УДК 621.791.2:621.791.7
2.5.6. Технология машиностроения




Т.С. Латун, А.П. Корнеев
Белорусско-Российский университет

ОПТИМИЗАЦИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ЧЕРЕЗ ДЕКОМПОЗИЦИЮ НАПРЯЖЕНИЙ

В статье рассматриваются проблемы, возникающие при создании ассиметричных сварных соединений. Для повышения качества и эффективности разработок предложен принцип декомпозиции напряженного состояния. Применение данного подхода позволило выявить негативное влияние выпуклости одностороннего сварного шва в стыковых соединениях, а также выступающей части сварного шва в тавровых соединениях при наличии непровара. Использование принципа декомпозиции способствует оптимизации конструкции сварного соединения косынки с неравнополочным уголком.

Сварное соединение, декомпозиция напряженного состояния, сварной шов, тавровые соединения.

Сварочные технологии играют важную роль в современном машиностроении и считаются одними из основных технологий XXI века. С развитием технологий они также стремительно эволюционируют и улучшаются [1, 2]. Это создает необходимость в правильном подходе к проектированию сварных изделий, особенно сварных соединений. Важно учитывать общие принципы проектирования, которые на данный момент недостаточно применяются при создании сварных конструкций.

Наиболее значимыми принципами для сварных конструкций, помимо стремления к снижению себестоимости, являются следующие [3, 4]:

1) снижение материалоемкости;

2) принцип равномерного распределения напряжений в сечении, что позволяет уменьшить концентрацию напряжений;

3) принцип равнопрочности;

4) устранение сложных напряженных состояний;

5) замена изгиба растяжением или сжатием;

6) уменьшение неравномерности напряжений путем удаления материала из малонапряженных зон (принцип обсечения);

7) итеративный подход, предполагающий многошаговые улучшения конструкции.

Тем не менее эти принципы не всегда применяются при разработке сварных изделий. Особенно важно подчеркнуть игнорирование принципа устранения сложного напряженного состояния, вызванного асимметрией и внецентренным приложением нагрузки. Следует отметить, что пренебрежительное отношение к соблюдению данного принципа наблюдается не только в научной, но и в учебной литературе. Например, авторы известного учебника [3], рассматривая прочность сварного соединения, выполненного контактной точечной сваркой, справедливо отмечают наличие изгиба и дополнительной нагрузки на элементы соединения. Однако они далее утверждают, что эта дополнительная нагрузка незначительна из-за небольшой толщины соединяемых пластин [4]. Ошибочность такого утверждения заключается не только в отсутствии подтверждающих расчетов, но и в недооценке риска, связанного с малой толщиной, при которой момент сопротивления соединяемых прямоугольных пластин быстро снижается (пропорционально квадрату толщины).

Научная новизна: сварные соединения являются эффективным способом устранения сложного напряженного состояния. Для корректного анализа можно применять принцип декомпозиции напряженного состояния [5, 6].

Существенным препятствием для принятия обоснованных решений при проектировании сварных соединений являются данные, содержащиеся в опубликованных литературных источниках и нормативных актах. В частности, следует обратить внимание на стандарты, определяющие формы и размеры конструктивных элементов сварных соединений.

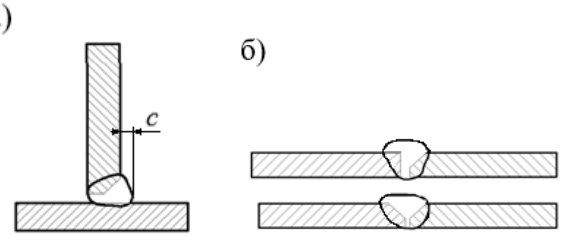


Рис. 1. Односторонние сварные соединения:
а) тавровое соединение Т6;
б) стыковые соединения С8 и С17

Анализируя стандарт на конструктивные элементы сварных соединений, например выполняемых в защитной газовой среде (ГОСТ 14771-76. Дуговая сварка в защитном газе. Сварные соединения. Основные типы, конструктивные элементы и размеры), можно заметить, что он требует наличия выступающей части и регламентирует ее размеры. Это приводит к созданию асимметрии в одностороннем стыко-

вом сварном соединении. В результате асимметрии в односторонних стыковых и тавровых сварных соединениях при их нагружении возникает сложное напряженное состояние [5–7], что значительно увеличивает напряжения в элементах соединений. Эти соединения схематически представлены на рисунке 1.

При воздействии продольной растягивающей нагрузки (P) в таких соединениях возникает дополнительный изгибающий момент ($M_и$), величина которого определяется по формуле [1]:

$$M_и = P \cdot \frac{c}{2}, \quad (1)$$

где c – размер, показанный на рисунке 1.

Другим примером является анализ влияния выпуклости одностороннего стыкового шва на его несущую способность в условиях наличия непровара [5]. Традиционный подход к оценке потери несущей способности учитывает лишь глубину непровара, в то время как влияние выпуклости как фактора, снижающего прочность, остается вне рассмотрения. Дополнительной проблемой при такой оценке является то, что выпуклость сварного шва существенно влияет на результаты рентгенографического контроля ответственных конструкций. Это связано с тем, что выпуклая часть шва поглощает рентгеновские лучи, компенсируя отсутствие их поглощения в местах непровара. Поэтому необходимо рассмотреть вопрос о допустимости компенсации непровара за счет выпуклости сварного шва.

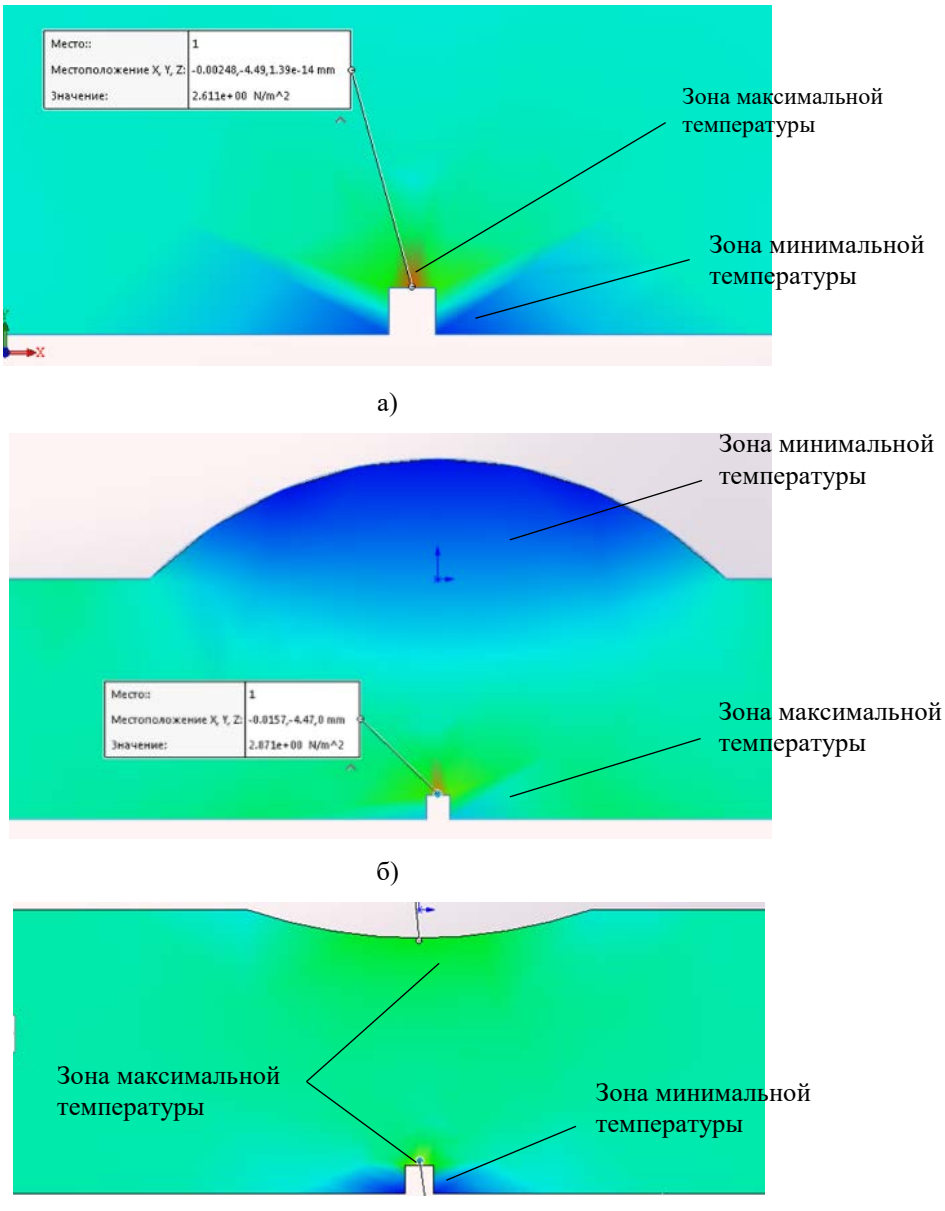


Рис. 2. Сравнительные данные по распределению нормальных напряжений: а) соединение с непроваром, но без выпуклости; б) соединение с непроваром и выпуклостью; в) с непроваром, и непровар сверху

Обычно непровар рассматривается как дефект, вызывающий концентрацию напряжений, однако степень снижения несущей способности не связывается с наличием и размерами выпуклости. Это подтверждается рекомендациями СП 70.13330.2012 «Несущие и ограждающие конструкции», где прямо указано, что «в конструкциях не допускаются: ... непровары в корне шва в соединениях, доступных для сварки с одной стороны, и в соединениях без подкладок, превышающие по высоте 15 % толщины свариваемого металла или более 3 мм».

Таким образом, свод правил фактически разрешает изготовление и эксплуатацию конструкций (несущих и ограждающих) с непроварами, величина которых не превышает 15 % толщины свариваемых пластин. При этом выпуклая часть одностороннего стыкового шва не рассматривается как фактор, негативно влияющий на прочность конструкции. На основании имеющихся данных можно предположить, что поскольку концентратор напряжений находится в области максимальных нормальных напряжений, размер выпуклости должен существенно влиять на напряженное состояние такого соединения.

Оценка и анализ совместного влияния непровара и выпуклости были проведены расчетным методом с использованием программного комплекса SolidWorks Simulation. Результаты расчетов показали, что выпуклость приводит к увеличению уровня максимальных нормальных напряжений. Поэтому ее нельзя рассматривать как фактор, способный хотя бы частично компенсировать негативное влияние непровара в одностороннем стыковом соединении [9]. Этот вывод наглядно иллюстрируется данными о распределении эксплуатационных напряжений, представленными на рисунке 2.

Принцип декомпозиции утверждает, что аналогичные соотношения и процессы также наблюдаются в одностороннем тавровом соединении. В данном случае выступающая часть сварного шва будет увеличивать негативное воздействие непровара.

В строительстве металлических конструкций широко используются прокатные профили, которые соединяются с косынками при помощи сварки (рис. 3). В таком соединении уголок располагается на поверхности косынки, после чего выполняются угловые сварные швы нужной длины и размера [1].

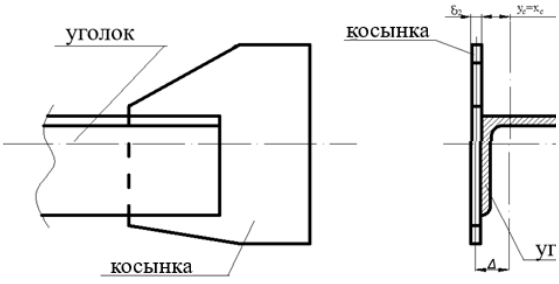


Рис. 3. Схема традиционной конструкции соединения косынки с уголком

Подробный анализ конструкции, представленной в источнике [10], выявляет несоответствие продольных осей уголка и косынки, что свидетельствует о плохом их взаимодействии. Если уголок не является равнополочным, возникает вопрос о том, какая из двух полок будет более целесообразно прикреплена к косынке. В качестве примера можно рассмотреть уголок 32/20 с толщиной стенки 4 мм (табл.).

Таблица

Геометрические характеристики уголка

Номер уголка	***Площадь сечения, см²***	***$X_{0,см}$***	***$Y_{0,см}$***	***Jy, см⁴***	***Jx, см⁴***
32/20	1,94	0,53	1,12	1,93	0,57

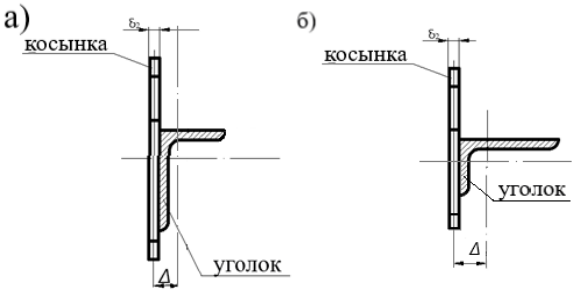


Рис. 4. Схемы соединения неравнополочного уголка с косынкой: а) уголок опирается большей стороной; б) уголок опирается меньшей стороной

Рассматривая боковую проекцию соединения, показанного на рисунке 4, надо учитывать различное по величине несовпадение осей косынки и уголка. Между параллельными осями уголка и косынки имеются расстояния Δ_1 и Δ_2, которое рассчитывается по формулам:

$$\Delta_1 = x_0 + \frac{\delta}{2}, \quad (2)$$

$$\Delta_2 = y_0 + \frac{\delta}{2}, \quad (3)$$

где δ – толщина фасонки;

x_0, y_0 – координата центра тяжести сечения уголка.

Наличие эксцентриситета приводит к сложному напряженному состоянию. В сечении уголка возникает изгибающий момент, пропорциональный величине соответствующего эксцентриситета.

Расчеты показывают, что соединение уголка с косынкой большей стороной приводит к возникновению изгибающего момента в 1,75 раза меньше.

Для частичного устранения эксцентриситета предлагается конструкция, в которой наружные плоскости уголка и косынки совпадают. Соответственно для их соединения используется угловые сварные швы. Сравнительный расчет по определению величины дополнительных напряжений изгиба проводим для каждой из схем прикрепления в следующей последовательности.

Напряжения изгиба:

$$\sigma_1 = \frac{M_{u1} \cdot a_1}{J_x}, \quad (4)$$

$$\sigma_2 = \frac{M_{u2} \cdot a_2}{J_y}, \quad (5)$$

где J_x, J_y – моменты инерции сечения уголка (табл.);

a_1 – расстояние от центра тяжести до крайней точки сечения уголка, $a_1 = B - y_0 = 3,2 - 1,12 = 2,08$ см.;

a_2 – расстояние от центра тяжести до крайней точки сечения уголка, $a_2 = b - x_0 = 2,0 - 0,53 = 1,47$ см.

После подстановки найденных значений получим:

$$\sigma_1 = \frac{P \cdot 1,37 \cdot 2,08}{1,93} = 1,48P$$

$$\sigma_2 = \frac{P \cdot 0,78 \cdot 1,47}{0,57} = 2,01P$$

Таким образом, прикрепление неравнополочного уголка к косынке его меньшим основанием позволяет снизить напряжения изгиба с 2,01P до 1,48P или в 1,36 раза.

Т.е. принцип декомпозиции позволил выбрать более рациональную схему прикрепления не равнополочного уголка к косынке.

Выводы:

1. Проведен анализ технических решений на базе принципа декомпозиции напряженного состояния, который показал необходимость учета явления изгиба при конструировании сварных соединений.

2. Предложены рекомендации оптимального прикрепления неравнополочного уголка к косынке его меньшим основанием.

Литература

1. Цумарев, Ю. А. Прочность и конструирование паяных соединений : монография / Ю. А. Цумарев, Т. С. Латун, Е. Ю. Латыпова. – Москва ; Вологда : Инфра – Инженерия, 2024. – 236 с.

2. Matsumoto, Y. Strength of Welded Joints: A Comprehensive Approach / Y. Matsumoto, K. Takeda. – London : Springer, 2019. – 250 p.

3. Николаев, Г. А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций : учебное пособие / Г. А. Николаев, С. А. Куркин, В. А. Винокуров. – Москва : Высшая школа, 1982. – 272 с.

4. Wang, Y. Welded Structures: Theory and Practice / Y. Wang, L. Zhang. – New York : Wiley, 2020. – 320 p.

5. Декомпозиция напряженного состояния при оценке прочности неразъемных соединений / Т. С. Латун, Ю. А. Цумарев, В. К. Шелег [и др.] // Вестник машиностроения. – 2022. – № 8. – С. 56–59.

6. Miller, R. Stress Analysis of Welded Structures / R. Miller, J. Smith. – Amsterdam : Elsevier, 2021. – 280 p.

7. Работоспособность стыковых соединений, сваренных на весу / Ю. А. Цумарев, Д. И. Якубович, Т. С. Латун, В. К. Шелег // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2010. – № 2. – С. 107–112.

8. Johnson, T. Fatigue and Fracture of Welded Components / T. Johnson, S. Lee. – Berlin : Springer, 2018. – 310 p.

9. Напряженное состояние односторонних стыковых сварных соединений с непроваром / А. Н. Синица, Ю. А. Цумарев, Е. В. Латыпова, Т. С. Латун // Технология машиностроения. – 2023. – № 9. – С. 38–44.

10. Совершенствование конструкции соединения уголка с фасонкой на основе декомпозиции напряженного состояния / А. Н. Синица, Ю. А. Цумарев, Т. С. Латун, С. М. Бобрицкий // Технология машиностроения. – 2024. – № 1. – С. 24–28.

T.S. Latun, A.P. Korneev

Belarusian-Russian University

OPTIMIZATION OF WELDED JOINTS IN BUILDING STRUCTURES VIA STRESS DECOMPOSITION

This article examines challenges encountered when creating asymmetric welded joints. To improve quality and efficiency of development, stress decomposition principle is proposed. This approach allowed us to identify negative impact of single-sided weld convexity in butt joints, as well as protruding weld portion in T-joints due to lack of fusion. Use of stress decomposition principle facilitates optimization of welded joint design between gusset plate and unequal angle.

Welded joint, decomposition of stress state, weld seam, T-joints.