности механических свойств металла околосварной зоны. Существенное снижение рассеяния локальных разрушающих напряжений по сравнению с номинальными объясняется учетом влияния концентрации напряжений.

Проводили также сравнение уровней локальных разрушающих напряжений сварных соединений из низкоуглеродистых и низколегированных сталей между собой. В настоящей работе не установлено по результатам статистической обработки значимых различий в локальных разрушающих напряжениях между соединениями из этих сталей, однако окончательный вывод должен быть сделан только после проведения более тщательных исследований. Поэтому в дальнейших обработках различий между указанными сталями не делали.

Сравнивали также локальные разрушающие напряжения сварных соединений при разрушении от корня и от галтели шва. В статистическом плане заметных различий для этих двух случаев между уровнями локальных разрушающих напряжений не установлено. Поэтому все имеющиеся данные независимо от места разрушения обрабатывали совместно.

Удаление каждого экспериментального значения локального разрушающего напряжения σ_{Dri} от уравнения линии (I), при конкретном N_i , оценивали с помощью χ^2 -логарифма отношения локального напряжения к среднему по уравнению (I).

По результатам совместной статистической обработки локальных разрушающих напряжений сварных соединений из низкоуглеродистых и низколегированных сталей в функции α_D установили, что нижние значения логарифма отношения локальных разрушающих напряжений располагаются примерно по горизонтальной линии, что указывает на слабую зависимость значений локального предела вынос-

ливости от α_D . Поэтому номинальный предел выносливости для практических расчетов можно определять по следующей формуле

$$[\sigma_R]_p = [\sigma_{DR}]_p / \alpha_D, \quad (2)$$

где $[\sigma_{DR}]_p$ - локальный предел выносливости (локальное допускаемое напряжение), установленный по заданной вероятности неразрушимости P при асимметрии цикла R ; $[\sigma_R]_p$ - номинальный предел выносливости (номинальное допускаемое напряжение), вычисленный по локальному пределу выносливости, который определен с заданной вероятностью неразрушения P при асимметрии цикла R .

Было показано, что отклонение логарифма отношения локальных разрушающих напряжений распределяется по нормальному закону. Допускаемые локальные напряжения при $R = 0$ для различных N были определены для различных вероятностей неразрушения P по положению линий, которые проходят параллельно линии средних значений (I) и соответствуют различным вероятностям P . Для характеристик цикла $R = -1$ и $R = 0,3$ допускаемые значения локальных напряжений (локальные пределы выносливости) были найдены при $N = 2 \cdot 10^6$ циклов также с различной вероятностью неразрушения P , а зависимость их от числа циклов N была принята той же, что и для $R = 0$. Значение допускаемого локального напряжения в области сжатия получено из приводимого в литературе соотношения

$$\sigma_{сж.} / \sigma_{-1} = 2,74, \quad (3)$$

где $\sigma_{сж.}$ - номинальный предел выносливости при пульсирующем сжатии; σ_{-1} - номинальный предел выносливости при симметричном цикле нагружения.

По полученным значениям допускаемых напряжений при $N = 2 \cdot 10^6$ циклов и $P = 0,95$ для $R = -1, 0$ и $0,3$ (растяжение) и $R = 0$ (сжатие) построили диаграмму локальных предельных напряжений, в координатах $\sigma_{max_{DR}} (\sigma_{min_{DR}})$ и $\sigma_{m_{DR}}$, где $\sigma_{max_{DR}} (\sigma_{min_{DR}})$ и $\sigma_{m_{DR}}$ - соответственно максимальное (минимальное) и среднее локальное напряжение. Между имеющимися точками проведены прямые линии. При $R > 0,3$ в области растяжения линия предельных локальных напряжений проведена параллельно лучу, выходящему из начала координат под углом 45° . При $R > 0$ в области сжатия линия предельных локальных напряжений экстраполирована от участка $-1 \leq R \leq 0$. Указанной линией допустимо пользоваться при значениях $R \leq 0,57$. При значениях $R >$

$> 0,57$ в области сжатия номинальное допускаемое напряжение следует принимать равным допускаемому напряжению при расчетах на статическую прочность. Полученный вид диаграммы локальных предельных напряжений, при $P = 0,95$ и $N = 2 \cdot 10^6$ циклов, принят аналогичным и при других значениях N и P .

Значения локальных предел выносливости (локальных допускаемых напряжений) $[\sigma_{D_R}]_P$ при различных R признано целесообразным выразить через значения локального предела выносливости $[\sigma_{D_0}]_P$ при $R = 0$ и коэффициент f_R . Формула, связывающая $[\sigma_{D_R}]_P$ с $[\sigma_{D_0}]_P$, имеет следующий вид:

$$[\sigma_{D_R}]_P = f_R \cdot [\sigma_{D_0}]_P, \quad (4)$$

Значения коэффициентов f_R приведены в виде уравнений в зависимости от R , которые получены по значениям локальных допускаемых напряжений в диаграмме локальных напряжений.

На результатах и выводах, полученных в данной главе, построен метод расчета на выносливость.

Глава 4. МЕТОД РАСЧЕТА НА ВЫНОСЛИВОСТЬ (метод МВТУ им. Н.Э.Баумана)

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

$$\sigma_{max_R} \leq [\sigma_R]_P, \quad (5)$$

где σ_{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 неразрушения P , МПа.

Формула для определения допускаемого номинального напряжения в соотношении (5) получена из уравнений (2), (4) и имеет следующий вид

$$[\sigma_R]_P = f_R \cdot \frac{[\sigma_{D_0}]_P}{\alpha_D} \leq [\sigma']_P, \quad (6)$$

где f_R , $[\sigma_{D_0}]_P$, α_D - см. формулы (2) и (4); $[\sigma']_P$ - допускаемое напряжение в сварном соединении при расчете на статическую прочность.

Значения $[\sigma_{D_0}]_{0,95}$ (при $P = 0,95$) и f_R в формуле (6) приведены соответственно в табл. 2 и табл. 3.

Для более высоких вероятностей неразрушения P значения

$[\sigma_R]_p$ приведены в работе в виде уравнений в зависимости от долговечности N .

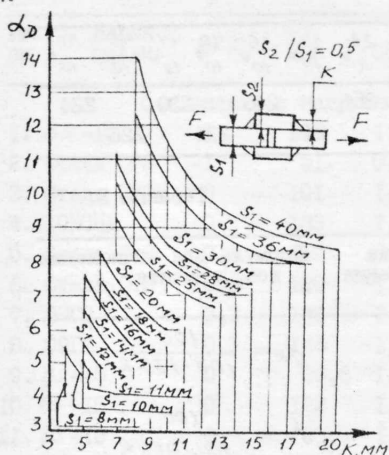


Рисунок. Номограмма для сварных соединений с нагруженными швами

В РГМ приведены также формулы расчета и для $1 \leq N < 10^5$ циклов, которые в диссертационной работе не рассматриваются.

Проводили сравнение значений допускаемых номинальных напряжений, которые определены по различным отечественным и зарубежным методам расчета с допускаемыми номинальными напряжениями, определенными по методу МВТУ им. Н.Э. Баумана. Сравнение проводили по абсолютным значениям допускаемых номинальных напряжений (расчетных сопротивлений) и относительному показателю, в качестве которого приняли коэффициент запаса по выносливости, определяемый по формуле

$$n_c = \sigma_R / [\sigma_R], \quad (7)$$

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

Проведенный анализ показал, что абсолютные значения допускаемых напряжений, принятые в методе расчета МВТУ им. Н.Э. Баумана, могут быть как больше, так и меньше, чем в других методах (СНиП, допускаемые напряжения в машиностроении, нормы краностроения).

При проектировании необходимо стремиться к тому, чтобы значения σ_D в формуле (6) были минимальными. В РГМ приведено 17 номограмм в удобном для практического использования виде; они аналогичны номограмме, показанной на рисунке. Указанные номограммы охватывают 4 типа сварных соединений с поперечными угловыми швами. Значение $[\sigma_R]_p$ в формуле (6) не должно превышать $[\sigma']$.

Изложенная выше часть РГМ предназначена для расчетов сварных соединений при $10^5 \leq N \leq 5 \cdot 10^6$ циклов. Для удобства использования в разработанном

Таблица 2.

циклы	20. 10 ⁵	40. 10 ⁵	80. 10 ⁵	12. 10 ⁶	16. 10 ⁶	20. 10 ⁶	24. 10 ⁶	28. 10 ⁶	32. 10 ⁶	36. 10 ⁶	40. 10 ⁶	44. 10 ⁶	48. 10 ⁶	50. 10 ⁶
	514	383	303	272	253	240	230	224						
МПа	443	331	285	262	246	235	226							

Таблица 3.

Раздел таблицы	σ_{max}	Характеристика цикла нагружения R	Формула для вычисления коэффициента f_R
		$-1 \leq R \leq 0$	$f_R = \frac{100}{100 - 1,35 R}$
А	Растяжение	$0 < R \leq 0,3$	$f_R = \frac{100}{100 - 0,61 R}$
		$0,3 < R < 1,0$	$f_R = \frac{100}{1,167(1 - R)}$
		$-1 \leq R \leq 0,57$	$f_R = \frac{100}{2,35(0,364 - 0,636 R)}$
Б	Сжатие	При $R > 0,57$ значение принять равным $[\sigma']$	$[\sigma_R]_p$ в (6)

Сравнение коэффициентов запаса по выносливости показало, что в методе МВТУ они находятся в пределах от 1,05 до 2,04 (табл. 4). В то же время коэффициенты запаса, получаемые по другим методам, изменяются от 0,37 до 3,03 (табл. 4), что в одних случаях приводит к преждевременному выходу конструкции из строя, а в других — к нерациональному использованию основного металла.

Установлено, что по сравнению с действующими отечественными методами расчета (СНиП, допускаемым напряжениям в машиностроении, нормам краностроения) сварных соединений при переменных нагрузках расчет по методу МВТУ им. Н. Э. Баумана позволяет на толщинах $S_f = 3-10$ мм экономить основной металл соответственно от 40% до 3%, а на толщинах S_f более 10 мм избегать преждевременного выхода из строя конструкций в эксплуатации.

Таблица 4.

№ п/п	Марка стали	R	σ_R , МПа	СНИП	По допускае- мым напряже- ниям	Нормы кра- нострое- ния	МВТУ
Соединения с нагруженными швами							
1. В5-15	0	109	1,2	3,03	1,71	1,09	
2. Сталь Ст3	-I	51	0,95	2,86	1,58	1,82	
3. Сталь Ст3	0	101	1,12	2,2	1,59	1,55	
4. 10ХСНД	0	133	1,44	1,77	2,69	2,04	
5. Сталь Ст3	0,3	112	0,94	2,49	1,39	1,40	
6. Сталь Ст3	0,3	120	1,0	2,67	1,49	1,27	
7. 09Г2	0,3	140	1,17	2,41	2,23	1,74	
8. 09Г2	0,3	146	1,23	2,52	2,32	1,55	
9. В5-15	0	96,6	1,07	2,68	1,51	1,58	
10. В5-15	0	122	1,36	3,4	1,91	1,40	
11. В5-15	0	93,5	1,04	2,6	1,47	1,41	
12. Сталь Ст3	0,3	44	0,37	0,97	0,55	1,05	
13. 15ХСНД	0,2	107	0,99	1,72	1,88	1,34	
14. В5-15	0	101	1,12	2,8	1,59	1,31	
15. М16С	0	80	0,89	1,82	1,25	1,77	
16. 10ХСНД	0,3	51	0,43	0,64	0,81	1,93	
17. 10ХСНД	0,3	54	0,45	0,68	0,86	1,73	
18. 10ХСНД	0,3	62	0,52	0,78	0,98	1,63	
Соединения с частично нагруженными швами							
19. Сталь Ст3	-I	66	0,92	1,93	0,95	1,54	
20. Сталь Ст3	0,2	200	1,39	2,9	1,5	1,70	
21. ВМСт3	0,3	180	1,12	2,38	1,3	1,70	
22. ВМСт3	0,3	188	1,17	2,49	1,36	1,77	
23. 09Г2	0,3	152	0,95	2,08	1,28	1,19	
24. 10ХСНД	0	107	0,89	1,6	1,15	1,48	
25. 10ХСНД	0	112	0,93	1,68	1,21	1,62	
26. 10Г2СД	-I	38	0,53	1,0	0,73	1,08	
27. 10Г2СД	0	110	0,91	1,58	1,19	1,32	
28. 15Г2С	0,5	240	1,17	1,61	1,86	1,69	
29. 09Г2С	-I	38	0,53	1,18	0,73	1,08	
30. 09Г2С	0	114	0,95	1,88	1,22	1,37	
31. 10Г2СД	-I	48	0,66	1,49	0,92	1,37	
32. 10Г2С1	-I	41	0,57	1,14	0,79	1,17	
33. М16С	-I	53	0,73	1,59	0,83	1,51	
34. М16С	0	98	0,81	1,51	0,82	1,19	
35. М16С	0,3	150	0,94	1,77	1,09	1,5	

В работах ИЭС им.Е.О.Патона приведены пределы выносливости ($P=0,5$) и расчетные сопротивления усталости R_R ($P=0,95$) для сварных соединений с частично нагруженными поперечными угловыми швами из низкоуглеродистых и низколегированных сталей, установленные по результатам статистической обработки данных, полученных при испытании сварных образцов толщиной $S_f=20-36$ мм. Как показал наш анализ, диапазон рассеяния фактических коэффициентов запаса по выносливости для указанного типа сварных соединений, определенный по расчетным сопротивлениям усталости R_R и допускаемым напряжениям $[\sigma_R]$, примерно тот же, что и в методе МВТУ им.Н.Э.Баумана. Однако, в отличие от метода ИЭС им.Е.О.Патона, в разработанном методе расчета на выносливость учтена также и концентрация напряжений в зависимости от размеров сварного соединения.

Сравнение допускаемых напряжений для сварных соединений с ненагруженными швами не приведено, так как в существующих методах расчета на выносливость их значения не указаны.

По сравнению с зарубежными нормами, которые были проанализированы в работе, нормы МВТУ им.Н.Э.Баумана являются более рациональными, так как в них учтена концентрация напряжений.

Необходимо отметить, что в данной работе исследована только та часть задачи, которая связана с определением допускаемых номинальных напряжений. Другая часть задачи, связанная с правильным определением расчетных стационарных нагрузок по действующим в реальном соединении нестационарным нагрузкам, в работе не рассматривалась и она, безусловно, нуждается в дальнейшем исследовании.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. В современных методах расчета на выносливость сварные соединения разделены на несколько групп и для каждой группы назначено одно допускаемое напряжение. Учет концентрации напряжений производится только в зависимости от вида соединения, но не от размеров толщин металла, катетов швов и их соотношений.

2. Полученные в отраслевой лаборатории расчетные данные о концентрации напряжений в сварных соединениях различного вида с поперечными угловыми швами показывают, что коэффициент локальной концентрации напряжений существенно зависит от характера передачи силового потока, толщин металла, катетов швов и их соотношений.

ношений.

3. Экспериментальные данные по пределам выносливости, полученные на нагруженных, частично нагруженных и ненагруженных сварных соединениях из сталей 10ХСНД, СтЗсп и 09Г2 показали, что в нагруженных соединениях с ростом катета шва номинальный предел выносливости повышается, что соответствует расчетным данным по изменению коэффициента локальной концентрации напряжений. Подтверждено изменение предела выносливости в зависимости от передаваемого через швы силового потока.

4. На основе статистической обработки локальных разрушающих напряжений при различных числах нагружений, марках стали, характеристиках циклов нагружений, типов концентраторов, толщинах металла и катетов швов установлено следующее:

а) имеющийся объем информации и установленные некоторые различия в значениях локальных разрушающих напряжений сварных соединений из низколегированных и низкоуглеродистых сталей еще недостаточны, чтобы вводить в практические расчеты сварных соединений на выносливость различные уровни допускаемых напряжений для указанных двух групп сталей;

б) разрушающие локальные напряжения у различных предельно острых концентраторов (у галтелей и у корней швов) примерно равны;

в) с достаточной для практических целей точностью можно считать, что локальные пределы выносливости $[\sigma_{DR}]_P$ не зависят от коэффициента локальной концентрации напряжений α_D .

5. Статистическая обработка локальных разрушающих напряжений при различных циклах ($10^5 \leq N \leq 5 \cdot 10^6$) позволила получить уравнение линий допускаемых локальных напряжений $[\sigma_{DR}]_P$ с заданной вероятностью неразрушения P и построить диаграмму предельных локальных напряжений при $N = 2 \cdot 10^6$ циклов, $P = 0,95$ и различных R .

6. Разработанный метод расчета на выносливость позволил, в отличие от существующих методов, учесть концентрацию напряжений в зависимости от размеров сварных соединений с поперечными угловыми швами и характера передачи нагрузки.

7. Сравнение метода расчета МВТУ им. Н.Э.Баумана с другими известными методами показывает, что фактические коэффициенты запаса по пределам выносливости в методе МВТУ находятся в диа-

пазоне от 1,05 до 2,04, в то время как в существующих методах они колеблются от 0,37 до 3,03. Это позволяет в одних случаях экономить основной и наплавленный металл, а в других - не допускать возможности преждевременного выхода из строя сварных конструкций.

8. Результаты работы использованы при разработке проекта РТМ по расчету сварных соединений на выносливость и для улучшения сварных конструкций ряда машин, выпускаемых Калужским машиностроительным заводом, а также для обоснования целесообразности использования сварных соединений из стали 09Г2 с катетом шва $K=8$ мм вместо сварных соединений из стали СтЗсп с катетом 10 мм в вагонных конструкциях.

Основное содержание работы опубликовано в следующих работах:

1. Винокуров В.А., Радченко Л.Ю., Дубровский В.А. Усталостная прочность сварных соединений с угловыми швами // Известия вузов. Машиностроение. - 1986. - № 5. - С.150-153.
2. Винокуров В.А., Дубровский В.А., Аладинский В.В. Метод расчета на выносливость сварных соединений с поперечными угловыми швами с учетом концентрации напряжений: Информ. листок № 359-86. - Калуга, изд. ЦНТИ, 1986 .

