

К РАСЧЕТУ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ

ДАВЫДОВ Е. Ю.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Довольно часто отказы стальных конструкций возникают из-за недостаточной усталостной прочности. Усталостная прочность (предел выносливости) является наиболее важной механической характеристикой для конструкций, воспринимающих динамическую нагрузку. Таковыми являются подкрановые балки, высотные сооружения, пролетные строения мостов, железнодорожные эстакады, конструкции технологических площадок. Перечисленные конструкции испытывают, как правило, многоцикловые нагружения, количество циклов за весь период эксплуатации превышает 10^5 . Имеются также конструктивные формы, испытывающие малоцикловую нагруженность. Это, прежде всего, резервуары, газгольдеры, бункеры. В данной статье малоцикловая прочность стальных конструкций не рассматривается.

Примерно 30 % аварийных конструкций теряют свою несущую способность из-за появления трещин в основном или наплавленном металле. Столь высокий процент разрушений конструкций, воспринимающих динамические нагрузки, свидетельствует о том, что используемые методики расчета стальных конструкций на усталостную прочность учитывают не все факторы, оказывающие влияние на несущую способность.

Основным фактором, определяющим усталостную прочность, является концентрация напряжений, которая появляется в местах изменения сечения элементов, в местах расположения отверстий, всевозможных вырезов, резкого изменения силового потока, но главным источником концентрации напряжений по значимости и по количеству являются сварные швы.

Концентрация напряжений, обусловленная сваркой, определяется прежде всего формой и размерами сварного шва, среди которых

следует выделить ширину (b) и выпуклость (h), угол перехода (θ) и радиус перехода сварного шва на основной металл (r). Указанные размеры приведены на рис. 1. При увеличении отношения h/b от 0,1 до 0,6 коэффициент концентрации увеличивается от 1,8 до 3 [1]. По действующим нормативным документам, например, по ГОСТ 23118, отношение h/b может достигать 0,3, что соответствует коэффициенту концентрации, равному 2,4.

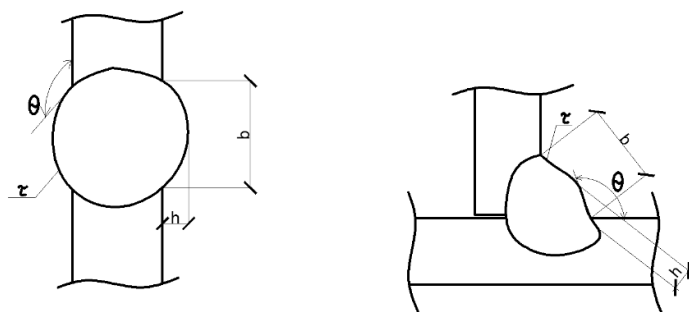


Рис. 1. Форма сварных швов

Существенное влияние на концентрацию напряжений оказывают параметры « r » и « θ ». Но размеры этих параметров не являются стабильными по длине шва, поэтому и коэффициенты концентрации, обусловленные этими параметрами, также являются нестабильными. В нормативных документах эти параметры не лимитируются.

Концентрация напряжений зависит также от вида сварного соединения. В сварных соединениях с использованием стыковых швов концентрация напряжений оказывается меньше, чем при угловых швах. Наибольшего значения концентрация напряжений достигает в нахлесточных соединениях с применением только фланговых швов: коэффициент концентрации варьируется в пределах 1,8–3,2, в зависимости от расстояния между фланговыми швами, с увеличением этого расстояния концентрация напряжений возрастает [2]. В нахлесточных соединениях коэффициент концентрации заметно снижается при обварке по всему контуру нахлеста.

При сопоставлении усталостной прочности образцов со сварными швами и таких же образцов без сварных швов, но с концентраторами напряжений, равными концентраторам напряжений,

создаваемых сваркой, было установлено, что усталостная прочность первых образцов значительно меньше, чем вторых. Это неравенство можно объяснить только влиянием на усталостную прочность остаточных напряжений, создаваемых сваркой. Эксперименты, проведенные в институте электросварки им. Патона показали: образцы с остаточными напряжениями имели на базе $2 \cdot 10^6$ циклов предел выносливости примерно в два раза меньше, чем образцы с такими же концентраторами, но без остаточных напряжений. В испытанных образцах значения остаточных напряжений достигали значений предела текучести. В образцах с пониженными значениями остаточных напряжений $\approx (0,3 \dots 0,5)\sigma_y$ предел выносливости при тех же характеристиках цикла оказался значительно больше, примерно в 2–2,5 раза. Наиболее высокие пределы выносливости были зафиксированы на участках, где имели место сжимающие сварочные напряжения.

Значимость остаточных напряжений зависит от напряжений цикла: при уменьшении этих напряжений влияние остаточных напряжений увеличивается. Также влияние остаточных напряжений зависит от характеристик цикла (ρ). Наибольшая значимость остаточных напряжений проявляется при знакопеременных нагрузках. Например, при испытании образцов из стали С245 со стыковыми сварными швами при симметричном цикле ($\rho = -1$) их предел выносливости составил 52 МПа, а при нулевом цикле ($\rho = 0$) – 106 МПа. То же для образцов из низколегированной стали: 75 МПа при $\rho = -1$, 155 МПа при $\rho = 0$, 235 МПа при $\rho = +0,5$. Испытания образцов с поперечными угловыми швами в нахлесточных соединениях показали следующие результаты: 40 МПа при $\rho = -1$; 100 МПа при $\rho = 0$; 130 МПа при $\rho = +0,5$. Результаты испытаний образцов только с фланговыми швами: 23 МПа при $\rho = -1$; 60 МПа при $\rho = 0$; 120 МПа при $\rho = +0,5$.

Сопоставление экспериментальных результатов, полученных на образцах из сталей обычной и повышенной прочности, показывают, что увеличение предела выносливости для них не соответствует увеличению прочности. Например, предел выносливости при $\rho = -1$ для низколегированной стали увеличился по сравнению с малоуглеродистой сталью на 23 МПа при увеличении прочности на 230 МПа. Это объясняется тем, что с увеличением прочности возрастает чувствительность стали к концентраторам напряжений и

тем, что остаточные напряжения увеличиваются примерно пропорционально увеличению предела текучести.

В процессе наплавки сварных швов в околошовной зоне происходят структурные и фазовые изменения. В результате этих изменений в околошовной зоне механические характеристики металла отличаются от механических характеристик как основного металла, так и наплавленного металла. Однако, как показали экспериментальные исследования [2, 3], эти отличия не оказывают существенного влияния на усталостную прочность сварных соединений.

По нашим нормам в сварных швах допускается наличие некоторых дефектов. При проведении экспериментальных исследований испытывались образцы с непроварами, с подрезами и с порами. Наибольшее отрицательное влияние на усталостную прочность оказывали непровары: предел выносливости понижался в 2–3 раза. При наличии подрезов (глубина подреза 2–3 мм) предел выносливости уменьшался в 1,5–2 раза. Указанные снижения пределов выносливости отмечены при расположении дефектов в зоне растягивающих остаточных напряжений. Приведенное снижение имеет место и для сварных соединений с порами. Но по сравнению с непроварами и подрезами поры при пористости не более 3 % оказывают наименьшее отрицательное влияние на усталостную прочность сварных соединений. Также следует отметить, что влияние дефектов на усталостную прочность заметно снижается с уменьшением напряжений цикла, что имеет место при увеличении количества циклов.

По результатам экспериментальных исследований, проведенных разными исследователями, прежде всего, в институте электросварки им. Патона можно предположить, что не оказывают существенного отрицательного влияния на усталостную прочность сварных соединений сварочные материалы (при условии, что прочность сварочных материалов соответствует прочности основного металла), способ сварки, виды разделки кромок, структурные и фазовые превращения в околошовной зоне, степень раскисления стали, температура выше $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В СП 16.13330.2017 [4] проверочная формула стальных конструкций на выносливость имеет вид:

$$\sigma_{\max} \leq \alpha \cdot R_v \cdot \gamma_v, \quad (1)$$

где σ_{\max} – наибольшее напряжение, определяемое при пониженных значениях нормативных нагрузок и без учета коэффициента динамичности;

α – коэффициент учитывает количество циклов;

γ_0 определяется в зависимости от характеристики цикла (ρ), отношения σ_{\min} и σ_{\max} ;

R_0 – расчетное сопротивление усталости, назначенное в зависимости от группы элемента (в зависимости от концентрации напряжений) при количестве циклов $2 \cdot 10^6$. Правая часть формулы (1) – это предел выносливости, определяемый в зависимости от количества циклов, характеристики цикла и вида концентратора напряжений.

Вопросы, возникающие при использовании приведенной формулы:

1. σ_{\max} – это наибольшее по абсолютному значению напряжение, то есть это напряжение может быть и сжимающим, и тогда при $\rho \geq 0$ (например, для разрезных подкрановых балок) проверка по формуле (1) производится для элемента, который подвергается только сжатию. При только сжимающих напряжениях проверка усталостной прочности не представляется достоверной, так как в процессе экспериментальных исследований предел выносливости также, как и предел текучести, и временное сопротивление определены при действии только растягивающих напряжений. Здесь также следует отметить, что, согласно [5], напряжения σ_{\max} определяются от пониженных нагрузок.

2. Согласно формуле (1), при проверке усталостной прочности не учитывается уровень касательных напряжений.

3. При назначении расчетного сопротивления усталости не учитывается прочность наплавленного металла, которая, согласно [4], может быть меньше прочности основного металла (в реальных конструкциях усталостные трещины довольно часто появляются в наплавленном металле), а также не учитывается форма и размеры сварного шва и, соответственно, влияние остаточных напряжений.

4. Не учитывается присутствие в сварных швах дефектов, наличие которых допускается нормативными документами.

5. Приведенные группы элементов и соединений, по которым определяются расчетные сопротивления усталости, не содержат узлы сопряжений из прямоугольных труб, конструктивные формы из которых являются широко распространенными.

6. При назначении расчетных сопротивлений усталости отсутствует корректировка этих величин для учета масштабного фактора.

В европейских нормах (EN 1993-1-9) [6] используется совершенно другой подход к определению несущей способности стальных конструкций при воздействии динамических нагрузок. Проверка усталостной прочности производится по следующим формулам:

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E2} \cdot \gamma_{Mf} / \Delta\sigma_c \leq 1, \quad (2)$$

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\tau_{E2} \cdot \gamma_{Mf} / \Delta\tau_c \leq 1, \quad (3)$$

где $\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E2}$ и $\gamma_{Ff} \cdot \Delta\tau_{E2}$ – расчетные значения размахов (амплитуды) нормальных и касательных напряжений;

γ_{Ff} – частные коэффициенты безопасности эквивалентных размахов напряжений цикла с постоянной амплитудой;

$\Delta\sigma_{E2}$, $\Delta\tau_{E2}$ – эквивалентные размахи напряжений цикла постоянной амплитуды на базе $2 \cdot 10^6$ циклов:

$$\Delta\sigma_{E2} = (\lambda_1 \dots \lambda_i) \cdot \Delta\sigma; \Delta\tau_{E2} = (\lambda_1 \dots \lambda_i) \cdot \Delta\tau;$$

$\Delta\sigma$, $\Delta\tau$ – размахи напряжений, вызванные расчетными динамическими нагрузками ($\gamma_{Ff} \cdot Q_k$), определяемые в местах предполагаемого усталостного разрушения при упругой работе металла;

Q_k – характеристическое (нормативное) значение отдельного временного воздействия;

λ_i – эквивалентные коэффициенты повреждений;

$\Delta\sigma_c$, $\Delta\tau_c$ – значения пределов выносливости при $2 \cdot 10^6$ циклов, определенных с учетом размеров образцов и остаточных напряжений;

γ_{Mf} – частный коэффициент безопасности для пределов выносливости. Значения этого коэффициента назначаются в зависимости от последствий разрушения конструкции («малые» или «большие») в пределах 1–1,35.

Предполагается, что $\Delta\sigma$ и $\Delta\tau$ – размахи главных напряжений. При наличии в сечении и нормальных, и касательных напряжений используется эквивалентный размах напряжений цикла:

$$\Delta\sigma_{eq} = 0,5(\Delta\sigma + \sqrt{\Delta\sigma^2 + 4\Delta\tau^2}). \quad (4)$$

При проверке усталостной прочности металла сварного шва учитывается два вида напряжения: равнодействующее напряжение, перпендикулярное оси сварного шва,

$$\sigma_{wf} = \sqrt{\sigma_{lf}^2 + \tau_{lf}^2}$$

и касательное напряжение, параллельное оси сварного шва,

$$\tau_{wf} = \tau_{lf} ,$$

где σ_{lf} – нормальное напряжение, перпендикулярное плоскости среза,

τ_{lf} и τ_{wf} – касательные напряжения, направленные перпендикулярно и параллельно оси сварного шва.

При знакопеременном цикле для элементов без сварных швов или со сварными швами, но со снятыми остаточными напряжениями, учитывая положительное влияние сжимающих напряжений на усталостную прочность, нормы допускают размах напряжений цикла определять как сумму наибольшего растягивающего напряжения и только 60 % сжимающего напряжения.

В EN 1993-1-9 пределы выносливости приведены в зависимости от конструктивных форм, вида сварных и болтовых соединений при количестве циклов $2 \cdot 10^6$. Всего в документе приведены пределы выносливости для 121 конструктивной формы применительно к основному металлу, металлу сварного шва и металлу болтов. Это значительно больше, чем в [4], где приведены только 32 конструктивные формы. Для стыковых сварных соединений делаются различия между сварными швами со снятыми выпуклостями и с не снятыми, при этом выпуклость сварного шва ограничивается, она не должна превышать 0,1 от ширины шва. К пределам выносливости привязаны требования к выполнению сварных соединений и необходимые технологические операции по их обработке. Так как сварочные напряжения зависят от толщины соединяемых элементов, то для корректировки предела выносливости используется поправочный коэффициент, равный $(25/t)^{0,2}$.

Для тавровых сечений приведены пределы выносливости для основного металла и наплавленного металла стыковых швов при действии только локальных сжимающих напряжений.

Некоторые замечания по методике изложений в EN 1993-1-9.

При расчете усталостной прочности по EN 1993-1-9 не учитывается такой важный параметр, как характеристика цикла. Например,

размах напряжений будет одинаковым при знакопеременном цикле, где, например, $\sigma_{\max} = 100$ МПа, а $\sigma_{\min} = -80$ МПа и при однозначном цикле, где $\sigma_{\max} = -180$ МПа, а $\sigma_{\min} = 0$, и при цикле, где $\sigma_{\max} = +180$ МПа, а $\sigma_{\min} = 0$, то есть не учитывается знакопеременность напряжений и знак напряжений (сжатие или растяжение). Правильность использования одного значения предела выносливости при разных характеристиках цикла экспериментально не подтверждается [2]. Здесь следует отметить, что напряжения σ_{\max} и σ_{\min} определяются от расчетных нагрузок, а не от пониженных, как это предусмотрено в [4].

Для определения расчетных значений размахов напряжений цикла используются эквивалентные коэффициенты повреждений (λ_i), значения которых в данном документе отсутствуют. Для самостоятельного определения коэффициентов λ_i необходимо иметь накопленный опыт работы похожих конструкций и «историю нагружения», которая тоже определяется на похожих конструкциях. Как известно, наши проектные организации подобной информацией не располагают. Также в этом нормативном документе не приведено значение коэффициента безопасности (γ_{ff}) и отсутствуют указания по его определению.

По тем характеристикам, которые приведены в таблицах по назначению пределов выносливости, остаточные (сварочные) напряжения могут быть учтены только в стыковых соединениях. В соединениях с применением угловых сварных швов это представляется невозможным, так как нет классификации соединений по размерам сечений сварных швов, от которых напрямую зависят сварочные напряжения.

Исходя из приведенных аналитических зависимостей, приведенный в EN 1993-1-9 расчет стальных конструкций на усталостную прочность производится без учета напряжений, создаваемых другими не переменными (не динамическими) нагрузками, влияние которых не подлежит сомнению: сжимающие напряжения повышают усталостную прочность, а растягивающие напряжения понижают.

Пределы выносливости, приведенные для тавровых сечений (сопряжение верхнего пояса подкрановой балки со стенкой) предполагают, что стенка находится под воздействием только сжимающих напряжений. В реальных условиях подкрановый рельс, как правило, смещен из плоскости стенки (это предусмотрено нормативными

документами) и поэтому в металле стенки и в металле сварного шва помимо сжимающих напряжений присутствуют напряжения, обусловленные крутящим моментом.

Приближенные сопоставительные расчеты усталостной прочности по методике, изложенной в СП и EN 1993-1-9, показывают, что результаты, полученные по EN 1993-1-9, имеют, как правило, значительно больший запас прочности, чем по СП. Следствием таких результатов является повышенный расход металла, но, с другой стороны, уменьшается вероятность появления отказов [7].

Заключение. Как следует из приведенных замечаний к существующим методикам расчета стальных конструкций на усталостную прочность, имеются параметры напряжено-деформированного состояния и геометрические величины, которые не учитываются при назначении предела выносливости конструктивной формы, что позволяет утверждать: существующие методики расчета являются условными.

Методика расчета, приведенная в EN 1993-1-9, имеет ряд преимуществ перед методикой, используемой в СП 16.1330.2017: частично учитываются сварочные напряжения и наличие дефектов, используется коэффициент масштабной корректировки, учитываются касательные напряжения и значительно расширен каталог конструктивных форм, для которых определен предел выносливости. Однако, использовать указанные преимущества для расчета стальных конструкций, изготавливаемых в нашей Республике, не представляется возможным, так как стали, применяемые в РБ, не соответствуют требованиям Еврокод 3 (см. EN 1993-1-1 п. 2.2 (2) и п. 3.2.3 (1) Р; EN 1993-1-9 п. 1.1 (4); EN 1993-1-10 п. 2.1 (3) Р).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бельчук, Г. А. Сварные соединения в корпусных конструкциях. – Судостроение, 1969, С. 128.
2. Труфяков, В. И. Усталость сварных соединений / В. И. Труфяков. – Киев: Наук. Думка, 1973. – С. 216.
3. Клыков, Н. А. Чувствительность сварных соединений малоуглеродистых сталей к концентрации напряжений при циклических нагрузках / Н. А. Клыков, А. Г. Скребков // Автоматическая сварка. – 1967. – № 7. – С. 43–46.

4. Актуализированная редакция СНиП II-23-81* : СП 16.13330. 2017. – М, 2017. – С. 148.

5. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* : СП 20.13330.2011. – М, 2011. – С. 79.

6. Проектирование стальных конструкций : EN 1993-1-9-2009* : Часть 1-9 Усталостная прочность.

7. Евдокимов, В. В. Совершенствование метода расчетной оценки усталостной долговечности элементов стальных строительных конструкций на основе сопоставления российских и европейских норм. Промышленное и гражданское строительство / В. В. Евдокимов. – 2013. – № 12. – С.17–19.

УДК 692.21

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ В ОБЛАСТИ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

ЖАБИНСКИЙ А. Н.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

В настоящее время, в связи с постановлением Совета Министров Республики Беларусь № 517 от 7 июля 2019 г, идет процесс модернизации отечественных норм расчета строительных конструкций.

Пересматриваются строительные нормы (СН) обязательного применения СН 2.01.01-2019 «Основы проектирования строительных конструкций», утвержденные в 2019 г. и повторяющие требования Европейского стандарта ТКП EN 1990 с Национальными приложениями [1]. В новой редакции СН, кроме основных положений основ проектирования строительных конструкций принятых из европейских правил необходимо учесть ряд положений отечественных нормативных документов по нагрузкам и воздействиям и определению расчетных усилий в элементах каркаса промышленных зданий с крановым оборудованием, которые в [1] не рассматриваются. К ним относятся: