УДК 624.014.2

К вопросу о нормативном обеспечении проектирования стальных двутавров с гофрированными стенками

[1]Нилов А.А., к.т.н., **[2]Лазнюк М.В., [2]Мартынюк А.Я.**

[1]Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Украина
[2]ООО "ПЕМ Украина", Zeman Group, Украина

Анотація. У даній статті описуються визначення розподілу і значення напружень в описуваній зоні резервуара. Проведений аналіз напружень у днищі резервуара і в підсилювальній накладці на корпусі резервуара в зоні її з'єднання з днищем. Проаналізовано стан напружень у корпусі, днищі і фундаменті резервуара.

Аннотация. В данной статье описываются определения распределения и значения напряжений в описываемой зоне резервуара. Произведен анализ напряжений в днище резервуара и в усилительной накладке на корпусе резервуара в зоне ее соединения с днищем. Проанализированы состояния напряжений в корпусе, днище и фундаменте резервуара.

Abstract. In this article the definitions are described concerning distribution and meaning of stresses in the specified reservoir's zone. The analysis is implemented in the reservoir's bottom and in the strengthening strap on the reservoir's shell in its connection zone to the bottom. States of stresses are analyzed in the shell, bottom and foundation of the reservoir.

Ключевые слова: резервуар, придонно-очистные люки, редуцированные напряжения, числовой анализ, система MSC/Nastran.

В настоящее время в строительстве Украины все большее распространение находят стальные конструкции с применением тонкостенных сварных двутавров с поперечно-гофрированными стенками (БТГС). В мире такие конструкции известны достаточно давно и их эффективность доказана в многочисленных отечественных и зарубежных исследованиях, однако их массовое внедрение сдерживалось из-за технологических трудностей сваривания тонкой криволинейной стенки с поясами. И только сравнительно недавно стало возможно быстро и качественно изготавливать такие конструкции благодаря новейшим технологиям, разработанным специалистами австрийской фирмы Zeman Group [1].

В последнее время появились заводы с автоматизированными линиями по производству балок с волнистой (синусоидальной) стенкой (в литературе встречаются название SIN-балки или гофро-балки), что позволило существенно расширить украинский рынок легких металлоконструкций (ЛМК) и быстромонтированных зданий (БМЗ). И сегодня производственные и гражданские здания, каркас которых выполнен из двутавров с

поперечно-гофрированными стенками, встречаются во многих регионах Украины (рис. 1, 2).

Рис. 1. Монтаж каркаса завода металлоконструкций в Киевской области

Рис. 2. Конструкции производственного цеха по производству безалкогольных напитков в Автономной Республике Крым

Несмотря на технологические возможности производства и значительное количество уже построенных зданий из таких конструкций, а также разработанные ведомственные технические условия [2], до сегодняшнего времени в Украине отсутствует нормативная методика их расчета и проектирования. При этом необходимо заметить, что двутавры с гофрированной стенкой рекомендованы в качестве ригелей каркасов сейсмостойких зданий в нормах [3]. В связи с сегодняшним обсуждением нового ДБН по стальным конструкциям [4], основной целью данной работы является решение вопроса о включении методики проектирования двутавровых конструкций с гофрированными стенками в государственные нормы Украины.

Для разработки достоверной методики расчета таких конструкций было проведено ряд дополнительных теоретических и экспериментальных исследований [5, 6]. На основании полученных результатов, а также всестороннего изучения отечественных и зарубежных публикаций и нормативных документов [7–13] предлагается включение в нормативные документы указаний по расчету и проектированию двутавров с гофрированной стенкой в качестве изгибаемых, центрально- и внецентренносжатых (растянутых) элементов. Рассматриваются три формы гофрирования стенки, используемых в практике строительства: волнистая (синусоидальная), треугольная и трапецеидальная (рис. 3).

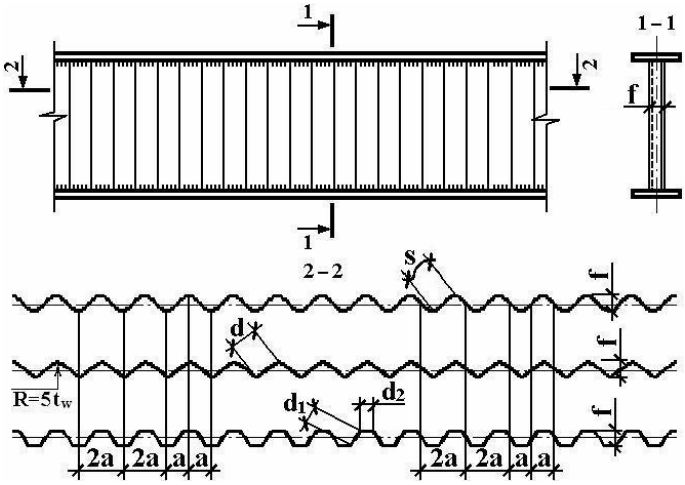

Рис. 3. К расчету двутавров с гофрированной стенкой

Известно [1, 2, 5 – 13], что тонкие поперечно-гофрированные стенки практически не включаются в работу на восприятие нормальной силы и изгибающего момента, а работают исключительно на действие

сдвигающих усилий. Учет в расчетах участков стенки, примыкающих непосредственно к поясам и воспринимающих долю нормальных напряжений, представляется нецелесообразным из-за используемых на практике малых толщинах гофрированного листа 1,5…3 мм. Поэтому расчет прочности и общей устойчивости от воздействия указанных усилий сводится к проверке поясных листов на прочность и устойчивость по аналогии с решетчатыми балками или сквозными колоннами соответственно. Для расчета прочности изгибаемых элементов при действии местных напряжений, по аналогии с двутаврами с плоской стенкой, также может быть принята нормативная методика [4]. Указанные процедуры приведены в нормах [4] и в данной работе более детально не рассматриваются.

Наибольшее отличие по сравнению с традиционными конструкциями представляет собою расчет прочности и устойчивости гофрированной стенки. Этот вопрос до сих пор обсуждается в литературе и имеет научный и практический интерес.

Значения касательных напряжений τ_{xy}, распределяющихся равномерно по высоте стенки в сечениях изгибаемых элементов с поперечно-гофрированной стенкой, предлагается определять по формуле

$$\tau_{\mathrm{xy}} = \frac{Q}{h_w t_w \mathrm{k}_\lambda} \le R_s \gamma_c \,, \qquad (1)$$

где Q – поперечная сила в сечении; h_w и t_w – соответственно высота и толщина стенки; γ_c – коэффициент условий работы; k_λ – коэффициент, учитывающий геометрически нелинейное поведение тонкой гофрированной стенки [5], определяется по формуле

$$\mathrm{k}_\lambda = 1{,}085 - 0{,}008\bar{\lambda}_w \le 1 \,, \qquad (2)$$

здесь $\bar{\lambda}_w = \mathrm{h_w}/t_w \sqrt{R_y/E}$ – условная гибкость гофрированной стенки ($\mathrm{k}_\lambda > 1$).

При расчете устойчивости гофрированных стенок при действии касательных напряжений рассматривают «местную» потерю устойчивости, когда устойчивость теряет панель гофра (пластинка, заключенная между поясами и вершинами гофров), и «общую» потерю устойчивости стенки, когда потеря устойчивости происходит по характерным диагональным полуволнам с продавливанием вершин гофров (рис. 4).

Расчет потери устойчивости гофрированных стенок балок при наличии местных напряжений ($\sigma_{\text{loc}} \neq 0$) выполняется по формулам

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_{\text{loc}}}{\sigma_{\text{loc.cr}}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{\text{xy}}}{\tau_{p,cr}}\right)^2} \leq \gamma_c \,, \tag{3}$$

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_{\text{loc}}}{\sigma_{\text{y.cr}}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{\text{xy,max}}}{\tau_{o,cr}}\right)^2} \leq \gamma_c \,, \tag{4}$$

где σ_{loc} – местные (локальные) напряжения, определяемые по методике [4]; τ_{xy} – касательные напряжения в стенке, определяемые из формулы (1); $\tau_{\text{p,cr}}$ – критические касательные напряжения при местной потере устойчивости панели гофра, расчет которых сводится к определению критических тангенциальных напряжений бесконечной шарнирно-опертой по контуру пластинки с размерами $s \times h_w$ (волнистые гофры) или $d \times h_w$ (треугольные и прямоугольные гофры) (рис. 1):

— для синусоидальной стенки

$$\tau_{\text{p},cr} = \left(5{,}34 + \frac{f \cdot s}{h_w \cdot t_w}\right)\frac{1{,}12 R_s}{\bar{\lambda}_c^2} \,; \tag{5}$$

— для треугольных и трапецеидальных гофров

$$\tau_{\text{p},cr} = \frac{6 R_s}{\bar{\lambda}_c^2} \,. \tag{6}$$

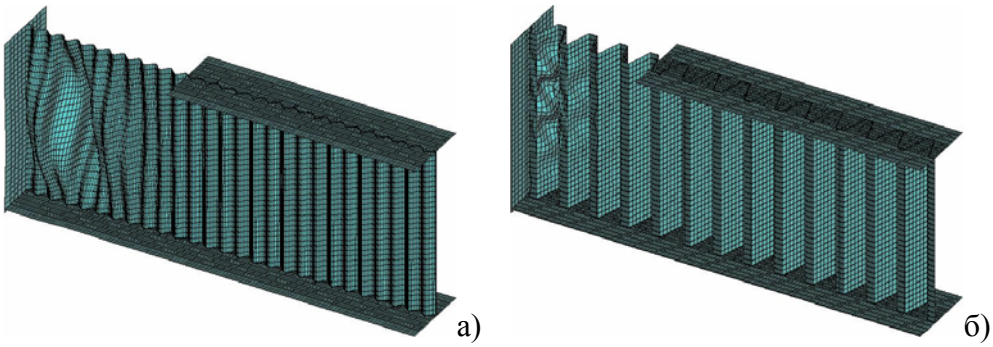

Рис. 4. Формы потери устойчивости гофрированной стенки:
а – "общая"; б – "местная"

В формулах (5), (6) $\bar{\lambda}_c$ – условная гибкость панели гофра

$$\bar{\lambda}_c = \frac{s}{t_w}\sqrt{\frac{R_y}{E}} \text{ или } \bar{\lambda}_c = \frac{d_{\max}}{t_w}\sqrt{\frac{R_y}{E}}, \tag{7}$$

где f – высота гофров (рис. 1); s – длина полуволны синусоиды; $d_{\max}$ – ширина панели гофра, которая для трапецеидальных гофров принимается как большая из сторон d_1 или d_2.

При выведении уравнений (5), (6) учитывалось снижения критических напряжений из-за влияния податливости опор (гофров), подпирающих друг друга, а также из-за начальных несовершенств и остаточных напряжений от сваривания и т.д. [5, 11].

Критические местные (нормальные) напряжения $\sigma_{\text{loc.cr}}$ в формулах (3), (4) определяются по формуле

$$\sigma_{loc.cr} = \frac{0,8\ C_1\ R_y}{\bar{\lambda}_c^2}, \tag{8}$$

где $\bar{\lambda}_c$ – определяется по выражениям (6), (7); C_1 – коэффициент, который принимается по табл. 1 [4], в зависимости от соотношений s/h_{w} или d/h_{w} и значения δ, которое определяется по формуле

$$\delta = 0,8\frac{b_f}{h_w}\left(\frac{t_f}{t_w}\right)^3. \tag{9}$$

Таблица 1

δ	Значения C_1 для балок с гофрированными стенками при s/h_w ($\text{d}/\text{h}_\text{w}$) равном				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
1	7,73	8,50	9,34	10,30	11,30
2	7,67	8,50	9,50	10,60	11,80
4	7,57	8,50	9,53	10,70	12,00
≥ 6	7,69	8,67	9,77	11,02	12,40

Критические тангенциальные напряжения при общей потере устойчивости гофрированной стенки вычисляются с помощью теории анизотропных (ортотропных) пластин в зависимости от соотношения $\beta = h_w/a$ [5] по различным методикам:

– при отношении высоты стенки к полуволне гофров $\beta = h_w / a \le 8,4$ определяются критические тангенциальные напряжения свободно опертых бесконечно длинных пластин, часто подкрепленных ребрами жесткости, установленными друг от друга на расстоянии, равным полуволне гофров a

$$\tau_{o,cr} = \frac{1,12 C_{o,cr} R_s}{\bar{\lambda}_w^2}, \tag{10}$$

здесь $C_{o,cr}$ – коэффициент, который определяется в зависимости от соотношения параметров гофров по формуле

$$C_{o,cr} = 5,34 + \left(5,5\beta^2 - 0,6\right) \sqrt[3]{\frac{\gamma}{4\left(7\beta^2 - 5\right)}}, \tag{11}$$

где γ – отношение погонной жесткости гофрированной стенки к цилиндрической жесткости плоской пластинки такой же толщины:

$$\gamma = \frac{EJ}{Da} = \frac{12\left(1-\nu^2\right) J}{t_w^3 a} = \frac{12\left(1-\nu^2\right) \bar{J}}{t_w^3}, \tag{12}$$

здесь J – момент инерции гофра; $\bar{J}$ – погонный момент инерции гофрированной стенки.

Формула (11) справедлива только при $\gamma < 4\left(7\beta^2 - 5\right)$. Если $\gamma > 4\left(7\beta^2 - 5\right)$, то $C_{o,cr}$ не зависит от γ, то есть устойчивость стенки определяется местной устойчивостью панели гофра, и проверку устойчивости поперечно гофрированной стенки при соотношении $\beta = h_w / a \le 8,4$ следует выполнять только по формуле (5).

При параметрах гофрирования $\beta = h_w / a > 8,4$ расчет общей устойчивости стенок балок выполняется по формуле

$$\tau_{o,cr} = 32,4 \frac{\sqrt[4]{D_1 D_2^3}}{h_w^2 t_w}, \tag{13}$$

где D_1 и D_2 – жесткостные характеристики изгиба гофрированного листа по главным направлениям:

$$D_1 = \frac{E t_w^3}{12} \frac{a}{s}; \quad D_2 = \frac{EJ}{a}. \tag{14}$$

Уравнение (14) справедливо при $D_1 << D_2$, что всегда соблюдается для реальных конструкций.

Критические нормальные напряжения общей потери устойчивости гофрированной стенки определяются как при центральном сжатии условной стойки из плоскости стенки, загруженной сосредоточенной силой:

$$\sigma_{\text{y,cr}} = \varphi \; R_y \le \sigma_{loc,cr}, \tag{15}$$

где φ – нормативный коэффициент продольного изгиба для центрально-сжатых элементов при гибкости условной стойки $\lambda = 2{,}5 \; h_w / f$.

В случае когда $\sigma_{y,cr} \ge \sigma_{loc,cr}$, при проверке общей устойчивости гофрированной стенки по формуле (4) следует принимать $\sigma_{loc,cr}$ вместо $\sigma_{y,cr}$.

При проверке устойчивости гофрированной стенки по формулам (3) и (4) должны выполняться следующие условия:

1) по аналогии с балками с гибкими стенками [14]:

$$\frac{\sigma_{\text{loc}}}{\sigma_{\text{loc,cr}}} \le 0{,}75\gamma_c; \tag{16}$$

2) величина эксцентриситета, с которым передается сосредоточенная нагрузка, относительно продольной оси балки не должна превышать $e \le f$, т.е. сосредоточенная нагрузка должна быть приложена в области высоты гофра.

Дополнительного пояснения требует формула (1). Введение коэффициента k_λ в (1) обуславливается применением очень тонких стенок с гибкостью $\lambda_w > 400...600$, что требует их расчета по деформированной схеме. В недавно утвержденных европейских нормах [7] коэффициент k_λ определяется по формуле

$$k_\lambda = \frac{1{,}5}{0{,}5 + \bar{\lambda}_{c,g}^2} \le 1{,}0, \tag{17}$$

в работе [12] на основании экспериментальных исследований предложено k_λ определять из выражения

$$k_\lambda = \frac{1}{\bar{\lambda}_{c,g}^{1,5}} \le 1{,}0. \tag{18}$$

В формулах (17) и (18) параметр $\bar{\lambda}_{c,g}$:

$$\bar{\lambda}_{c,g} = \sqrt{\frac{R_s}{\tau_{cr,g}}} \ . \qquad (19)$$

С применением коэффициентов (17) или (18) уравнение прочности стенки при действии касательных напряжений (1) превращается, по сути, в уравнение устойчивости или так называемой в литературе «устойчивой прочности». Такой подход имеет место в европейских нормах проектирования и позволяет одновременно с расчетом на прочность контролировать недопущение местной потери устойчивости.

Коэффициент (2), предложенный в работе [5] на основании результатов ряда конечно-элементных исследований в геометрически и физически нелинейной постановке, а также результатов натурных экспериментов, предполагает учитывать нелинейное поведение стенки вследствие ее кривизны и наличия начальных несовершенств, возникающих при изготовлении, транспортировании и монтаже. Сравнительный анализ показал, что (2) по своей сути схож с (18), (19) и предполагает несколько меньшие значения предельных касательных напряжений при параметрах гофрированных стенок $\lambda_w = 400...500$ в используемых конструкциях.

На практике рекомендуется принимать такие параметры гофрирования, при которых $\tau_{\text{р,cr}} > \tau_{\text{о,cr}}$. При этом должен использоваться коэффициент (2).

В заключение отметим, что предложенная методика расчета охватывает не только конструкции, применяемые в настоящее время в Европейском Союзе и в Украине, но и предполагает возможность использования конструкций с другими параметрами гофров, для которых методы, изложенные в европейских нормах [7], могут давать завышенные значения критических касательных напряжений [5, 11].

Литература

[1] Siokola, W. Wellstegträger. Herstellung und Anwendung von Trägern mit profilierten Steg. Stahlbau 66 (1997) Heft 9, S.595.

[2] ТУ У В.2.6-28.1-30653953-007:2007 Балки двутавровые гофрированные облегченные (гофро-балки). Рекомендации по проектированию (четвертая редакция). – Харьков: АО «Металлист СМК», 2008. – 97 с.

[3] ДБН В.1.1-12:2006 Будівництво у сейсмічних районах України. – К.: Мінбуд України, 2006.

[4] ДБН В.2.6-…:200… «Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу». – К.: Мінрегіонбуд України, 200*. (проект)

[5] *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.

[6] *Лазнюк М.В.* Численное моделирование балок с тонкими гофрированными стенками // Будівельні конструкції: Зб. наук. пр. – К.; НДІБК, 2003. – Вип. 58. – С. 64–68.

[7] EN 1993-1-5. October 2006. Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1.5: Plated structural elements.

[8] СНиП РК 5.04-23-2002 Стальные конструкции. – Астана: Комитет по делам строительства Министерства индустрии и торговли Республики Казахстан, 2003. – 118 с.

[9] СН РК 5.04-08-2004 Пособие по проектированию стальных конструкций. – Астана: Комитет по делам строительства и жилищно-коммунального хозяйства Министерства индустрии и торговли Республики Казахстан, 2005. – 144 с.

[10] *Остриков Г.М., Максимов Ю.С., Долинский В.В.* Исследование несущей способности стальных двутавровых балок с вертикально гофрированной стенкой // Строительная механика и расчет сооружений. – 1983. – № 1. – С. 66–70.

[11] *Максимов Ю.С., Остриков Г.М., Долинский В.В.* Устойчивость гофрированных стенок двутавровых балок // Строительная механика и расчет сооружений. – 1985. – № 6. – С. 43–45.

[12] Gutachterliche Stellungnahme zur Querkrafttragfähigkeit von Wellstegträgern; Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Pasternak, Braunschweig / Cottbus 1996.

[13] Corrugated web beam. Technical documentation. – Vienna: Zeman & Co Gesellschaft mbH, 1999. – 14 p.

[14] СНиП II-23-81* Стальные конструкции. Нормы проектирования /Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990.

Надійшла до редколегії 20.08.2008 р.