

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ БОЛТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТОНКОСТЕННЫХ ПРОФИЛЕЙ

Гилодо А.Ю., Сингаевский П.М. (Одесская государственная академия строительства и архитектуры)

В качестве несущих конструкций покрытий, мансард, реже перекрытий и стоек в последнее время всё чаще используют лёгкие холодногнутые тонкостенные профили (ЛСТК). Применение тонкостенных профилей позволяет получить значительный экономический эффект по сравнению с применением привычного для многих проектировщиков «чёрного» прокатного металла. Для изготовления несущих конструкций используют стандартные профили трёх типов: швеллерные, С – образные и Z – образные. Высота сечений этих профилей – от 100 до 400мм. Для повышения местной устойчивости профилей на стенках и полках устраивают гибы или канавки. С целью снижения теплопроводности в гнутых профилях, используемых в наружных элементах каркаса на их стенке, в процессе прокатки выполняют перфорацию. Такие профили называют термопрофилями.

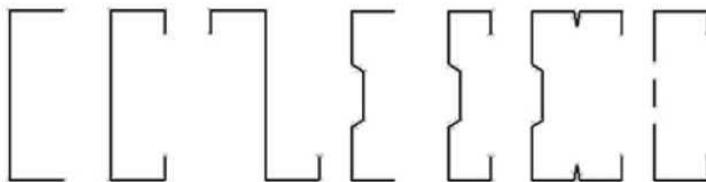


Рис. 1 Типы стальных холодногнутых профилей

Преимущества ЛСТК общеизвестны: индустриальность, быстрота монтажа, отсутствие необходимости использования тяжёлого подъёмно-транспортного оборудования, небольшой собственный вес и, как следствие, уменьшение нагрузки на фундаменты и относительно невысокая стоимость. По сравнению с традиционными металлическими конструкциями холодногнутые профили имеют следующие отличия: используется оцинкованная сталь толщиной 0,7-2,5мм; холодногнутые незамкнутые профили имеют повышенную способность к потере местной устойчивости; оцинкованная сталь толщиной менее 3мм имеет повышенный до 20% предел текучести стали по сравнению с гостовским значением [1]. Однако по-

настоящему потеснить профили стандартной толщины ЛСТК не удаётся. Одной из причин является ограниченный шаг рам, как правило, не превышающий 5м. Такой шаг обусловлен, главным образом, несущей способностью соединений элементов рам. То есть несущая способность узлов ограничивает генеральные размеры, шаг и пролёт элементов каркаса. Это мешает широкому применению быстровозводимых зданий из тонкостенных профилей. Для соединения тонкостенных конструкций используют следующие методы.

Сварные соединения тонколистовых элементов. Электродуговая сварка хотя и технологична, однако практически не применяется для сваривания оцинкованных тонколистовых элементов из-за тонкостенности листов, нарушения защитного цинкового покрытия и выделения вредных газов при горении цинкового покрытия. Сварку требуется вести очень тщательно, чтобы предотвратить подрезы, прожоги, сплавление отверстий. То есть при сварке тонкостенного металла значительно усложняется технология, учитывающая контроль скорости электрода и отвод тепла из зоны сварки. Не находят большого применения в строительстве быстровозводимых зданий из ЛСТК, но являются перспективными электроконтактные способы сварки, основанные на нагреве деталей теплотой от протекания по ним электрического тока и их запрессовывании (сварка проплавлением). Для нахлесточных соединений может применяться шовная, точечная и рельефная сварка. Вокруг зоны контактной сварки образуется сплошное кольцо из расплавленного цинка, вытесненного из места сварки, которое является хорошей защитой соединения от коррозии. При правильном выборе режима сварки почти не повреждается наружный цинковый слой. Недостатками контактной сварки оцинкованных профлистов принято считать низкую устойчивость процесса, склонность к непроварам и выплескам, низкую стойкость электродов, снижение коррозионной стойкости на поверхности. К сварным соединениям относятся и электрокнопки. Такое соединение выполняется наложением на место стыка стальной шайбы и провариванием её внутреннего пространства ручной электродуговой сваркой. Из-за большой массы наплавленного металла скорость коррозии такого стыка сравнима с коррозией основного металла. Недостатками соединения на электрокнопках являются большая масса наплавленного металла, низкая производительность из-за трудной свариваемости оцинкованного металла, плохой внешний вид, поэтому в проектах быстровозводимых зданий их пока не применяют.

Заклёпочные соединения являются достаточно эффективными. Заклёпки устанавливают в заранее просверленные или продавленные отверстия. Их используют при невозможности применения других типов соединений, либо в заводских стыках при толстых многолистовых пакетах, либо в монтажных стыках при необходимости установки чрезмерного количества болтов. Применение заклёпок остаётся очень ограниченным, что связано, в первую очередь, с их низкой технологичностью. Распространение в строительстве быстровозводимых зданий получило и крепление стальных профлистов на комбинированных заклёпках. Такие соединения, не требуют двухстороннего доступа к месту стыка, однако не обладают достаточной водонепроницаемостью и имеют проблему электрохимической коррозии в месте контакта разнородных материалов - алюминия и стали. Кроме этого, они обладают малой несущей способностью на срез.

Комбинированные соединения - клеёболтовые, клеесварные и клеёзаклёпочные желателно применять в нахлесточных соединениях, где клеевая прослойка принимает на себя часть напряжений, увеличивает противокоррозионную защиту в зоне контакта и увеличивает долговечность. Клеесварные соединения почти не уступают сварным по производительности и экономичности.

Многие проекты быстровозводимых зданий предусматривают соединения на самонарезающих винтах, как недорогих, лёгких и быстрых в монтаже. Винты обеспечивают в основном неразборное соединение. Их устанавливают в заранее подготовленные отверстия или используют саморезы, что обеспечивает по сравнению с болтовыми, большую производительность монтажа вследствие осуществления одностороннего доступа к узлу. Существенным недостатком следует считать ограниченную несущую способность, что исключает их использование при увеличении нагрузки, связанной с большими пролётами и шагами рам.

Перспективным, в этом смысле, можно считать простое и надёжное крепление конструкций – с помощью болтов. Несущая способность болтов существенно выше несущей способности саморезов и заклёпок при соответствующем диаметре. Диаметр болтов, применяемых в ЛСТК, имеет широкий диапазон (от 8 до 16мм). Проектировщики в Украине сталкиваются с проблемой отсутствия нормативной базы расчёта и проектирования конструкций из тонкостенных профилей. Не оптимизированы размеры зданий с привязкой к определённым холодногнутым профилям, нет рекомендаций и по проектированию узловых соединений.

Нормативный подход, реализованный в ДБН В.2.6-198:2014 [3]

не учитывает особенности работы тонкостенных конструкций. Толщина соединяемых элементов влияет только на определение расстояния между болтами. При определении расчетного усилия, которое может быть воспринято одним болтом, никаких отличий узлов тонкостенных элементов от традиционных нет:

- при срезе болта $N_{bs}=R_{bs}A_{bn}s\gamma_b\gamma_c\gamma_n$

- при смятии металла соединяемых элементов в отверстии $N_{bp}=R_{bp}d_b\sum t_{\min}\gamma_b\gamma_c\gamma_n$

- при растяжении болта $N_{bt}=R_{bt}A_{bn}\gamma_c\gamma_n$

R_{bs} , R_{bp} , R_{bt} – расчётные сопротивления одноболтовых соединений

$A_b=0,78d_b^2$ – площадь поперечного сечения стержня болта

n_s – количество расчётных плоскостей среза одного болта

γ_c – коэффициент условий работы

γ_b – коэффициент условий работы болтового соединения

d_b – внешний диаметр стержня болта

$\sum t_{\min}$ – наименьшая суммарная толщина элементов в соединении, сминаемых в одном направлении

A_{bn} – площадь поперечного сечения нетто болта по резьбе

Американские нормы дают точный расчёт болтовых соединений для тонкостенных профилей.

Несущая способность одноболтового соединения на смятие равна:

$$V_r = \Phi_n C d t R_{un} [2],$$

где $\Phi_n=0,75$ – коэффициент надёжности;

C – коэффициент (при наличии шайб) сопротивлению смятию,

$C=3$ при $d/t=10$; $C=30/(d/t)$ при $10 \leq d/t \leq 16,5$; $C=1,8$ при $d/t > 16,5$

d – номинальный диаметр болта; t – минимальная толщина соединяемых элементов. Для соединения без шайб $C=0,75$.

Несущая способность одноболтового соединения на срез равна:

$$V_r = A_n R_{un},$$

где $A_n=1,2(a-d/2)$; a – расстояние от центра отверстия до края

элемента. В отличие от наших норм a увеличено и составляет $3d_{отв}$ (в

ДБН В.2.6-198:2014 расстояние от края элемента до центра болта

принято от $1,2d_{отв}$ до $2,5d_{отв}$.)

Соединения на болтах без предварительного натяжения

малоэффективны, так как необходимая площадь смятия достигается

только за счёт увеличения диаметра болта, что приводит к ослаблению сечения.

Соединения на стальных болтах по методике Еврокода 3, ДСТУ-Н Б EN 1993-1-3

Соединения должны быть компактными. Расположение болтов должно обеспечивать нормальные условия их установки в процессе монтажа или ремонта. Усилия среза на отдельные болты допускаются при условиях:

- болты имеют достаточную пластичность;
- срез не является критической формой разрушения.

В формулах приняты такие обозначения:

- A – полная площадь поперечного сечения болта;
- A_s – площадь сечения растянутой части болта;
- A_{net} – площадь ослабленного сечения соединяемого элемента;
- β_{Lf} – понижающий коэффициент по EN 1993-1-8;
- d – номинальный диаметр болта;
- d_o – номинальный диаметр отверстия;
- d_w – диаметр шайбы или головки болта;
- e_1 – расстояние вдоль усилия от центра болта до ближайшего края соединяемого элемента (рис. 2);
- e_2 – расстояние поперёк усилия от центра болта до ближайшего края соединяемого элемента (рис. 2);
- f_{ub} – временное сопротивление растяжению материала болта;
- n_f – количество болтов в одном соединении;
- p_1 – расстояние между центрами болтов вдоль усилия (рис. 2);
- p_2 – расстояние между центрами болтов поперёк усилия (рис. 2);
- t – толщина наиболее тонкого элемента в соединении;
- t_1 – толщина наиболее толстого элемента в соединении;

При определении расчётной несущей способности болтов коэффициент надёжности γ_M принимается равным γ_{M2} . Величина γ_{M2} может быть приведена в национальном дополнении к расчету. Рекомендуется принимать $\gamma_{M2} = 1,25$.

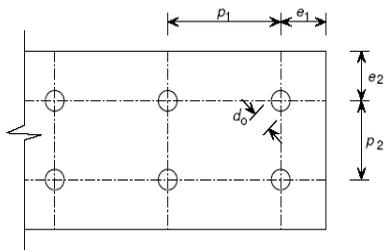


Рис.2 Схема размещения болтов

Несущая способность из условия смятия:

$$F_{b,Rd} = 2,5 \alpha_b k_t f_u d t / \gamma_{M2} \quad \alpha_b \text{ меньшая из величин от } 1,0 \text{ до } e_1 / (3d)$$
$$k_t = (0,8 t + 1,5) / 2,5 \quad \text{для} \quad 0,75 \text{ mm} \leq t \leq 1,25 \text{ mm}; \quad k_t = 1,0 \quad \text{для} \quad t > 1,25 \text{ mm}$$

Несущая способность ослабленного отверстиями сечения:

$$F_{n,Rd} = (1 + 3 r (d_o / u - 0,3)) A_{net} f_u / \gamma_{M2} \quad \text{и} \quad F_{n,Rd} \leq A_{net} f_u / \gamma_{M2}$$

где: $r =$ [количество болтов в поперечном сечении] / [общее количество болтов в соединении] $u = 2 e_2$ и $u \leq p_2$

Несущая способность на срез:

– для классов прочности 4.6, 5.6 и 8.8:

$$F_{v,Rd} = 0,6 f_{ub} A_s / \gamma_{M2}$$

– для классов прочности 4.8, 5.8, 6.8 и 10.9:

$$F_{v,Rd} = 0,5 f_{ub} A_s / \gamma_{M2}$$

Условия $F_{v,Rd} \geq 1,2 \Sigma F_{b,Rd}$ или $\Sigma F_{v,Rd} \geq 1,2 F_{n,Rd}$

Сфера применения:

$$e_1 \geq 1,0 d_o \quad p_1 \geq 3 d_o \quad 3 \text{ mm} > t \geq 0,75 \text{ mm}$$
$$e_2 \geq 1,5 d_o \quad p_2 \geq 3 d_o \quad f_u \leq 550 \text{ N/mm}^2$$

Минимальный размер болта: М 6

Классы прочности: 4.6 – 10.9

В соединениях ЛСТК является малоизученным явление податливости узлов. Определение податливости — повышенная деформативность соединения на малом по отношению к высоте сечения участке длины стыка по сравнению с деформативностью стыкуемых элементов. По физической сути податливость соединения равна смещению, вызванному единичной силой при сжатии — растяжении, сдвиге или повороте. Местная податливость — взаимное смещение (проскальзывание) стыкуемых элементов, обусловленное местными деформациями в зоне каждой силовой точки соединения под нагрузкой [4].

Выделяют следующие причины образования податливости:

- первоначальные сдвиги в соединении ввиду разности диаметра отверстия и диаметра метиза крепления;
- искривление геометрии контура отверстия (эллипсность) вследствие воздействия на кромку соединяемых элементов стержня метиза крепления;

- смятие кромок тонколистового металла соединяемых элементов, а также обмятие стержня метиза крепления;
- обмятие, искривление геометрии поперечных сечений профилей при передаче нагрузки непосредственно на них.

Сечения стержневых элементов в пролетных конструкциях, изготавливаемых из холодногнутого профилей повышенной жесткости, подбирают как по первому, так и по второму предельному состоянию, т.е. исходя из предельно допустимых вертикальных перемещений, определяемых по [3]. В ходе подбора сечений инженером чаще всего анализируется обычная классическая стержневая модель конструкции в каком-либо конечно-элементном расчетном комплексе. При этом за рамками анализа остаются дополнительные перемещения узлов конструкции, возникающие за счет их податливости, а также перераспределение внутренних усилий в элементах. В результате этого конструкция уже не удовлетворяет требованиям второго предельного состояния.

Решение вопроса, связанного с учетом ограничения податливости узловых соединений на самонарезающих винтах при расчете ферм из оцинкованных холодногнутого профилей, может привести к значительному эффекту. В настоящее время не сформулирован и не реализован практический подход к решению данной задачи.

Выводы:

Применение болтовых соединений тонкостенных конструкций при отсутствии специальной нормативной базы, требует разработки и проведения соответствующих испытаний с целью последующей обработки и создания расчетных положений, отражающих особенности работы данного типа соединения, в том числе с учетом податливости узловых соединений.

Литература:

1. Г.А.Нехаев «Лёгкие металлические конструкции». Тульский госуниверситет. Изд-во ООО «ПрофСтальПрокат».
2. Wallace James A., Testing of bolted cold - formed steel connection in bearing/Final report by Canadian Cold Formed steel Research Group/ Waterloo Canada, March 2001 33p.
3. ДБН В.2.6-198:2014 «Сталеві конструкції. Норми проектування»
4. Кожевников В.Ф. Расчет местной податливости элементов многорядного двусрезного болтового соединения // Ученые записки ЦАГИ. 1982. № 1. С. 57—63.