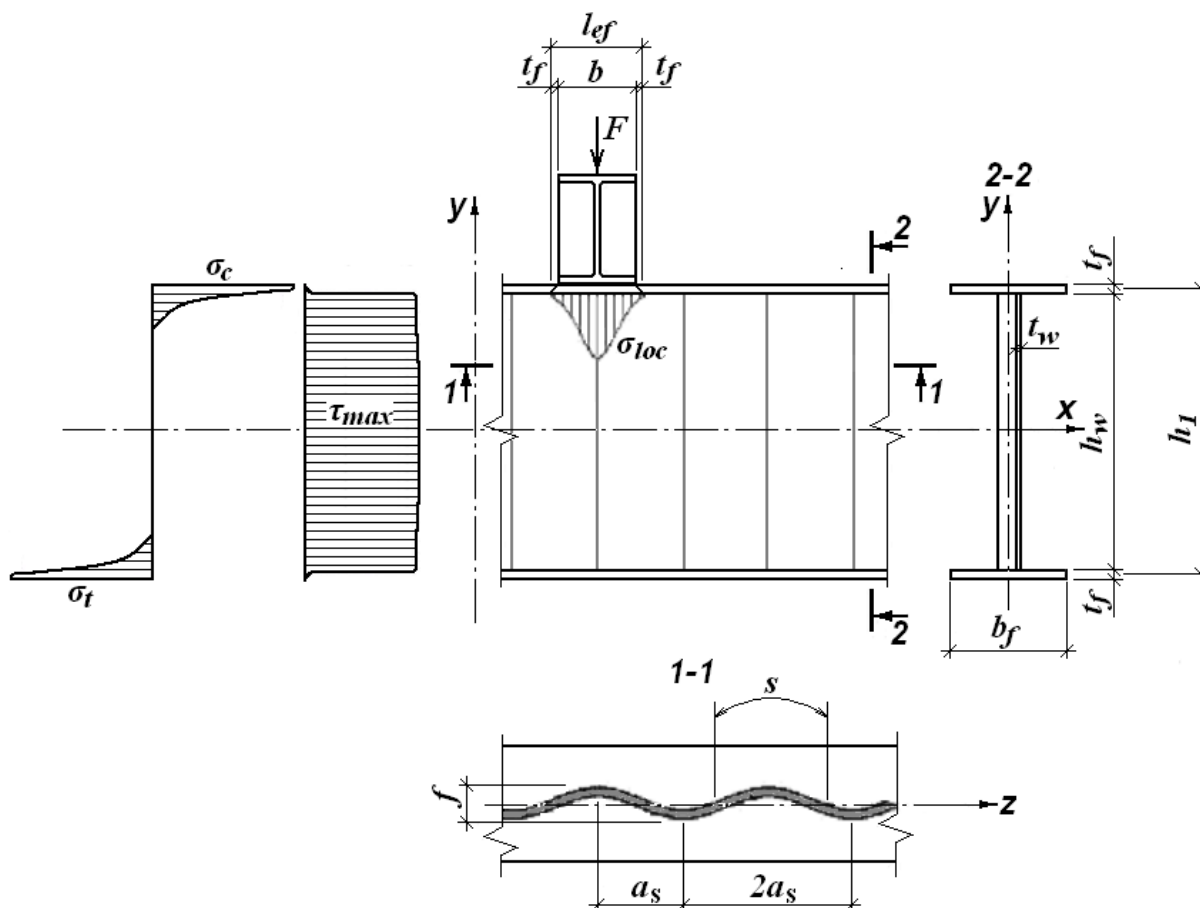


## 24 ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ЭЛЕМЕНТОВ ДВУТАВРОВОГО СЕЧЕНИЯ С ГОФРИРОВАННОЙ СТЕНКОЙ

### 24.1. Общие рекомендации

**24.1.1** В элементах сложного двутаврового сечения для повышения их стойкости и снижения металлоемкости используют поперечно гофрированные стенки. Поперечно гофрированные стенки могут состоять из трапецеидальных, треугольных или волнистых гофров. Дополнительные требования к проектированию разработаны для элементов с волнистой (синусоидальной) поперечно-гофрированной стенкой (рисунок 24.1).



**Рисунок 24.1** – Схема элемента с волнистой (синусоидальной) поперечно-гофрированной стенкой

Конструкции из двутавров с гофрированной стенкой, в том числе и бистальные, рекомендуется относить к 1-му классу согласно с 8.1 и рассчитывать, как правило, в пределах упругих деформаций.

Толщину гофрированных стенок рекомендуется принимать не меньше чем 1,5 мм.

Расчетными параметрами сложного двутаврового сечения с волнистой поперечно-гофрированной стенкой (рисунок 24.1) есть:

$a_s$  – шаг гофра;

$h_{ef}$  – расчетная высота стенки, которая равняется в сварных балках с гофрированной стенкой полной высоте стенки –  $h_w$ ;

$t_w$  – толщина гофрированной стенки;

$f$  – высота волны гофра;

$s$  – развернутая длина полуволны гофра  $s = a_s \left(1 + \pi^2 f^2 / 16a_s^2\right)$ .

Рекомендации к выбору параметров гофрированной стенки:

– гибкость гофрированных стенок рекомендуется принимать в пределах  $\lambda_w \leq 200 \dots 500$ ;

– условная гибкость панели гофра  $\bar{\lambda}_c = s/t_w \sqrt{R_y/E} \leq 2,3$ .

Параметры гофров, как правило, следует принимать такими, чтобы были обеспечены условия, при которых  $\tau_{p,cr} > \tau_{0,cr}$ ,

где  $\tau_{p,cr}$  – критические напряжения местной потери устойчивости гофрированной

стенки (панели гофра), которые определяются в соответствии с 24.3.8;

$\tau_{0,cr}$  – критические напряжения общей потери устойчивости гофрированной стенки, которые определяются в соответствии с 24.3.9.

Пояса рекомендуется исполнять одинакового поперечного сечения из листовой стали. При определенном обосновании сварные двутавры с гофрированной стенкой могут выполняться с одной вертикальной осью симметрии.

**24.1.2** Для поясов элементов двутаврового сечения с гофрированной стенкой следует применять стали в соответствии с таблицей В.5, для тонких гофриро-

ванных стенок – стали в соответствии с ГОСТ 16523.

**24.1.3** В сварных двутаврах с гофрированными стенками следует, как правило, применять односторонние поясные швы, которые исполняются автоматической (реже механизированной) сваркой в заводских условиях.

В местах приложения значительных сосредоточенных нагрузок от конструкций, лежащих выше или примыкающих снизу, в узлах крепления связей, распорок и других элементов, возле монтажных и опорных ребер рекомендуется применять двухсторонние поясные швы, выходящие за контуры прикрепляемого элемента (узла), на длину  $30k_f$  с каждой стороны, где  $k_f$  – катет поясного шва, примыкающего к стенке.

## **24.2 Расчет двутавров с гофрированной стенкой при центральном растяжении и сжатии**

**24.2.1** Расчет на прочность элементов при центральном растяжении или сжатии следует выполнять по формуле (5), принимая за  $A_n$  площадь нетто двух поясов двутавра с гофрированной стенкой  $A_n = A_{f1n} + A_{f2n}$ .

**24.2.2** Расчет на устойчивость элементов при центральном сжатии следует выполнять по формуле (7), принимая за  $A$  площадь брутто двух поясов двутавра с гофрированной стенкой  $A = A_{f1} + A_{f2}$ .

При расчете устойчивости элементов с гофрированной стенкой относительно оси  $y - y$  коэффициент  $\varphi$  определяется в зависимости от гибкости поясов двутавра  $\lambda_y = l_{ef} / i_f$ , где  $i_f$  – радиус инерции двух поясов.

Для несимметричных двутавров проверяется устойчивости каждого пояса в его плоскости отдельно.

При расчете устойчивости элементов с гофрированной стенкой относительно оси  $x - x$  коэффициент  $\varphi$  следует определять в зависимости от условной приведенной гибкости:

$$\bar{\lambda}_{ef} = \eta \lambda_x \sqrt{\frac{R_y}{E}} = \frac{\mu \eta l_x}{i_x} \sqrt{\frac{R_y}{E}}, \quad (24.1)$$

где коэффициент  $\eta$  учитывает влияние деформаций сдвига в тонкой волнистой гофрированной стенке. Для волнистых стенок:

$$\eta = \sqrt{1 + \frac{\pi^2 E}{\bar{G} A_w} \left( \frac{A_{f1} + A_{f2}}{\lambda_x^2} \right)}, \quad (24.2)$$

где  $\bar{G} A_w$  – приведенная жесткость элементов с гофрированной стенкой на сдвиг, учитывающая увеличение длины гофрированной стенки и рассчитываемая по формуле:

$$\bar{G} A_w = G h_w t_w \frac{a_s}{s}. \quad (24.3)$$

Радиусы инерции сечения симметричного двутавра с гофрированной стенкой рассчитываются по формулам  $i_x = 0,5h_1$ , где  $h_1 = h_w + t_f$  – расстояние между центрами тяжести поясов;  $i_y = 0,29b_f$ .

## 24.3 Расчет двутавров с гофрированной стенкой при изгибе

**24.3.1** Расчет на прочность балок с гофрированной стенкой симметричного относительно вертикальной оси сечения следует выполнять по формулам:

– при действии момента в одной из главных плоскостей

$$\frac{M_x}{A_{fn} h_1 R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (24.4)$$

где  $A_{fn}$  – меньшая площадь нетто из двух поясов двутавра;

– при действии в сечении поперечной силы

$$\frac{\tau_{xy}}{R_s \gamma_c} \leq 1, \quad (24.5)$$

где

$$\tau_{xy} = \frac{Q}{h_w t_w k_\lambda}, \quad (24.6)$$

тут  $k_\lambda = 1,085 - 0,008\bar{\lambda}_w$  (при  $k_\lambda > 1$  следует принимать  $k_\lambda = 1$ ),

$\bar{\lambda}_w$  – условная гибкость гофрированной стенки;

– при действии момента в двух главных плоскостях

$$\frac{M_x}{A_{fn} h_f R_y \gamma_c} \pm \frac{M_y}{I_{yfn} R_y \gamma_c} x \leq l, \quad (24.7)$$

где  $x$  – координата точки рассматриваемого сечения относительно его главной оси;

$I_{yfn}$  – сумма моментов инерции поясов нетто относительно оси  $y - y$ .

Если момент  $M_y$  действует в плоскости одного пояса, то следует считать, что он полностью воспринимается этим поясом.

В случае ослабления стенки отверстиями для болтов значения  $\tau_{xy}$  по формуле (24.6) следует умножать на коэффициент  $\alpha$ , который рассчитывается по формуле (45).

**24.3.2** Расчет на прочность стенки балки, не укрепленной ребрами жесткости, при действии местного напряжения  $\sigma_{loc}$  в местах приложения нагрузки к поясам, а также в опорных сечениях балки, следует выполнять в соответствии с 8.2.2.

**24.3.3** При проверке прочности гофрированной стенки должно выполняться требование по формуле (44), в которой допускается применять  $\sigma_x$  по формуле:

$$\sigma_x = \sigma_f \cdot \frac{a_s}{s} \cdot k_s. \quad (24.8)$$

где коэффициент  $k_s = 1 - \frac{\pi^2 f^2}{16a_s^2}$ ,

Тут  $\sigma_f$  – нормальные напряжения в соответствующем поясе.

Напряжения  $\sigma_{loc}$  и  $\tau_{xy}$  в формуле (44) следует определять в одной и той же точке балки.

**24.3.4** При расчете на устойчивость балок двутаврового сечения с гофриро-

ванными стенками, изгибающихся в плоскости стенки и удовлетворяющих условиям 24.3.1 и 24.3.3, следует выполнять проверку на устойчивость сжатых поясов по формуле:

$$\frac{N_f}{\varphi_f A_f R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (24.9)$$

где  $A_f$  – площадь брутто сжатого пояса;

$\varphi_f$  – коэффициент, который определяется по 7.1.3, как для центрально-сжатого стержня, в зависимости от  $\lambda = l_{ef} / i_f$ .

тут  $l_{ef}$  определяется по 8.4.2, а  $i_f$  – радиус инерции сечения сжатого пояса в горизонтальной плоскости.

Для сжатого пояса, выполненного из листовой стали, радиус инерции сечения вычисляется по формуле  $i_f = 0,29b_f$ ;  $N_f = M_1 / h_1$  – сила сжатия в поясе, где  $M_1$  – максимальный изгибающий момент в средней трети длины балки между точками раскрепления.

Устойчивость балок с гофрированной стенкой не нужно проверять, если выполняются условия в соответствии с 8.4.4, как для балок с плоской стенкой. При определении коэффициента  $\mu$  в соответствии с 8.4.4 и при расчете условной поперечной силы  $N$  в соответствии с 8.4.5 прилегающие участки стенок к сжатому поясу учитывать не нужно.

**24.3.5** При изгибе балок с гофрированными стенками в двух главных плоскостях расчет на устойчивость сжатого пояса следует выполнять по формуле:

$$\frac{N_f}{\varphi_e A_f R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (24.10)$$

где  $\varphi_e$  – коэффициент, который определяется в соответствии с таблицей Д.3, как для внецентренно-сжатого стержня, в зависимости от условной гибкости сжатого пояса  $\bar{\lambda}_x = (l_p / 0,29b_f) \sqrt{R_y / E}$  (тут  $l_p$  – расчетная длина пояса в его плоскости) и приведенного относительного эксцентриситета  $m_{ef} = \eta \cdot m$ ,

тут  $\eta$  - коэффициент влияния формы сечения, который принимается

$$\eta = 1;$$

$$m = \frac{6 \cdot M_y}{N_f \cdot b_f}. \quad (24.11)$$

**24.3.6** Устойчивость стенок балок с гофрированной стенкой следует считать обеспеченной, если выполнено условие:

$$\frac{1}{\gamma_c} \sqrt{\left(\frac{\sigma_{loc}}{\sigma_{loc,cr}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{xy}}{\tau_{cr}}\right)^2} \leq 1. \quad (24.12)$$

где  $\sigma_{loc}$  – местное напряжение в стенке от сосредоточенной нагрузки, которое следует определять в соответствии с 8.2.2;

$\sigma_{loc,cr}$  – критическое напряжение, рассчитываемое по формуле:

$$\sigma_{loc,cr} = \frac{0,8c_1 R_y}{\lambda_c^2}, \quad (24.13)$$

тут  $c_1$  – коэффициент, который определяется в соответствии с 24.3.7;

$\tau_{xy}$  – касательное напряжение, рассчитываемое в соответствии с формулой (24.6);

$\tau_{cr}$  – меньшее из значений критических напряжений местной  $\tau_{p,cr}$  и общей  $\tau_{0,cr}$  потери устойчивости гофрированной стенки, которые определяются в соответствии с 24.3.8 и 24.3.9.

**24.3.7** Для балок с гофрированной стенкой коэффициент  $c_1$  в формуле (24.13) принимается в соответствии с таблицей 24.1, в зависимости от соотношения  $s/h_w$  и значения  $\delta$ , которое рассчитывается по формуле (84).

**Таблица 24.1** Коэффициент  $c_1$

$\delta$	Значение $c_1$ для двутавров с гофрированными стенками при $s/h_w$ , равном				
	$\leq 0,1$	0,2	0,3	0,4	$\geq 0,5$
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
$\geq 6$	7,69	8,67	9,77	11,02	12,40

**24.3.8** Критическое напряжение местной потери устойчивости панели волнистой гофры  $\tau_{p,cr}$  рассчитывается по формуле:

$$\tau_{p,cr} = 1,12 \left( 5,34 + \frac{f \cdot s}{h_w \cdot t_w} \right) \frac{R_s}{\lambda_c^2}. \quad (24.14)$$

**24.3.9** Критическое напряжение общей потери устойчивости гофрированной стенки  $\tau_{0,cr}$  рассчитывается по формуле:

$$\tau_{0,cr} = 32,4 \frac{\sqrt[4]{D_1 D_2^3}}{h_w^2 t_w}, \quad (24.15)$$

где  $D_1$  и  $D_2$  – жесткости изгиба по главным направлениям, Н·мм, которые рассчитываются по формулам:

$$D_1 = \frac{Et_w^3}{12(1-\nu^2)} \frac{a_s}{s}; \quad D_2 = \frac{EJ}{a_s}, \quad (24.16)$$

где  $J$  – момент инерции гофра, длина которого равняется шагу гофров  $a_s$ .

**24.3.10** При проверке устойчивости гофрированной стенки по формуле (24.13) должны выполняться условия:

а) 
$$\frac{\sigma_{loc}}{\gamma_c \sigma_{loc,cr}} \leq 0,75, \quad (24.17)$$

б) величина эксцентриситета, с которым передается сосредоточенная нагрузка от элемента, находящегося выше, относительно продольной оси балки не должна превышать  $e \leq 0,5f$ .

**24.3.11** Гофрированные стенки следует подкреплять поперечными ребрами жесткости, если в местах приложения больших неподвижных сосредоточенных нагрузок и на опорах элементов с гофрированной стенкой не обеспечивается их прочность или устойчивость при проверке по формулам (46) и (24.12) соответственно. Геометрические характеристики ребер жесткости должны отвечать требованиям 8.5.9, а их расчет следует выполнять в соответствии с 8.5.10 и 8.5.17.

Проверку на устойчивость опорного ребра балки с гофрированной стенкой выполнять в соответствии с 8.5.17 без учета поддерживающего эффекта гофрированной стенки.



**24.3.12** Устойчивость сжатых поясов балок с гофрированной стенкой следует считать обеспеченной при выполнении условий 8.5.18 та 8.5.20. При вычислении отношения ширины сжатого пояса  $b_f$  к толщине  $t_f$  расчетную ширину свеса пояса  $b_{ef}$  следует принимать равной  $b_{ef} = 0,5 \cdot b_f$ .

Напряжение в сжатом поясе  $\sigma_c$  согласно с 8.5.18 следует определять по формулам:

$$\sigma_c = \frac{M}{A_{fn} h_1 \gamma_c} \text{ или } \sigma_c = \frac{M_x}{A_{fn} h_1 \gamma_c} + \frac{M_y}{W_{yfn} \gamma_c}, \quad (24.18)$$

где  $W_{yfn}$  – сумма моментов сопротивления поясов относительно оси  $y - y$ .

**24.3.13** Прогибы и перемещения элементов с гофрированными стенками не должны превышать предельных значений, установленных СП 20.13330.

Расчет прогибов балок с гофрированными стенками следует выполнять с учетом деформаций сдвига при условии равномерного распределения касательных напряжений по формуле:

$$f = \int \frac{\overline{M} M_e dx}{EI_f} + \int \frac{\overline{Q} Q_e dx}{\overline{G} A_w} \leq f_u, \quad (24.19)$$

где  $\overline{M}, M_e$  – изгибающие моменты соответственно от единичного усилия, действующего в направлении прогиба, и от эксплуатационной нагрузки,  $\overline{Q}, Q_e$  – поперечные силы соответственно от единичного усилия, действующего в направлении прогиба, и от эксплуатационной нагрузки;  $\overline{G} = \frac{G \cdot a_s}{s}$ .

В случае равномерно распределенной или близкой к такой нагрузке для однопролетной балки прогиб определяется по формуле:

$$f = \frac{5M_e \ell^2}{48EJ_f} + \frac{Q_e \ell}{4\overline{G} A_w} \leq f_u, \quad (24.20)$$

При расчетах стержневых конструкций двутаврового сечения с гофрированными стенками с использованием ЭВМ рекомендуется учитывать деформативность гофрированной стенки введением в исходные данные приведенной жесткости стержней на сдвиг, которая вычисляется по формуле (24.3)

## 24.4 Расчет двутавров с гофрированной стенкой на действие продольной силы и изгибающего момента

**24.4.3** Расчет на прочность внецентренно-сжатых и внецентренно-растянутых элементов с гофрированной стенкой следует выполнять по формуле:

$$\frac{N}{(A_{f1n} + A_{f2n})R_y\gamma_c} + \frac{M_x}{A_{fn}h_1R_y\gamma_c} \pm \frac{M_y}{I_{yfn}R_y\gamma_c} x \leq 1. \quad (24.2)$$

**24.4.4** Расчет устойчивости внецентрово-сжатых двутавров с гофрированной стенкой принято по методике сквозных стержней, так как стенка не принимает участия в работе на сжатие и изгиб, и выполняется по 9.3.2, где коэффициент  $\varphi_e$  определяется в зависимости от условной приведенной гибкости  $\bar{\lambda}_{ef}$  в соответствии с 24.2.2 и относительного эксцентриситета  $m = eA_f h_1 / I_f$ . Для симметричного сечения  $\bar{\lambda}_{ef}$  определяется по радиусу инерции  $i_x = 0,5h_1$ .

**24.4.5** Расчет устойчивости внецентренно-сжатых элементов двутаврового сечения с гофрированной стенкой из плоскости действия момента при изгибе в плоскости наибольшей жесткости ( $I_x > I_y$ ), которая совпадает с плоскостью симметрии, следует выполнять для каждого пояса отдельно, как для центрально-сжатого стержня в соответствии с формулой (5) на продольную силу, которая определяется с учетом дополнительного усилия от момента. Значение дополнительного усилия в поясе от момента определяется по формуле  $N_{ad} = M_x / h_1$ , где  $M_x$  – изгибающий момент, который принимается в соответствии с 9.2.3, как при расчете устойчивости внецентренно-сжатых стержней сквозного сечения.

**24.4.6** Расчет устойчивости внецентренно-сжатых элементов двутаврового сечения с гофрированной стенкой при сжатии и изгибе в двух плоскостях, и если плоскость наибольшей жесткости ( $I_x > I_y$ ) совпадает с плоскостью симметрии, следует выполнять:

- для стержня в целом – в плоскости наибольшей жесткости (в плоскости стенки) в соответствии с 24.4.4, принимая  $e = 0$ ;

- для поясов двутавра – как внецентально-сжатых элементов по формуле (109), при этом продольную силу следует определять с учетом усилия от момента  $M_x$  (в соответствии с 24.3.4), а момент  $M_y$  распределять между поясами двутавра пропорционально их жесткостям (если момент  $M_y$  действует в плоскости одного пояса, то следует считать, что он полностью воспринимается этим поясом).

Расчетную длину поясов в своей плоскости следует принимать по типу определения расчетной длины колонн с плоскости рамы в соответствии с 10.3.9.

**24.4.7** Расчет гофрированных стенок центрально-сжатых и внецентально-сжатых стержней следует выполнять на поперечную силу, которая равняется большому из двух значений: фактическую поперечную силу (для внецентально-сжатых стержней) или условную поперечную силу  $Q_{fic}$ , которая определяется в соответствии с 7.2.7.

**24.4.8** Для центрально-сжатых и внецентально-сжатых элементов двутаврового сечения с гофрированной стенкой параметры стенки следует принимать в соответствии с 24.1. Толщина гофрированной стенки определяется из условия прочности и устойчивости в соответствии с 24.4.7, а также технологическими соображениями.

**24.4.9** В центрально-сжатых и внецентально-сжатых элементах двутаврового сечения с гофрированной стенкой отношение ширины сжатого пояса  $b_f$  к толщине  $t_f$  следует принимать по указаниям 24.3.12, при этом определение напряжения в сжатом поясе  $\sigma_c$  в формуле (97) выполнять по формулам:

$$\sigma_c = \frac{N}{(A_{f1n} + A_{f2n})\gamma_c} \quad \text{или} \quad \sigma_c = \frac{N}{(A_{f1n} + A_{f2n})\gamma_c} + \frac{M_x}{A_{fn}h_I R_y \gamma_c} \pm \frac{M_y}{W_{yfn} R_y \gamma_c}. \quad (24.22)$$