

ОБ ОДНОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРОФИЛИРОВАННОГО ЛИСТА

В.Ф. Увакин

Институт техники, технологии и управления, г. Балаково, Россия

Известны стальные профилированные листы по ГОСТ 24045-94, выполненные с волнами гофр в виде трапеции только в одном направлении [1], которые применяются в качестве кровли и настилов стационарных и подвижных объектов, в строительстве для повышения жесткости кузовов самосвалов и т.д. Недостатком таких профилированных листов является большая изгибная жесткость в продольном направлении, а в поперечном направлении изгибная жесткость будет значительно меньше, чем у плоского листа, что ограничивает их несущую способность и область применения.

Известны тонкостенные гофрированные оболочки с наиболее технологичными периодическими волнами гофр близкими к синусоидальному профилю по двум ортогональным направлениям – продольном и поперечном [2].

При расчете профилированный лист можно рассматривать как конструктивно-ортотропную пластину той же толщины, упругие коэффициенты анизотропии материала которой на растяжение и изгиб с учетом двойной анизотропии свойств по каждому направлению – продольному и поперечному – определяются главным образом геометрией волн гофр по двум ортогональным направлениям, аналитические соотношения для которых K_1 и K_2 для трапециевидальной, треугольной и пологой синусоидальной формы профиля волн гофр приведены в работах [3], [4].

Для профилированного листа с волнами гофр пологого синусоидального профиля с глубиной волн гофр в продольном направлении $H_{пр}$ и поперечном направлении $H_{п}$ модули упругости анизотропного материала в продольном и поперечном направлениях на растяжение $E_{пр,р}$ и $E_{п,р}$ и на изгиб $E_{пр,и}$ и $E_{п,и}$ соответственно равны [3], [4]:

$$E_{np.p} = \frac{E}{K_{2n}}; \quad E_{n.p} = \frac{E}{K_{2np}}; \quad (1)$$

$$E_{np.и} = K_{2np} \cdot E; \quad E_{п.и} = K_{2п} \cdot E,$$

$$\text{где } K_{2np} = \frac{3}{2} \left(\frac{H_{np}}{h} \right)^2 + 1; \quad K_{2n} = \frac{3}{2} \left(\frac{H_n}{h} \right)^2 + 1; \quad (2)$$

$$K_{1np} = K_{1п} = 1$$

Из приведенных соотношений видно, что увеличение жесткости на изгиб в одном направлении приводит к такому же уменьшению жесткости на растяжение по другому ортогональному направлению.

При больших значениях относительной глубины волн гофр $\frac{H}{h}$ модули упругости на изгиб и растяжение анизотропного материала в продольном и поперечном направлениях могут отличаться от модуля упругости изотропного материала E в сотни и тысячи раз. Следовательно, изменяя относительную глубину волн гофр $\frac{H_{np}}{h}$ и $\frac{H_n}{h}$ можно в широких пределах целенаправленно изменять изгибную жесткость тонкого профилированного листа и соответственно уменьшать жесткость на растяжение по двум ортогональным направлениям листа, что позволяет резко уменьшить температурные напряжения в двухслойных элементах конструкций - профилированный лист с нанесенным на него слоем керамики или огнеупорной футеровки. Такие элементы конструкции необходимы для создания металлокерамических двигателей внутреннего сгорания, печей, дымовых труб.

Проведем сравнительный анализ по предельной равномерно распределенной нагрузке для профилированных в одном направлении листов по ГОСТ 24045-94, например, стального профилированного листа Н57-750-07, имеющего глубину волн гофр $H_r = 57$ мм, ширину $B = 750$ мм с четырьмя продольными волнами гофр длиной $l_r = 187,5$ мм, выполненного из листа толщиной 0,7 мм, удельная масса которого составляет $8,7$ кг/м². При длине листа (пролета) 3 м

допустимая равномерно распределенная нагрузка составляет $p_{max \Gamma} = 2,9 \text{ кН/м}^2$ [1].

Профилированный лист по патенту РФ № 2200807 «Гофрированная оболочка» выполнен с волнами гофр в продольном направлении с глубиной синусоидальных волн гофр $H_{пр} = 32 \text{ мм}$, длиной одной волны гофр $l_{пр} = 120 \text{ мм}$, числом волн гофр по ширине листа $n_{г.пр} = 8,5$, ширина листа $B = n_{г.пр} \cdot l_{пр} = 1020 \text{ мм}$, расстояние между осями балок составляет $B_{он} = B - \frac{l_{пр}}{2} = 960 \text{ мм}$.

Волны гофр синусоидального профиля в поперечном направлении листа выполнены глубиной $H_{п} = 24 \text{ мм}$ ($H_{пр} + H_{п} = 56 \text{ мм} < H_{г}$), с длиной одной волны гофр $l_{п} = 80 \text{ мм}$, числом волн гофр в поперечном направлении $n_{г.п} = 38,5$.

Длина профилированного листа $L_{г.п} \cdot n_{г.п} = 3080 \text{ мм}$, расстояние между поперечными опорами $L_{он} = L_{г.п} - \frac{l_{п}}{2} = 3040 \text{ мм}$. Профилированный лист выполнен из стального листа толщиной $h = 0,55 \text{ мм}$ с цинковым покрытием.

Условия пологого синусоидального профиля для выбранных параметров волн гофр $\frac{H_i}{l_i} \leq \frac{1}{8}$ в нашем случае не выполняются.

Коэффициенты анизотропии K_{1i} и K_{2i} для более крутых волн гофр ($H_i / l_i < 1$) определяются через полные эллиптические интегралы I и II рода ([3], с.418)

$$K_1 = \frac{2}{\pi \sqrt{1-a^2}} \cdot E_0; \quad (3)$$

$$K_2 = \frac{H^2}{h^2} \cdot \frac{2}{\pi \sqrt{1-a^2}} \cdot \left[\left(\frac{1}{a^2} - 1 \right) F_0 + \left(2 - \frac{1}{a^2} \right) E_0 \right] + \frac{2\sqrt{1-a^2}}{\pi} F_0, \quad (4)$$

где $F_0 = \int_0^{\pi/2} \frac{d\alpha}{\sqrt{1-a^2 \sin^2 \alpha}}$ и $E_0 = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-a^2 \sin^2 \alpha} d\alpha$ - полные эллиптические

интегралы I и II рода; $a = \frac{\pi H}{\sqrt{1 + \left(\frac{\pi H}{l}\right)^2}}$ - модуль эллиптических интегралов;

$\alpha = 2\pi \frac{x}{l}$ - аргумент; x -текущая координата синусоиды.

Подставив в выражения (3), (4) значения полных эллиптических интегралов в виде рядов [5] и проведя преобразования, получим

$$K_1 = \frac{1}{\sqrt{1-a^2}} \left[1 - \frac{a^2}{4} - \frac{3a^4}{64} - \frac{45a^6}{2304} \right]; \quad (5)$$

$$K_2 = \frac{H^2}{h^2} \cdot \frac{3}{2\sqrt{1-a^2}} \left[1 - \frac{3a^2}{8} - \frac{5a^4}{64} - \frac{35a^6}{384} \right] + \sqrt{1-a^2} \left[1 + \frac{a^2}{4} + \frac{9a^4}{64} + \frac{225a^6}{2304} \right]. \quad (6)$$

Последние отношения будут справедливы как для продольных, так и для поперечных волн гофр профилей, близких к синусоидальным.

Для заданных выше параметров волн гофр модули эллиптических интегралов для продольных волн гофр a_{np} и поперечных a_n равны

$$a_{np} = \frac{\frac{\pi H_{np}}{l_{np}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\pi H_{np}}{l_{np}}\right)^2}} = 0,64; \quad a_n = \frac{\frac{\pi H_n}{l_n}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\pi H_n}{l_n}\right)^2}} = 0,688$$

Подставляя полученные значения модулей эллиптических интегралов a_{np} и a_n в выражение (5), получим значения коэффициентов анизотропии для плоской анизотропной пластины толщиной h в продольном $K_{1np}=1,16$ и поперечном $K_{1n}=1,15$ направлениях.

Величины, обратные коэффициентам анизотропии K_{1np} и K_{1n} , определяют коэффициенты вытяжки при штамповке $m_{вт.пр.} = \frac{1}{K_{1np}} = 0,86$ и

$m_{em.n} = \frac{1}{K_{1n}} = 0,87$, которые намного больше допустимых значений для одно-
операционной вытяжки мягких сталей.

Подставляя значения a_{np} и $a_{п}$ глубин волн гофр H_{np} и $H_{п}$ в соотношение (6), получим значения коэффициентов анизотропии $K_{2np} = 5570$ и $K_{2п} = 3080$, которые показывают во сколько раз больше изгибная жесткость анизотропной пластины в продольном и поперечном направлениях по сравнению с жесткостью на изгиб изотропной пластины толщиной h , при этом жесткость на растяжение анизотропной пластины в поперечном направлении уменьшится в K_{2np} раз, а жесткость на растяжение в продольном направлении уменьшится в $K_{2п}$ раз.

Толщины эквивалентных по жесткости на изгиб изотропных плоских пластин в продольном $h_{э.пр}$ и поперечном $h_{э.п}$ равны:

$$h_{э.пр} = \sqrt[3]{K_{2np} h} = 9,7 \text{ мм}, \quad h_{э.п} = \sqrt[3]{K_{2п} h} = 8 \text{ мм}$$

В том случае, если профилированный лист прикрепить к балкам саморезами с гидроизолирующими шайбами, то можно для этого случая выбрать расчетную схему плоской пластины, с эквивалентной толщиной в продольном направлении изгиба $h_{э.пр}$ и в поперечном направлении $h_{э.п}$, защемленной по четырем сторонам. Наибольший прогиб в центре пластины $W_{max з}$ при $B_{оп} = 0,96$ м, давлении $p_{max} = 3 \cdot 10^4$ Па будет равен [6].

$$W_{max з} = \frac{\alpha_1 p_{max} B_{оп}^4}{E h_{э.п}^3} = 6,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 6,9 \text{ мм}, \quad (7)$$

где $\alpha_1 = 0,028$ - коэффициент, определяется по табл. 8 [6] по значению отношения $\frac{L_{он}}{B_{он}} = 3,17$.

Наибольший изгибающий момент $M_{x max}$ возникает по серединам больших сторон, т.е. в центре пластины.

$$M_{x max} = \beta_1 p_{max} B_{он}^3 = 2,2 \cdot 10^3 \text{ Нм}, \quad (8)$$

где β_1 – коэффициент, определяется по табл. 8 [6] по значению $\frac{L_{on}}{B_{on}} = 3,17$.

Максимальное изгибающее напряжение при продольном изгибе заземленной по четырем краям изотропной пластины толщиной $h_{э,пр}$ равно [6]

$$\sigma_{u\ max} = \frac{6M_{x\ max}}{B_{on} \cdot h_{э,пр}^2} = 1,48 \cdot 10^8 \text{ Па} = 148 \text{ МПа} \quad (9)$$

Учитывая, что радиус изгиба при нагрузке $p_{max} = 3 \cdot 10^4 \text{ Па}$ для профилированного листа с выбранными параметрами тот же самый, что и для плоского изотропного листа с эквивалентной толщиной $h_{э,пр}$, то в первом приближении с учетом того, что жесткость на растяжение анизотропной пластины уменьшилась в $K_{2п}$ раз, максимальное значение изгибающего напряжения в профилированном листе $\sigma_{и\ max,п.л.}$ будет равно

$$\sigma_{и\ max,п.л.} = \frac{\sigma_{u\ max}}{K_{2п}} \cdot \frac{H_{пр}}{h} = 5,4 \text{ МПа} \quad (10)$$

Проведенный анализ показал, что при допустимых значениях изгибных напряжений в металле предлагаемый профилированный лист с волнами гофр по двум ортогональным направлениям по сравнению с профилированным листом с волнами гофр только в одном направлении допускает в 10 раз большую равномерно распределенную нагрузку ($p_{max} = 30 \text{ кН/м}^2$ и $p_{max\ z} = 2,9 \text{ кН/м}^2$ соответственно) при меньшей на 25% удельной массе листа., что позволит использовать такие профилированные листы в качестве силовых элементов конструкций в теплоэнергетике, машиностроении (пластинчатые теплообменники ортотропно-сотовой конструкции), кораблестроении, авиации, ракетостроении, в сейсмостойких зданиях и сооружениях, в качестве поверхностных жестких пружин для защиты, например, атомных электростанций от падающих с неба объектов.

Литература

1. Бадьин Г.М., Заренков В.А., Иноземцев В.К. Справочник строителя-ремонтника. -М.: Ассоциация строительных вузов, 2000. – С.72-75.
2. Увакин В.Ф. Патент РФ №2200807 “Гофрированная оболочка”, Бюл. №8, 2003.
3. Андреева Л.Е. Упругие элементы приборов. – М.: Машгиз, 1962. – С.416-419.
4. Пономарев С.Д., Андреева Л.Е. Расчет упругих элементов машин и приборов. –М.: Машиностроение, 1980. – С.276.
5. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). -М.: Наука, 1974. – С.757.
6. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. –М.: Наука, 1974. – С.316-317.