

1. История исследования сварных соединений с фланговыми швами

1.1. Методы расчета сварных соединений с угловыми швами в соединениях, работающих на статическую нагрузку

Снижение металлоемкости и повышение технологичности сварных металлических конструкций — важная народнохозяйственная задача. Один из путей решения этой задачи — снижение массы наплавленного металла угловых швов, на долю которых приходится 75–80% применяемых сварочных материалов [1]. С этой целью проводится ряд исследований по уточнению методов оценки несущей способности сварных соединений с угловыми швами, направленных на сокращение объема наплавленного металла.

Важный вклад в изучение вопросов прочности сварных соединений с угловыми швами внесли как ученые в нашей стране (Г.А. Николаев, С.А. Данилов, Е.О. Патон, В.А. Винокуров, В.В. Шеверницкий, С.А. Островская, В.С. Игнатьева, Д.И. Навроцкий, Н.О. Окерблом, О.А. Бакши, А.Е. Аснис, В.М. Барышев, Ю.Г. Мосенкис и др.), так и за рубежом (А. Гоэлцер, Р. Олсон, А. Солокиян, К. Ежек, И.Смит, Ф. Фалтус, К. Клеппель, Р. Петри, Д. Борншойер).

Многочисленность исследований по данному направлению объясняется большим количеством факторов, влияющих на работу сварных соединений с угловыми швами, и необходимостью их учета при расчете и конструировании последних.

Результаты исследований перечисленных выше авторов в той или иной степени отражены в нормативных методах расчета, однако многие данные об условиях работы угловых швов не воплотились до настоящего времени в точный метод расчета, доступный для широкого применения.

В предшествующих последнему изданию СНиП II–23–81*, работах А.А. Казмирова, С.А. Островской, В.М. Барышева, В.С. Игнатьевой и других исследователей, в числе которых был и автор данной работы, проведены исследования, направленные на снижение наплавленного металла в сварных соединениях с угловыми швами. Эти исследования были посвящены как оценке технологической прочности [2; 3], анализу глубины проплавления угловыми

швами и несущей способности сварных соединений с угловыми швами [4–6], так и созданию технологичных узлов и соединений сварных металлических конструкций [7–10].

Нормативный метод расчета на прочность сварных соединений с угловыми швами строительных металлических конструкций изложен в СНиП II–23–81* [11]. Расчет ведут на условный срез (рис. 1.1) по металлу шва для сечения 1:

$$\frac{N}{\beta_{wf} \cdot k_f \cdot l_w} \leq R_{wf} \gamma_{wf} \gamma_c \quad (1.1)$$

и по металлу границы сплавления для сечения 2:

$$\frac{N}{\beta_{wz} \cdot k_f \cdot l_w} \leq R_{wz} \gamma_{wz} \gamma_c \quad (1.2)$$

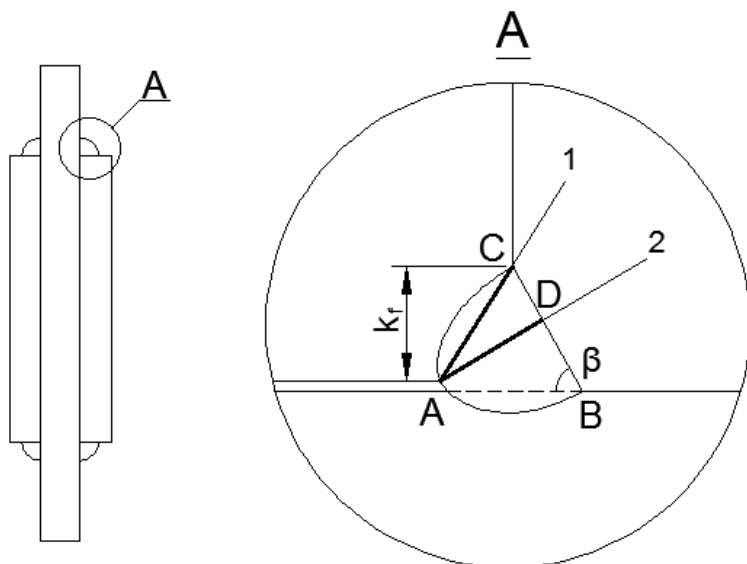


Рис. 1.1. Расчетные сечения углового шва [11]:

1 – по металлу шва; 2 – по металлу границы сплавления [11]

Здесь N – продольная или поперечная сила по отношению к направлению шва; β_{wf} , β_{wz} – коэффициенты, зависящие от вида сварки, диаметра сварочной проволоки, положения шва и размера катета k_f соответственно при расчете по 1 и 2 сечениям; l_w – расчетная длина

шва; R_{wf} , R_{wz} – соответственно расчетные сопротивления угловых швов срезу (условному, по металлу шва и по границе зоны сплавления); γ_{wf} , γ_{wz} , γ_c – коэффициенты условий работы шва, границы сплавления и конструкции, соответственно. Недостатком приведенного метода расчета является неучет большого числа факторов, влияющих на прочность соединений с угловыми швами.

Одним из таких факторов является направление нагрузки, воспринимаемой угловым швом. Экспериментальные данные С.А. Данилова и Г.А. Николаева показывают, что прочность угловых швов существенно зависит от направления результирующего вектора внешней нагрузки.

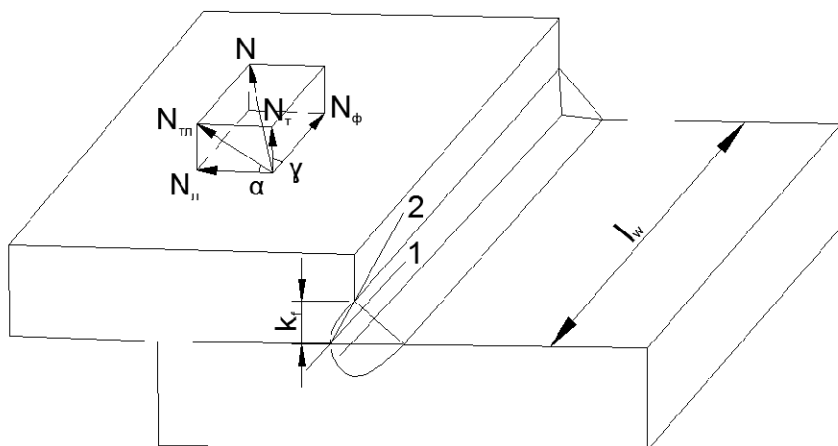


Рис. 1.2. Схемы действия сил на сварное соединение с угловым швом [12]:
 1 – расчетное сечение по металлу шва; 2 – расчетное сечение по металлу границы сплавления (существенно зависит от направления результирующего вектора внешней нагрузки)

В работах [12; 13] предложен уточненный метод расчета, учитывающий влияние приложенной нагрузки на статическую прочность углового шва и позволяющий получить экономию наплавленного металла. На рис. 1.2 приведены обозначения и схема действия сил, принятые в [12; 13]. Предложено учитывать введением коэффициента прочности C повышение прочности конкретного углового шва с изменением направления усилия N по отношению к минимальной прочности флангового шва. Коэффициент прочности зависит от углов α и γ :

$$C = \frac{N_{\text{разр}(\alpha, \gamma)}}{N_{\text{разр. фл}}},$$

где $N_{\text{разр}(\alpha, \gamma)}$ – разрушающая нагрузка для данного шва при конкретных значениях α и γ ; $N_{\text{разр. фл}}$ – разрушающая нагрузка при действии силы вдоль оси того же шва. Коэффициент C определяется экспериментально при постоянном значении $\gamma=90^\circ$ и изменении на образцах угла α . В случае $\gamma \neq 90^\circ$ значение C определяется экспериментально или приближенно по формуле

$$C = C_2 (\sin^2 \gamma + C_\alpha^2 \cos^2 \alpha)^{-0,5},$$

где C_α берется из диаграммы $C_\alpha = C_{(\alpha, \gamma=90^\circ)}$.

Так как коэффициент $C \geq 1$, то введение его в формулу (1.1) при заданном усилии N позволит уменьшить размер катета k_j . По данным работы В.А. Винокурова [13], за счет повышения прочности лобовых и фланго-лобовых швов по отношению к фланговым возможно снижение массы наплавленного металла от 20 до 40 %.

В работе С.А. Данилова предлагается метод расчета соединений с угловыми швами по предельным нагрузкам. Направление нагрузки по этому методу учитывается введением результатов испытаний двух швов – лобового и флангового. Все другие нагрузки считаются комбинацией этих двух (рис. 1.3).

На основе полученных при испытании диаграмм $P - \varepsilon$ предлагается учитывать развитие пластических деформаций. Предполагается, что все деформации концентрируются в шве, а соединяемые детали – жесткие. Перемещение соединяемых элементов, при этом, рассматривается как вращение вокруг некоторой точки. Следует отметить сложность предлагаемого метода, особенно для соединений, включающих несколько различных швов, что чаще встречается на практике (рис. 1.4). Анализ несущей способности сварных соединений с угловыми швами предлагается производить по номограммам и таблицам. Однако последние требуют большой экспериментальной и вычислительной работы, что вызывает возражение против использования этого метода в инженерной практике.

В работе В.М. Барышева [1] на примере сварных металлоконструкций показана возможность уменьшения поперечного сечения угловых швов.

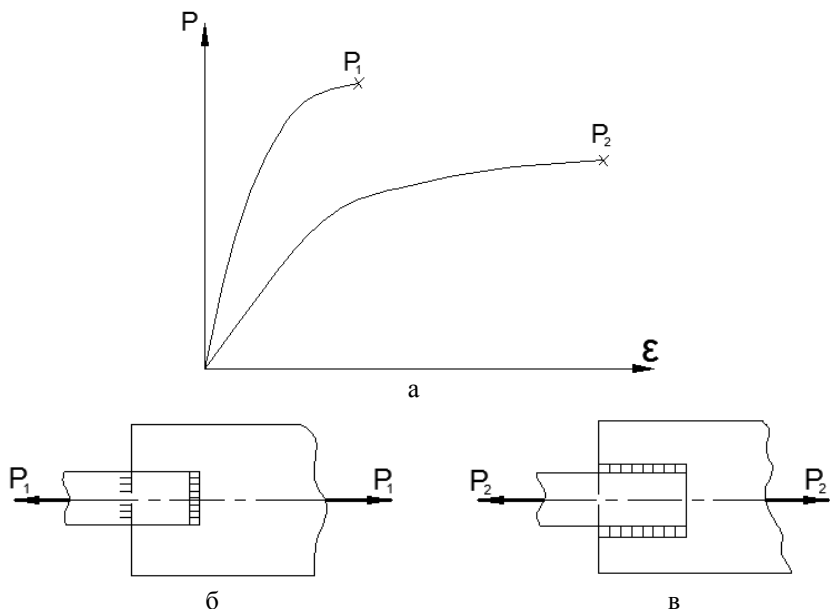


Рис. 1.3. Диаграммы испытаний (а), вводимые в расчет по методу С.А. Данилова [16] для лобового (б) и флангового (в) швов

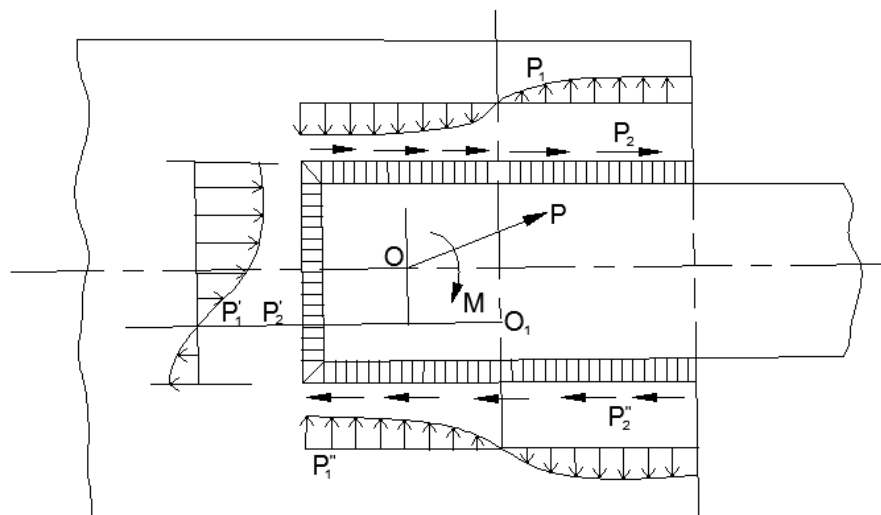


Рис. 1.4. Схема к расчету прочности соединения с тремя швами по методу С.А. Данилова [16]

С целью снижения расхода сварочных материалов в работах [15–17] предлагается использовать при выполнении угловых швов более прочные материалы, чем основной металл. Это позволяет повысить прочность сварного соединения за счет переноса расчетного сечения из шва в зону сплавления и, тем самым, снизить расход наплавленного металла.

Применение сварочных материалов повышенной прочности не связано с заменой оборудования или изменением технологии сварки, но при этом требуется обеспечить достаточную пластичность и вязкость металла шва.

В работах [18–20], выполненных под руководством проф. О.А. Бахши, получены расчетные зависимости для определения прочности нахлесточных и тавровых сварных соединений на основе исследования напряженно-деформированного состояния лобовых швов и определена оптимальная геометрия швов.

Показано расчетным путем и подтверждено экспериментально, что для нахлесточных и тавровых сварных соединений оптимальными являются лобовые швы с углом $\beta_{\text{опт}} \approx 60^\circ$ (см. рис. 1.1).

Следует отметить, что в СНиП II–23–81* недостаточно учтены возможности увеличения размеров расчетных сечений при выполнении угловых швов механизированным способом. В частности, путем выполнения неравнокатетных швов, позволяющих получить максимальную величину обоих расчетных сечений для заданного режима сварки, что отмечено в работах [19; 21] и более подробно рассмотрено в работе [22]. Таким образом, к настоящему времени выполнено достаточное количество работ по исследованию сварных соединений с лобовыми и короткими фланговыми швами, которые позволяют уточнить метод оценки их статической прочности. Что же касается сварных соединений с фланговыми швами большой протяженности, на несущую способность которых существенным образом влияют геометрические параметры соединения, что было отмечено рядом исследователей, то до настоящего времени при расчете на прочность этот фактор не учитывается.

Так, при расчете по СНиП II–23–81* предельная расчетная длина l_w в формулах (1.1) и (1.2) ограничивается величиной $85 \beta_f k_f$, т.е. это ограничение связано с катетом.

Известно, однако, что независимо от катета, при увеличении длины шва неравномерность распределения деформаций и напряжений

вдоль шва возрастает, снижая несущую способность соединения. Кроме того, геометрические параметры соединяемых элементов влияют на перераспределение деформации в сварном соединении и на его несущую способность.

Еще в период внедрения сварки в качестве основного технологического процесса при изготовлении металлических конструкций «Технические условия проектирования и возведения металлических конструкций», изданные в 1931 г., ограничивали предельную расчетную длину флангового шва величиной в 25 толщин шва (25 t) [23]. Работы Е.О. Патона и В.В. Шеверницкого [24; 25] позволили повысить расчетную длину флангового шва до 50 катетов.

До выхода последних изменений в СНиП II–23–81* величина расчетной длины флангового шва принималась равной 60 катетам шва. Последние изменения в СНиП II–23–81* внесены на основании экспериментальных исследований МИСИ им. В.В. Куйбышева, выполненных совместно с ЦНИИСК, ВНИКТИСК и ЦНИИПСК (в которых принимал непосредственное участие и автор настоящей работы), ограничивают длину флангового шва размером $85 \beta_f k_f$. Однако, как показали эти предварительные экспериментальные исследования, проведенные на образцах с длиной шва до $120 \beta_f k_f$, падение несущей способности с увеличением длины незначительно, необходимы дальнейшие экспериментальные исследования на образцах с длинами швов, значительно превышающими величину $85 \beta_f k_f$.

Анализ зарубежных нормативных документов показал, что в большинстве норм, которые ограничивают предельную расчетную длину флангового шва, это ограничение связывают только с катетом шва. Причем сама величина ограничения максимальной длины флангового шва в этих нормах различна.

Так, в нормах ЧССР [26] эта величина была равна 50 толщинам шва, в стандартах Венгрии [27] и Германии [28] – 100 толщинам шва.

В рекомендации ЕКС [29] длина фланговых швов может составлять 2 м независимо от толщины шва, при этом расчетная длина уменьшается против фактической за счет коэффициента $\eta=1,0\dots 0,15$. Нормы США [30], Франции [31] и Канады [32] вообще не вводят ограничения предельной длины флангового шва, требуя обеспечения равнопрочности сечений по шву и основному материалу.

Г. Валтинат в работе [33] приходит к выводу, что в будущем при определении ограничения предельной расчетной длины флангового

шва должна предусматриваться не величина $l/\beta_f k_f$, а величина l/B , (где B – ширина прикрепляемого элемента или расстояние между фланговыми швами,) т.е. должны учитываться геометрические параметры сварного соединения.

Именно неучет геометрических параметров сварного соединения и ведет к разнобою в назначении предельной расчетной длины флангового шва в отечественных и зарубежных нормативных документах, что говорит о недостаточной изученности вопроса.

1.2. Исследования напряженно-деформированного состояния сварных соединений с угловыми швами

В основу первых теоретических исследований напряженного состояния углового шва, выполненных Г.А. Николаевым [34], А. Гозльцером [35] и Р. Олсоном [36], была положена модель лобового шва в виде клина (рис. 1.5). В работах [34–36] предложены различные расчетные схемы, основанные на использовании известных решений плоской задачи теории упругости [37] (рис. 1.6).

В этих расчетных схемах лобовой шов рассматривается как клин, нагрузка на который передается по лобовой плоскости и распределена по определенному закону. В работе Г.А. Николаева [34] принято, что нагрузка распределена в лобовом сечении шва равномерно, в работе А. Гозльцера [35] — по закону треугольника, а в работе Р. Олсона [36] — по параболе (рис. 1.7, 1.8)

Одним из первых аналитических решений о распределении усилий по длине флангового шва является решение С.А. Данилова [38; 39]. С.А. Данилов устанавливает связь между деформацией сварного шва и удельным усилием по формуле

$$\lambda_x = \frac{q_x}{\alpha}, \quad (1.3)$$

где λ_x – деформация сварного шва (рис. 1.9); q_x – удельное усилие, действующее на единицу длины шва; α – некоторый коэффициент, названный С.А. Даниловым [38; 39] модулем сдвига флангового шва.

Уравнение деформаций для схемы загрузки флангового шва, представленной на рис. 1.9, имеет вид

$$\lambda_0 + \Delta_2 x = \lambda_x + \Delta_1 x.$$

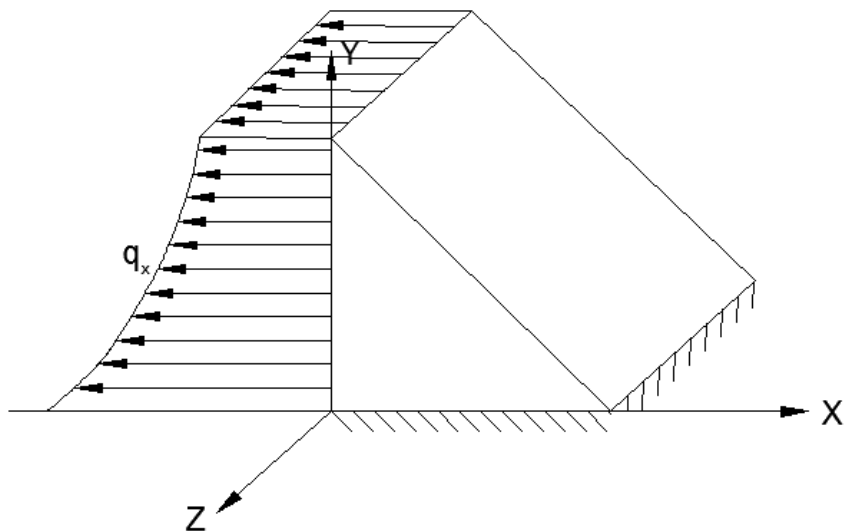


Рис. 1.5. Модель углового шва в виде клина [34–36]

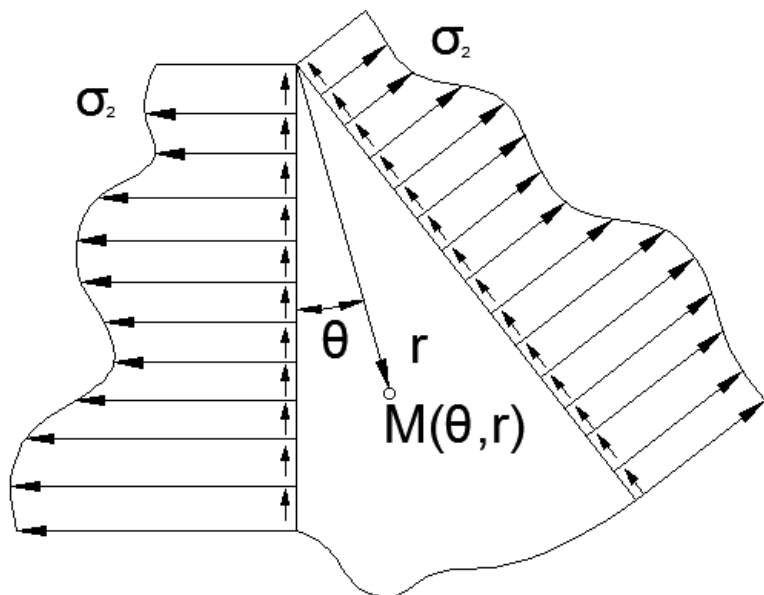


Рис. 1.6. Граничные условия в расчете углового шва методами теории упругости С.П. Тимошенко [37]

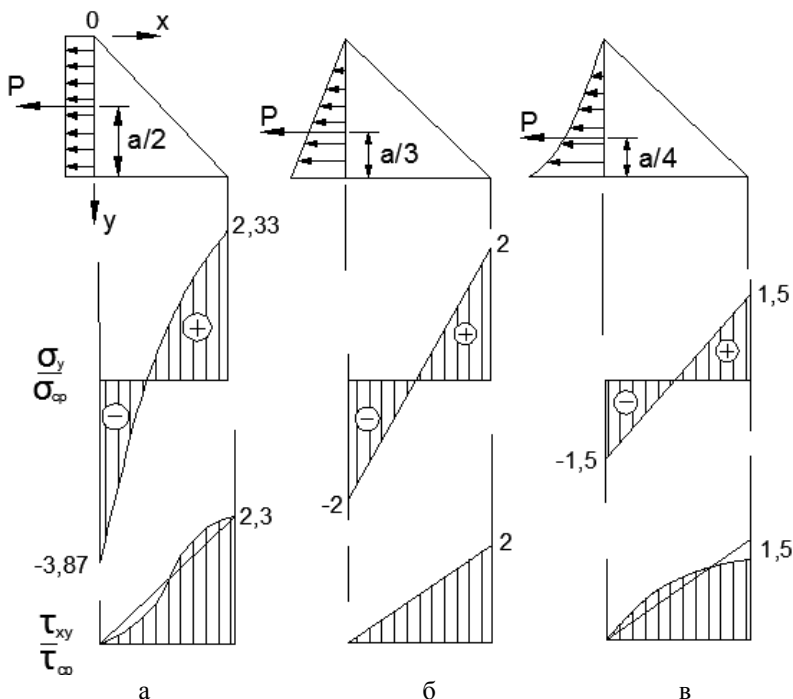


Рис. 1.7. Расчетные схемы и эпюры напряжений для лобовых швов в решетках:
а — Г.А. Николаева [34]; б — А. Гольцера [35]; в — Р. Олсона [36]

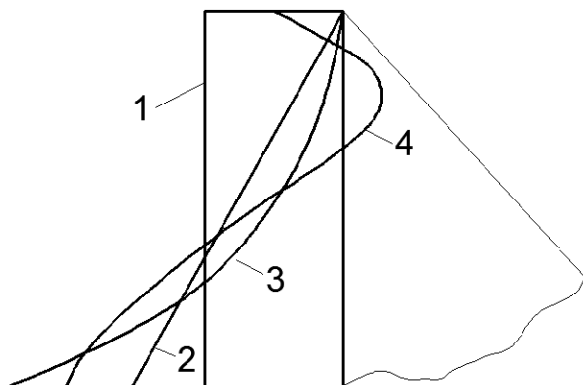


Рис. 1.8. Сравнение граничных условий в решетках Г.А. Николаева [34] (1),
А. Гольцера [35] (2) и Р. Олсона [36] (3)
с экспериментальными данными А. Солокиана [40] (4)

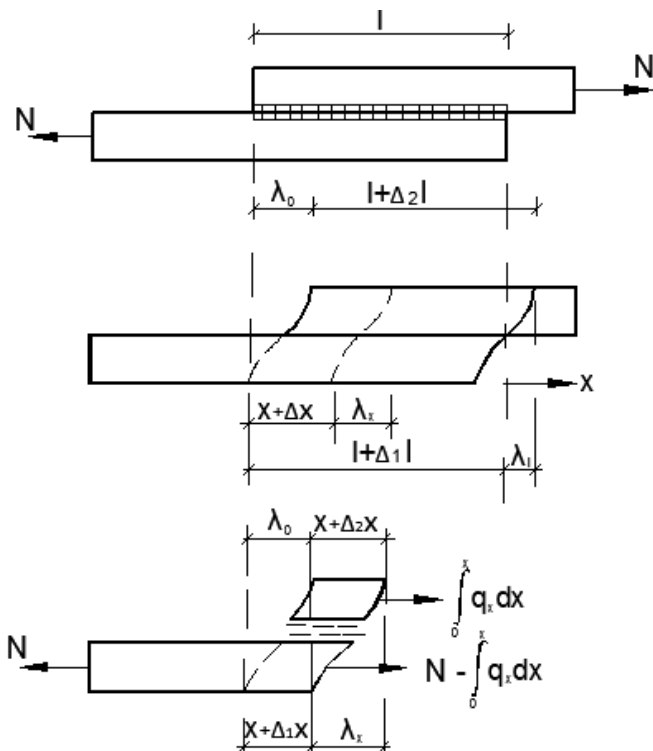


Рис. 1.9. Схема загрузки и деформации сварного соединения

Деформации различных участков сварного шва принимаются пропорциональными удельным усилиям согласно формуле (1.3):

$$\lambda_x = \frac{q_x}{\alpha}; \lambda_0 = \frac{q_0}{\alpha}.$$

Деформации элементарных соединяемых частей на длине вычисляются по закону Гука:

$$dV_{1x} = \frac{1}{EA_1} (N - \int_0^x q_x dx) dx;$$

$$dV_{2x} = \frac{1}{EA_2} \int_0^x \int_0^x q_x dx dx,$$

где A_1 и A_2 – части площадей поперечных сечений, приходящиеся на 1 шов (рис. 1.10); E – модуль упругости.

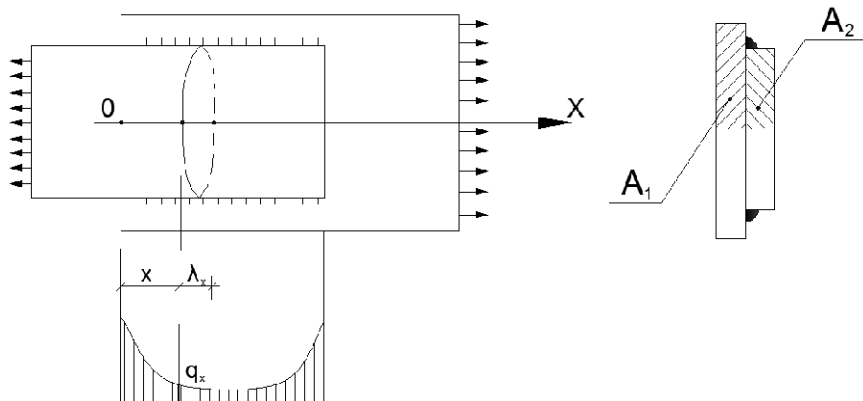


Рис. 1.10. Расчетная схема сварного соединения с фланговыми швами [38; 39]

При этом уравнение деформаций выражается в следующей форме:

$$\frac{q_0}{\alpha} - \frac{q_x}{\alpha} = \frac{1}{EA_1} \int_0^x \left\{ N - \int_0^x q_x dx \right\} dx - \frac{1}{EA_2} \int_0^x \int_0^x q_x dx dx. \quad (1.4)$$

В уравнении (1.4) левая часть представляет собой разность между деформациями сварного шва для крайних сечений рассматриваемого участка длиной x , а правая часть — разность между деформациями соединяемых элементов на некоторой длине x .

После двойного дифференцированного уравнения (1.4) и некоторых преобразований может быть получено следующее дифференциальное уравнение:

$$q_x'' - a^2 q_x = 0,$$

где

$$a = \sqrt{\frac{\alpha}{E} \frac{A_1 + A_2}{A_1 \cdot A_2}}. \quad (1.5)$$

Общий интервал уравнения имеет вид

$$q_x = C_1 e^{ax} + C_2 e^{-ax}.$$

Для определения двух произвольных постоянных C_1 и C_2 могут быть использованы следующие граничные условия:

$$\int_0^e q_x dx = N;$$

$$\lambda_0 + \Delta_2 l = \lambda_e + \Delta_1 l.$$

После соответствующих подстановок получено:

$$\begin{cases} C_1 = \frac{aN}{2shal} \left[1 + \frac{A_2}{A_1 + A_2} (e^{-al} - 1) \right]; \\ C_2 = \frac{aN}{2shal} \left[1 + \frac{A_2}{A_1 + A_2} (e^{al} - 1) \right]. \end{cases}$$

Окончательное выражение для определения удельного усилия в фланговом шве при нагрузке по схеме на рис. 1.9 будет иметь вид

$$q_x = \frac{aN}{(A_1 + A_2)shal} A_1 chax + A_2 cha(l - x) \quad (1.6)$$

С.А. Данилов [38; 39] приводит сравнительный анализ расчетных данных, полученных по формуле (1.6) с экспериментальными данными работы Н. Смита [41], показывает хорошее их совпадение. Однако следует отметить, что сравнение произведено с образцами, имеющими очень короткие швы (длиной 57 мм), неравномерность распределения удельных усилий в которых проявляется в слабой мере.

По характеру принятых допущений формула (1.6) представляет собой решение линейной задачи и в наибольшей степени она справедлива для случая соединения узких стержней, для которых распределение напряжений по ширине является равномерным.

В формуле (1.6) не отражено влияния соотношения между размерами поперечного сечения соединяемых элементов (ширины и толщины). Что касается модуля сдвига флангового шва, то С.А. Даниловым [38; 39] предполагается его определять из экспериментальных данных, полагая при этом, что его значение также не зависит от размеров сварного соединения.

Однако экспериментальные исследования показывают, что модуль сдвига флангового шва зависит от соотношения между размерами сварного соединения и поэтому необходимо получить общее решение для его определения.

В развитие решения С.А. Данилова, задачу о модуле сдвига решает Д.И. Навроцкий [42–44].

При определении местных деформаций применяется расчетная схема, полученная для полосы, нагруженной по продольным кромкам скалывающими и по торцам — нормальными напряжениями (рис. 1.11).

Решение такой задачи получено путем выбора функции напряжения в виде

$$\varphi = -\frac{N}{8lbc}xy^2,$$

что соответствует напряженному состоянию, показанному на рис. 1.12.

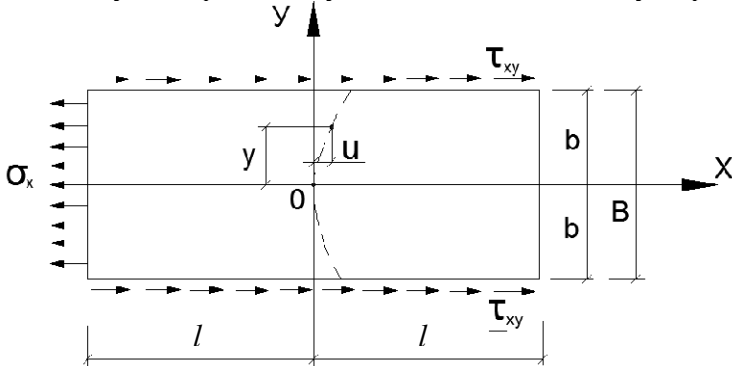


Рис. 1.11. Расчетная схема для одной полосы [42]

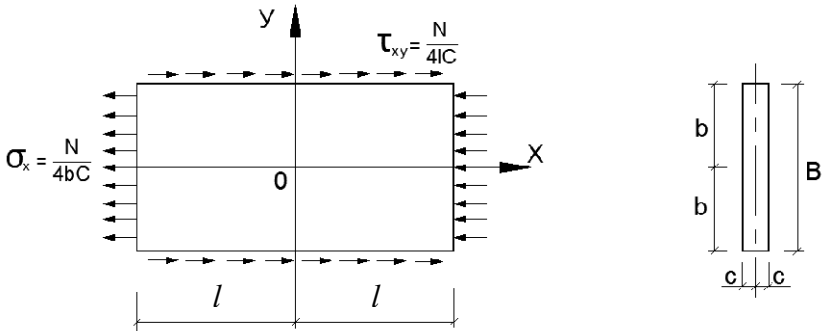


Рис. 1.12. Схема нагрузки, соответствующей выбору функции $f = -\frac{N}{8lbc}xy^2$ [42]

При этом деформации различных точек полосы определяются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} \sigma_x = -\frac{1}{4E} \cdot \frac{N}{lbc} \cdot x \\ \varepsilon_y &= -\frac{\mu}{E} \sigma_x = \frac{\mu}{4E} \cdot \frac{N}{lbc} \cdot x \\ \gamma_{xy} &= \frac{2(1+\mu)}{E} \cdot \tau_{xy} = \frac{2(1+\mu)}{4E} \cdot \frac{N}{lbc} \cdot y \end{aligned} \right\}, \quad (1.7)$$

где μ – коэффициент Пуассона.

Интегрируя первые два выражения уравнений (1.7), определяем

$$u = -\frac{1}{4E} \cdot \frac{N}{lbc} \cdot \frac{x^2}{2} + f_{(y)}; \quad \frac{du}{dy} = f'_{(y)};$$

$$v = \frac{\mu}{4E} \cdot \frac{N}{lbc} \cdot xy + f_{(x)}; \quad \frac{dv}{dx} = f'_{(x)}.$$

Подставляя эти значения в третье выражение уравнений (1.7), имеем

$$f'_{(y)} + f'_{(x)} = \frac{2+\mu}{4E} \cdot \frac{N}{lbc} \cdot y,$$

откуда

$$f_{(y)} = \frac{2+\mu}{4E} \cdot \frac{N}{lbc} \cdot \frac{y^2}{2} + cy + c_1;$$

$$f_{(x)} = c_2.$$

Определяя постоянные интегрирования из условий, что перемещения начала координат равны нулю и крайние точки оси $y = 0$ при $x = \pm l$ не имеют вертикальных перемещений, получено окончательное выражение для определения перемещений в направлении действующего усилия:

$$U = -\frac{1}{4E} \cdot \frac{N}{lbc} \cdot \frac{x^2}{2} + \frac{2+\mu}{4E} \cdot \frac{N}{lbc} \cdot \frac{y^2}{2}. \quad (1.8)$$

Для случая соединения элементов неравного поперечного сечения (рис. 1.13) из уравнения (1.8) будем иметь:

$$\begin{cases} U_1 = \frac{q}{1,8E} \cdot \frac{B}{C_1}; \\ U_2 = \frac{q}{1,8E} \cdot \frac{B}{C_2}, \end{cases}$$

откуда деформация сечения λ может быть найдена в виде

$$\lambda = U_1 + U_2 = \frac{q}{1,8E} \left(\frac{B}{C_1} + \frac{B}{C_2} \right). \quad (1.9)$$

Сравнивая выражения (1.3) и (1.9), окончательно имеем

$$\alpha = \frac{1,8EC_1 \cdot C_2}{B(C_1 + C_2)}. \quad (1.10)$$

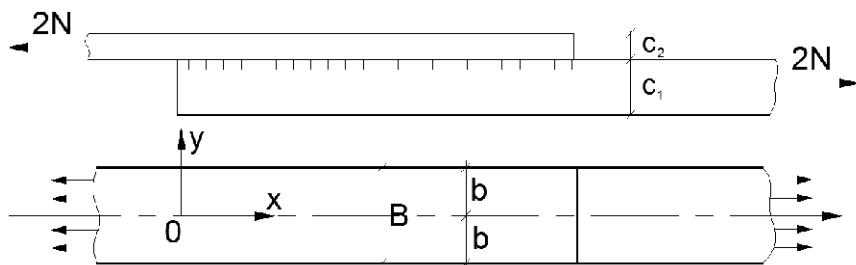


Рис. 1.13. Соединение с фланговыми швами при различной толщине элементов [44]

Полученное Д.Н. Навроцким [42–44] значение модуля сдвига флангового шва позволяет пользоваться решением С.А. Данилова [38; 39] без определения предварительных экспериментальных данных. Для этого достаточно формулу (1.10) подставить в формулу (1.5). Тогда получим

$$a = \sqrt{\frac{1,8C_1 \cdot C_2 (A_1 + A_2)}{B(C_1 + C_2)A_1 \cdot A_2}}. \quad (1.11)$$

Следует отметить, что значения модуля сдвига угловых швов получены в ряде работ [33; 41–45]. Эти значения, полученные при испытании образцов различной геометрии при использовании различных экспериментальных методов и связывающиеся авторами работ с теми или иными геометрическими параметрами сварного соединения, порой значительно отличаются друг от друга. Так, Г. Валтинат [33] связывает значение модуля сдвига флангового шва только с расчетным сечением шва $\alpha = \beta_f k_f$, не учитывая геометрию соединения. На основании испытаний образцов с различными катетами фланговых швов предлагаются следующие значения модулей сдвига:

$a = 4$	$\alpha = 735 \cdot 10^3$ МПа;
$a = 6$	$\alpha = 810 \cdot 10^3$ МПа;
$a = 8$	$\alpha = 865 \cdot 10^3$ МПа;
$a = 10$	$\alpha = 905 \cdot 10^3$ МПа;
$a = 16$	$\alpha = 1000 \cdot 10^3$ МПа.

Д. Федер [45] на основании испытания образцов, сваренных из одинаковых пластин, предлагает определять модуль сдвига фланговых и лобовых швов по формулам

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{\phi} &= \frac{G}{1 + \frac{t}{k} \sqrt{2}} \\ \alpha_{\lambda} &= \frac{2G}{1 + \frac{t}{k} \sqrt{2}} = 2\alpha_{\phi} \end{aligned} \right\},$$

где G – модуль сдвига для стали; $G = 79 \cdot 10^3$ МПа; t – толщина пластины; k – катет шва.

На основании экспериментальных исследований образцов с фланговыми и лобовыми швами в работе [46] приводятся следующие значения модулей сдвига:

$$\alpha_{\phi} = 0,2E;$$

$$\alpha_{\lambda} = 0,4E = 2\alpha_{\phi},$$

где E – модуль нормальной упругости для стали; $E = 2,06 \cdot 10^5$ МПа.

В работе [46] получены значения предельных относительных деформаций сдвига для флангового шва (20%) и для лобового шва (13%).

В работах зарубежных исследователей [41; 47] значение модуля сдвига флангового шва принимается равным $\alpha_{\phi} = 50 \cdot 10^3$ МПа, а в работе [48] $\alpha_{\phi} = 0,1 E$.

Из приведенных данных видно, что у разных авторов значения модуля сдвига угловых швов колеблется в широких пределах.

Для проверки правильности принятой расчетной схемы Д.И. Навроцкий в работе [49] приводит сопоставление значений модуля сдвига флангового шва для различных соединений, полученных по формуле (1.10) и из экспериментальных данных, показывая хорошую сходимость результатов.

Аналогичные результаты проверки формулы (1.10) отмечены в работе [43] при сопоставлении с экспериментальными данными Н. Смита [41] и данными А. Гоэльцера [35]. Кроме того, в работах [42; 43; 49] показано хорошее совпадение деформаций и напряжений вдоль флангового шва, полученных с использованием формул (1.3) и (1.10) со значениями, полученными по экспериментальным данным.

Как и в работах С.А. Данилова [38; 39], в работах Д.И. Навроцкого [42; 43; 49] сравнение теоретического решения по формуле (1.6) с результатами экспериментальных данных производится на образцах со швами относительно малой протяженности (от 20 до 40 см) и при малых значениях коэффициента a .

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru