

УДК 624.014

Рамы из сварных двутавров с гофрированной стенкой

¹Нилов А.А., к.т.н., ²Мартынюк А.Я., к.т.н., ²Лазнюк М.В., к.т.н.,
²Рыженко С.С., аспирант

¹Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Украина
²ООО „ПЕМ Украина”, Zeman Group, Украина

Анотація. В даній роботі наводяться приклади виготовлення і застосування рам із двутаврів з гофрованою стінкою, в тому числі зі змінною жорсткістю. Розглядаються питання щодо галузі застосування таких конструкцій, а також особливості їх напружено-деформованого стану та методики проектування.

Аннотация. В настоящей работе приводятся примеры изготовления и применения рам из двутавров с гофрированной стенкой, в том числе и переменной жесткости. Рассматриваются вопросы об области применения таких конструкций, а также особенности их напряженно-деформированного состояния и методики проектирования.

Abstract. The article highlights the issues of designing and producing of I-profile steel constructions with thin corrugated web and variable stiffness. The producing technology of such constructions has been analyzed.

Ключевые слова: сварные двутавры с гофрированной стенкой, рамы переменного сечения, гибкость стенки, напряженно-деформированное состояние.

Стальные рамы из сварных двутавров переменного сечения в легком строительстве известны достаточно давно. В первую очередь имеется в виду применение рам с так называемой повышенной гибкостью стенки или балок с гибкой стенкой для рамных конструкций. Однако такие конструкции в Украине не имеют широкого применения, так как в отечественных нормах, как известно, отсутствуют указания по расчету таких конструкций.

Несмотря на дальнейшие научные разработки и усовершенствования рам с элементами переменной жесткости, следовало бы остановиться на одном принципиальном моменте. Максимальная известная нам гибкость стенки, которая применяется в некоторых экспериментальных системах, не превышает $\lambda_w = 250 \dots 300$. В то же время появилась возможность замены плоской стенки двутавра на гофрированную, что на практике позволяет применить гибкость $\lambda_w = 500 \dots 600$ без местной потери устойчивости.

В настоящее время в Украине накоплен достаточно большой опыт по строительству зданий различного назначения из стальных двутавров с тонкой поперечно-гофрированной стенкой (рис. 1 – 3).



Рис. 1. Спортивный комплекс (пролет 39 м) в Киевской области



Рис. 2. Цех кокильного литья в Луганской области

Рамы, изготовленные из двутавров с гофрированной стенкой, с успехом удовлетворяют следующие требования, предъявляемые к легким металлическим конструкциям (ЛМК) [1, 2]:

- уменьшение массы расходуемого металла;
- повышение производительности труда при изготовлении и монтаже конструкций;
- повышение скорости возведения зданий и сооружений;
- значительное снижение стоимости стальных конструкций.

Следует также отметить, что двутавры с гофрированной стенкой с успехом могут служить альтернативой дефицитным прокатным балочным и широкополочным двутаврам, которые не изготавливаются в Украине [3].

А использование их вместо традиционных сварных двутавров приводит к экономии стали более 18 % [4].

Несмотря на такое очевидное преимущество гофрирования стенок двутавра, с целью дополнительной экономии стали в настоящее время все чаще находят применение элементы рам переменного сечения с гофрированной стенкой (рис. 3). Существующее на украинских заводах оборудование, разработанное специалистами австрийской фирмы Zeman Group [2], позволяет изготавливать такие конструкции.



Рис. 3. Конструкции производственного цеха по производству безалкогольных напитков в Автономной Республике Крым

Изготовление двутавров с гофрированной стенкой переменного сечения, как правило, требует лишь одной дополнительной операции — косога рез гофрированной стенки. Эта операция выполняется только автоматическим способом с применением роботов. В итоге из одного двутаврового профиля после реза стенки и приварки поясов образуются два (рис. 4).



Рис. 4. Линия для изготовления двутавров с гофрированными стенками

Изменение сечения двутаврового профиля приводит не только к уменьшению расхода стали на стенку, но и к уменьшению геометрических размеров баз колонн, для которых, как правило, используется толстый листовой прокат. Вследствие этого при значительной длине здания и соответственно значительном количестве стоек рам происходит достаточно ощутимая экономия стали.

Дополнительные исследования НДС двутавров с гофрированной стенкой переменного сечения с помощью конечно-элементного анализа в ПК ЛИРА показало, что изменения эпюры касательных напряжений не происходит, как в обыкновенных двутаврах с переменной высотой сечения [5]. Касательные напряжения распределяются практически по закону прямой линии, как и у двутавров с гофрированной стенкой постоянного сечения. Это дает возможность сделать вывод о том, что такие конструкции по критериям прочности следует рассчитывать как и двутавры с гофрированной стенкой постоянного сечения. Устойчивость таких конструкций на данном этапе проверяется по рекомендациям [5, 12, 13] как для сплошностенчатых двутавров. Правомерность такого расчета, а также определение расчетных длин сжатых стержней с гофрированной стенкой переменного сечения требуют дополнительных исследований и уточнений.

Однако в настоящее время наибольшее распространение получили рамы из двутавров с гофрированной стенкой постоянного сечения. Поэтому именно такие конструкции в первую очередь нуждаются в создании методики проектирования в соответствии с действующими нормативными документами.

Расчет прочности рамных элементов симметричного двутаврового сечения с гофрированной стенкой предполагается производить по формуле

$$\frac{N}{A_{2fn} R_y \gamma_c} \pm \frac{M_x}{A_{fn} h_I R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (1)$$

где A_{2fn} – площадь нетто двух поясов двутавра; A_{fn} – площадь нетто соответственно одного пояса; $h_I = h_w + t_f$ – расстояние между центрами тяжести поясов.

Некоторым увеличением продольной силы в наклонных поясах можно пренебречь, так как в реальных конструкциях этот угол составляет незначительную величину (менее 10°) [12]. Увеличения же продольной силы в поясах за счет перераспределения на них доли поперечной силы не происходит, так как пояса не включаются на работу Q .

Устойчивость элементов рам двутаврового сечения с гофрированной стенкой, подверженных влиянию сжатия и изгиба, проверяется:

- из плоскости стенки, как для отдельных центрально-сжатых поясов двутавра;
- в плоскости изгиба (в плоскости стенки) как для стержня в целом [6–8].

В нормах [6] и работе [7] расчет устойчивости колонн с поперечно-гофрированной стенкой предлагается производить по методике расчета сжатых сквозных конструкций:

$$\frac{N}{\varphi_e A_{2f}} \leq R_y \gamma_c, \quad (2)$$

где φ_e – нормативный [6, 9] коэффициент, который определяется как для внецентренножатого стержня сквозного сечения в зависимости от условной приведенной гибкости $\bar{\lambda}_{ef}$. Приведенная гибкость $\bar{\lambda}_{ef}$ определяется по гибкости λ , которая в свою очередь определяется для симметричного сечения по радиусу инерции $r_x = 0,5h_1$ и относительного эксцентриситета $m = eA_f h_1 / J_f$.

При этом предполагается, что двутавр с гофрированной стенкой заменяется моделью из двух полос, соединенных бесконечно тонкой, но конечно-податливой на сдвиг стенкой, т.е. расчет предполагается проводить с учетом сдвиговых деформаций. Однако авторы не знают других авторитетных литературных источников, в которых бы присутствовали указания на расчет сплошностенчатых стержней с учетом деформаций сдвига независимо от толщины стенки. Как следует из [14], учет касательных напряжений приводит к уменьшению критической силы не более 2...3 % при гибкости стержней 30 и более. Поэтому для всех практических значений гибкости расчет на устойчивость стержней может производиться без учета сдвиговых напряжений.

Подтверждением этого факта служит и методика расчета двутавров с плоской гибкой стенкой с учетом закритических деформаций при потере местной устойчивости стенки, расчет которых производится как для сплошностенчатых стержней [9]. К этому стоит добавить, что сдвиговые деформации в двутаврах с гофрированной стенкой на 15...20 % меньше, чем в двутаврах с плоской гибкой стенкой [10].

При исследовании в работе [7] податливости гофрированной стенки и ее влияния на устойчивость стержня отмечалось, что создание теоретической модели и определение зависимости деформаций сдвига гофрированной

стенки от поперечной силы чрезвычайно затруднено, так как податливость стенки зависит не только от деформаций сдвига, но и от местной неустойчивости гофров. Однако в Украине в настоящее время используются конструкции с такими параметрами синусоидальных гофров, которые не только не допускают потерю местной устойчивости гофров и гофрированной стенки в целом [2, 4, 8], но и имеют значительной меньшую деформативность по сравнению с треугольными гофрами [6, 7].

На основании этого предлагается расчет таких конструкций вести как для сплошностенчатых стержней, принимая коэффициент формы сечения равным 1, а гибкость по формуле $\lambda = \ell_{ef} / i$.

Проведенные в настоящее время экспериментальные исследования стержней с поперечно-гофрированной стенкой синусоидального очертания, подверженных сжатию и сжатию с изгибом [11], выявили только местные формы потери устойчивости поясов (рис. 5). В настоящее время авторы проводят подготовку к проведению дополнительных экспериментальных исследований.



Рис. 5. Экспериментальные исследования стержней с поперечно-гофрированной стенкой синусоидального очертания, подверженных сжатию с изгибом

В заключение следует сказать, что обеспечение устойчивости рамных стержней в плоскости наибольшей жесткости, как правило, на практике не является решающим фактором. Однако в последнее время в Украине (рис. 2) и в Австрии (рис. 6) нам приходилось решать ряд задач, связанных с проектированием промышленных объектов, в которых требовались достаточно высокие стойки при значительном ограничении развития сече-

ния, накладываемым технологическими и другими требованиями. В связи с этим вопрос об уточнении методики расчета внецентренножатых элементов двутаврового сечения с гофрированной стенкой стоит еще острее.



Рис. 6. Цех металлопрокатного завода в г. Линце (Австрия)

Литература

- [1] Максимов Ю.С., Остриков Г.М. Стальные сварные двутавровые сечения с гофрированными стенками – перспективные и эффективные строительные конструкции // Экспресс-информ. – Алматы: KAZGOR, 2008. – № 1(55). – С. 24 – 27.
- [2] Siokola, W. Wellstegträger. Herstellung und Anwendung von Trägern mit profilierten Steg. Stahlbau 66 (1997) Heft 9. – 595 s.
- [3] Максимов Ю.С., Остриков Г.М. Технично-економічні характеристики сортамента сварных двутавровых профилей с гофрированными стенками // Экспресс-информ. – Алматы: KAZGOR, 2008. – № 2 (56). – С. 22 – 28.
- [4] Нилов А.А., Лазнюк М.В. Уточнение расчета тонких поперечно гофрированных стенок изгибаемых элементов двутаврового сечения с различной формой и параметрами гофров // Науковий вісник будівництва: Зб. наук. пр. – Харків: ХДТУБА, 2006. – Вип. 37. – С. 91 – 100.
- [5] Білик С.І. Рациональні сталеві каркаси мало енергоємних будівель із двотаврів змінного перерізу: Автореф. дис. ... докт. техн. наук / КНУБА: 05.23.01. – К., 2008. – 33 с.
- [6] СНиП РК 5.04-23-2002. «Стальные конструкции». – Астана: Комитет по делам строительства Министерства индустрии и торговли Республики Казахстан, 2003. – 118 с.
- [7] Огневой В.Г. Исследование работы стальных колонн одноэтажных промышленных зданий с тонкой гофрированной стенкой: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / ВГАСА: 05.23.01 – Воронеж, 1994. – 19 с.
- [8] Нилов А.А., Лазнюк М.В., Мартынюк А.Я. К вопросу о нормативном обеспечении проектирования стальных двутавров с гофрированными стенками // Збір. наук. пр. Українського науково-дослідного та проектного інституту

- сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського / Відп. ред. О.В. Шимановський. – К.: Вид-во «Сталь», 2008, вип. 1. – С. 44 – 53.
- [9] СНиП II-23-81*. Стальные конструкции. Нормы проектирования / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 96 с.
- [10] Бирюлев В.В., Кошин И.И., Крылов И.И., Силевестров А.В. Проектирование металлических конструкций: Спец. курс. Учеб. пособие для вузов. – Л.: Стройиздат, 1990 – 432 с.
- [11] Behavior and Application of SIN Corrugated Web Beams and Columns // Yanlin GUO / Department of Civil Engineering, Tsinghua University, 2008. Катюшин В.В. Здания с каркасами из стальных рам переменного сечения (расчет, проектирование, строительство). – М.: ОАО «Издательство «Стройиздат», 2005. – 656 с.
- [13] Металлические конструкции. В 3 т. Т. 1. Элементы конструкций: Учеб. для строительных вузов / В.В. Горев, Б.Ю. Уваров, В.В. Филиппов и др.; Под ред. В.В. Горева. – М.: Высш. шк., 2001. – 551 с.
- [14] Блейх Ф. Устойчивость металлических конструкций. – М.: Физматгиз, 1959. – 544 с.

Надійшла до редколегії 24.06.2009 р.