

ТЕМА: «РАЗРАБОТКА, ИССЛЕДОВАНИЕ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И
ВНЕДРЕНИЕ ПРОФИЛИРОВАННЫХ ЛИСТОВ С
ПЕРИОДИЧЕСКИМИ ВОЛНАМИ ГОФР ПО ДВУМ
ОРТОГОНАЛЬНЫМ НАПРАВЛЕНИЯМ В РАЗЛИЧНЫХ
ОТРАСЛЯХ ПРОИЗВОДСТВА»

Проект № _____

2.1. ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ПРОФИЛИРОВАННЫХ ЛИСТОВ С ПЕРИОДИЧЕСКИМИ ВОЛНАМИ ГОФР ПО ДВУМ ОРТОГОНАЛЬНЫМ НАПРАВЛЕНИЯМ.

Известны профилированные листы в одном продольном направлении с профилем волн гофр близком к трапецеидальному (ГОСТ 24045-94), которые используются в качестве жесткой кровли, настилов, армирующих оболочек железобетонных плит, стеновых перегородок [1].

Недостатком таких профилированных листов является небольшая изгибная жесткость в поперечном направлении, которая значительно ниже жесткости на изгиб плоского листа той же толщины h , что приводит к снижению предельной равномерно распределенной нагрузки (давления) и ограничивает области применения, и большая жесткость на растяжение в продольном направлении, приводящая к большим термическим напряжениям в двухслойных конструкциях, например, армирующая оболочка-футеровка в камерах сгорания, печах, котлах, дымовых трубах, возникающих за счет термобиметаллического эффекта.

Этого недостатка не имеет профилированный лист с периодическими волнами гофр близкими к наиболее технологичному синусоидальному профилю в двух ортогональных направлениях по патенту РФ № 2200807 «Гофрированная оболочка», патентообладатель и автор изобретения – Увакин В.Ф. [2], разработчик данного проекта.

Сравнительный анализ по предельной равномерно распределенной нагрузке проведем для нескольких вариантов стального профилированного листа, например Н57-750-0,7 по ГОСТ 24045-94 с глубиной волны гофр $H_{г1}=57$ мм, шириной листа $B_1=750$ мм с четырьмя волнами гофр в продольном направлении, выполненного из листа толщиной $h=0,7$ мм, для которого при длине листа $L=3$ м предельно допустимая равномерно распределенная нагрузка $P_{л1}=2,9$ кН/м², удельная масса которого $m_{г1}$ составляет 8,7 кг/м².

По патенту РФ № 2200807 профилированный лист ПЛ-11 (Приложение 1) выполнен с глубиной волн гофр в продольном направлении $H_{гп1}=32$ мм, длиной одной волны гофр в продольном и поперечном направлениях $l_{гп1} = l_{п1} = 120$ мм, числом волн гофр по ширине листа $n_{гп1}=8,5$, ширина листа $B = n_{гп1} \cdot l_{гп1} = 1020$ мм, расстояние между осями продольных балок составляет $B_{он} = B - l_{гп1} / 2 = 960$ мм.

Волны гофр профиля близкого к синусоидальному в поперечном направлении листа выполнены с глубиной $H_{п1}=24$ мм ($H_{гп1} + H_{п1} < H_{г1}$), с числом волн гофр в поперечном направлении $n_{п1}=25,5$.

Длина профилированного листа $L = l_{п1} \cdot n_{п1} = 3060$ мм, расстояние между поперечными опорами $L_{он} = L - l_{п1} / 2 = 3000$ мм. Профилированный лист выполнен из стального листа толщиной $h=0,55$ мм с цинковым покрытием.

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 – опреде-

ляются главным образом геометрией волн гофр по двум ортогональным направлениям, аналитические соотношения для которых K_{1i} и K_{2i} 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].

$$E_{пр.р} = \frac{E}{K_{2п}}; \quad E_{п.р} = \frac{E}{K_{2пр}}; \quad (1)$$

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

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

$$K_{1пр} = K_{1п} = 1$$

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 $\frac{H_{пр}}{h}$ и $\frac{H_{п}}{h}$ 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.

Условия пологого синусоидального профиля для выбранных параметров волн гофр $\frac{H_i}{l_i} \leq \frac{1}{8}$ в нашем случае не выполняются [3], поэтому расчет проведем в соответствии с работой [5].

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

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

Полные эллиптические интегралы I и II рода можно представить в виде рядов [5]

$$F_0 = \int_0^{\pi/2} \frac{d\alpha}{\sqrt{1-a^2 \sin^2 \alpha}} = \frac{\pi}{2} \left[1 + \left(\frac{1}{2} \right)^2 \cdot a^2 + \left(\frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4} \right)^2 \cdot a^4 + \left(\frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6} \right)^2 \cdot a^6 \dots \right]; \quad (5)$$

$$E_0 = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-a^2 \sin^2 \alpha} d\alpha = \frac{\pi}{2} \left[1 - \left(\frac{1}{2} \right)^2 \cdot a^2 - \left(\frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4} \right)^2 \cdot \frac{a^4}{3} - \left(\frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6} \right)^2 \cdot \frac{a^6}{5} \dots \right]. \quad (6)$$

Подставив значения полных эллиптических интегралов (5), (6) в выражения (3), (4) для коэффициентов K_1 и K_2 , получим

$$K_1 = \frac{1}{\sqrt{1-a^2}} \left[1 - \frac{a^2}{4} - \frac{3a^4}{64} - \frac{45a^6}{2304} \dots \right], \quad (7)$$

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

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

Для заданных выше параметров волн гофр рассматриваемого варианта профилированного листа модуль эллиптических интегралов для продольных волн гофр $a_{пр}=0,64$, для поперечных $a_{п}=0,525$.

Подставляя полученные значения модулей эллиптических интегралов $a_{пр}$ и $a_{п}$ в выражение (7), получим значения коэффициентов анизотропии для плоской анизотропной пластины толщиной h в продольном $K_{1пр}=1,16$ и поперечном $K_{1п}=1,04$ направлениях.

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

$m_{em.n} = \frac{1}{K_{1n}} = 0,97$, которые намного больше допустимых значений для одно-
операционной вытяжки мягких сталей [7].

Подставляя значения a_{np} и a_n и глубин волн гофр H_{np} и H_n в соотношение (8), получим значения коэффициентов анизотропии $K_{2np} = 5499$ и $K_{2n} = 2983$, 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_1 , 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_{2n} раз.

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

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

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 $h_{э,п}$, заземленной по четырем сторонам. Наибольший прогиб в центре пластины W_m при $B_{оп}=0,96$ м, давлении $P_m = 3 \cdot 10^4$ Па будет равен [8].

$$W_{mз} = \frac{\alpha_1 P_m B_{он}^4}{E h_{эп}^3} = 7,2 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 7,2 \text{ мм}, \quad (9)$$

где $\alpha_1 = 0,028$ - коэффициент, определяется по табл. 8 [8] по значению отношения $\frac{L_{он}}{B_{он}} = 3,125$.

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

$$M_{xm} = \beta_1 P_m B_{он}^3 = 2,2 \cdot 10^3 \text{ Нм}, \quad (10)$$

где $\beta_1 = 0,0831$ - коэффициент, определяется по табл. 8 [8] по значению $\frac{L_{он}}{B_{он}} = 3,125$.

Максимальное изгибающее напряжение при продольном изгибе заземленной по четырем краям изотропной пластины толщиной $h_{э,пр}$ равно [8]

$$\sigma_{um} = \frac{6M_{xm}}{B_{он} \cdot h_{э,пр}^2} = 148 \text{ МПа} \quad (11)$$

Учитывая, что радиус изгиба при нагрузке $P_m = 3 \cdot 10^4$ 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 уменьши-

лась в K_{2n} раз, максимальное значение изгибающего напряжения в профилированном листе $\sigma_{и.м.п.л.}$ будет равно

$$\sigma_{umn.l.} = \frac{\sigma_{um}}{K_{2n}} \cdot \frac{H_{np}}{h} = 2,8 \text{ МПа} \quad (12)$$

Проведенный анализ показал, что при допустимых значениях изгибных напряжений в металле предлагаемый профилированный лист с периодическими синусоидальными профилями волн гофр по двум ортогональным направлениям по варианту 1 по сравнению с профилированным листом с волнами гофр только в одном направлении (Н57-750-0,7 ГОСТ 24045-94) допускает в 10 раз большую равномерно распределенную нагрузку ($P_m = 30 \text{ кН/м}^2$ и $P_{1r} = 2,9 \text{ кН/м}^2$ соответственно) при меньшей на 25% удельной массе предлагаемого профилированного листа.

По технологическим соображениям синусоидальные профили продольных и поперечных волн гофр выбираем подобными, поэтому модули эллиптических интегралов $a_{при} = a_{пр1}$, $a_{пи} = a_{п}$; $K_{1при} = K_{1пр}$; $K_{1пи} = K_{1п}$ и коэффициенты вытяжки при штамповке профилированных листов по другим трем вариантам будут теми же самыми, что и по приведенному варианту.

В таблице приведены расчетные данные трех вариантов профилированных листов по патенту РФ № 2200807 с суммарной глубиной волн гофр, соответствующих глубинам только продольных волн гофр профилированных листов по ГОСТ 24045-94.

В качестве одного из вариантов предлагаемого профилированного листа рассмотрим лист с размерами в плане $6 \times 3 \text{ м}$, который можно получить из листов ПЛ-13 путем шовной контактной сварки с глубиной продольных волн гофр $H_{пр13} = 80 \text{ мм}$, шагом $l_{пр13} = 300 \text{ мм}$, глубиной поперечных волн гофр $H_{п13} = 60 \text{ мм}$, шагом $l_{п13} = 300 \text{ мм}$, толщиной $h_{13} = 0,8 \text{ мм}$ и массой 135 кг .

Проведем сравнительный анализ технических характеристик предлагаемого сварного профилированного листа и плиты железобетонной ребристой предварительно напряженной с близкими размерами в плане, высотой 300 мм , предназначенной для покрытия производственных зданий, например, ПГ-6АШвТ, арматура которой выполнена по классу А-IV, термически упрочненная (А-Шв), натяжение арматуры электротермическое, разработанную ЦНИИЖБ и НИИ-СКА.

Размеры плиты в плане 5970×2980 , марка бетона 400, объем бетона $1,07 \text{ м}^3$, масса плиты $m_{пл} = 2650 \text{ кг}$, масса стальной арматуры $m_{ст} = 260 \text{ кг}$, допустимая нагрузка $P_{пл} = 6 \text{ кН/м}^2$.

Модули эллиптических интегралов $a_{пр13} = a_{пр}$, $a_{п13} = a_{п}$; и коэффициенты анизотропии останутся во всех трех вариантах профилированных листов одинаковыми, то есть выполняется условие: $K_{1пр13} = K_{1пр}$; $K_{1п13} = K_{1п}$.

Подставляя значения модулей эллиптических интегралов $a_{пр13}$, $a_{п13}$ и глубин волн гофр $H_{пр13}$, $H_{п13}$ в формулу (8), получим следующие значения коэффициентов анизотропии $K_{2пр13} = 15000$ и $K_{2п13} = 8440$.

Эквивалентные по изгибной жесткости профилированного листа толщины плоских изотропных пластин в продольном и поперечном направлениях $h_{э,пр13}$ и $h_{э,п13}$ равны

$$h_{э,пр13} = \sqrt[3]{K_{2пр13}} \cdot h_{13} = 19,7 \text{ мм}, \quad h_{э,п13} = \sqrt[3]{K_{2п13}} \cdot h_{13} = 16,2 \text{ мм}$$

Для случая защемленной по четырем краям изотропной пластины толщиной $h_{э,п13}$, шириной $B_{оп13}=3$ м, длиной $L_{оп13}=6$ м наибольший прогиб $W_{mэ13}$ будет в центре пластины и при $P_{m13}=P_{пл}=6$ кН/м² по формуле (9) равен

$$W_{mэ13} = \frac{\alpha_1 P_{m13} B_{оп13}^4}{E h_{э,п13}^3} = 1,6 \cdot 10^{-2} \text{ м},$$

где $\alpha_1=0,0277$ при $\frac{L_{оп13}}{B_{оп13}} = 2$ по табл. 8 [8].

Наибольший изгибающий момент возникает по серединам больших сторон определяется по формуле (10)

$$M_{xm13} = \beta_1 P_{m13} B_{оп13}^3 = 1,34 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где $\beta_1=0,0829$ при $\frac{L_{оп13}}{B_{оп13}} = 2$ по табл. 8 [8].

Максимальное изгибающее напряжение при продольном изгибе защемленной по четырем краям изотропной пластины толщиной $h_{э,пр13}=21$ мм

$$\text{равно } \sigma_{um13} = \frac{6 M_{xm13}}{B_{оп13} \cdot h_{э,пр13}^2} = 34 \text{ МПа}.$$

С учетом того, что модуль упругости на растяжение в продольном направлении профилированного листа $E_{р,пр13} = \frac{E}{K_{2п13}}$, то максимальное значение изгибающего напряжения будет значительно меньше $\sigma_{u m13}$.

Предлагаемый профилированный лист по патенту РФ № 2200807 с размерами $6 \times 3 \times 0,14$ м и толщиной $h_{13}=0,8$ мм по сравнению с плитой железобетонной ребристой предварительно напряженной для покрытия производственных зданий ПГ-6АШВТ с размерами $6 \times 3 \times 0,3$ м при той же самой допустимой равномерно распределенной нагрузке $P_{m13}=6$ кН/м² при допустимом значении прогиба в центре листа $W_{mэ13}=16$ мм имеет массу в 19,6 раз меньшую массы плиты $m_{пл}$ и в 1,9 раза меньшую массу по сравнению с массой стальной арматуры плиты $m_{ст}$.

Приведенный сравнительный анализ вариантов профилированных листов с периодическими синусоидальными волнами гофр по двум ортогональным направлениям по патенту РФ № 2200807 (чертежи профилированных листов ПЛ-01, ПЛ-11 и ПЛ-12, ПЛ-13, приложение 1) и профилированных листов с волнами гофр только в продольном направлении С44-1000-0,8, Н57-750-0,7, Н114-750-0,8 показал:

1. Профилированные листы ПЛ-01, ПЛ-11 и ПЛ-12 с суммарной глубиной продольных и поперечных волн гофр, не превышающей глубину продольных

волн гофр у профилированных листов С44-1000-0,8, Н57-750-0,7 и Н114-750-0,8 по ГОСТ 24045-94 при меньшей толщине допускают в 10 раз большую равномерно распределенную нагрузку по сравнению с известными профилированными листами.

2. Уменьшение жесткости профилированных листов ПЛ-01, ПЛ-11, ПЛ-12, ПЛ-13 на растяжение в продольном и поперечном направлениях в тысячи раз, резко снижает температурные напряжения в композиционных конструкциях металл-керамика, металл-футеровка, металл-бетон, что весьма существенно для печей, камер сгорания, дымовых труб, тепловых экранов и т.д.

3. Сварной профилированный лист с размерами в плане 6x3 м на базе листа ПЛ-13 с суммарной глубиной продольных и поперечных волн гофр $H_{\Sigma} = 140$ мм и большой изгибной жесткостью по двум ортогональным направлениям может быть использован для покрытия производственных зданий и сооружений и при необходимости сверху может быть заполнен легким бетоном.

4. Предлагаемые профилированные листы являются жесткой поверхностной пружиной и являются амортизаторами для нагрузки, позволяют повысить сейсмостойкость зданий и сооружений.

5. При выполнении жесткой кровли из профилированных листов уклон крыши должен быть $23^{\circ} \dots 25^{\circ}$, а соединение смежных листов в продольном и поперечном направлениях должно производиться внахлестку с перекрытием на 0,5 шага волн гофр.

6. Расчетные значения коэффициентов теплопроводности $\lambda_{\text{п}}$ в поперечном направлении профилированных листов не превышают 0,4Вт/мК, что значительно меньше, чем у кирпича и бетона. В случае выполнения профилированных листов из нержавеющей стали с $\lambda_{\text{ст.н}} = 15$ Вт/мК соответствующие коэффициенты теплопроводности уменьшаются в 4 раза.

7. Профилированные листы, выполненные из стеклопластиков толщиной в 1...1,5 мм для стен и перегородок, обладают высокими теплоизоляционными свойствами.

8. Предлагаемые профилированные листы могут быть отштампованы на прессах двухкровошипных закрытых простого действия модели КБ3537 с номинальным усилием $P_{\text{н}} = 500$ т.с. [9].

9. Области применения предлагаемых профилированных листов: в строительных конструкциях, в том числе и в сейсмостойких зданиях и сооружениях [10], [11]; в машиностроении и судостроении – для двухконтурных скоростных теплообменников для мощных дизелей [12]; в теплоэнергетике – в печах, в том числе и во вращающихся [13]; в дымовых трубах [14], в котельных установках, в самолето- и ракетостроении – для ортотропно-сотовых пространственных конструкций с малой плотностью; в приборостроении [15].

10. Возможность создания жестких на изгиб ортотропно-сотовых сварных конструкций с плотностью ρ менее 60 кг/м^3 .

2.4. ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ТОНКОСТЕННЫХ ПРОФИЛИРОВАННЫХ ЛИСТОВ.

При толщине профилированных листов 0,55...0,9 мм с периодическими волнами гофр по двум ортогональным направлениям предъявляются высокие требования к коррозионной стойкости материала листов.

Эта задача может быть решена двумя путями: использованием в качестве материала профилированных листов коррозионно-стойких сталей и не коррозионно-стойких сталей с коррозионно-стойкими покрытиями.

Из коррозионно-стойких сталей целесообразно использовать наиболее дешевые безникелевые стали типа 12Х13 ГОСТ 5632-72, предел прочности которой $\sigma_{\sigma} = 588$ МПа, предел текучести $\sigma_T = 415$ МПа, относительное удлинение $\delta = 20\%$, ударная вязкость $a_K = 882$ кДж/м², а также безникелевую сталь, разработанную ЦНИИТМАШ, технология изготовления и состав которой запатентованы в ряде зарубежных стран, которая имеет повышенные прочностные свойства - $\sigma_{\sigma} = 450...550$ МПа, предел текучести $\sigma_T = 250...350$ МПа, относительное удлинение $\delta = 20...35\%$, относительное сужение $\Psi = 55\%$ [16].

Представляет интерес коррозионно-стойкая жаропрочная углеродистая сталь по патенту РФ № 2082812, содержащая С=0...0,7%, Si=0,13...0,37%, Mn=0,9...1,2%, Ti=0,02...0,07%, в которой отсутствуют дефицитные компоненты [17].

Все коррозионно-стойкие стали предназначены для изготовления профилированных листов для наиболее ответственных элементов конструкций зданий и сооружений с большим ресурсом – плит перекрытий.

В случае выполнения профилированных листов из атмосферокоррозионно-стойких низколегированных сталей с хорошей адгезией лакокрасочных покрытий, что в свою очередь продляет в 1,5...2,0 раза сроки службы искусственных покрытий, например, из стали 15ХСНД с пределом прочности $\sigma_{\sigma} = 490$ МПа, предел текучести $\sigma_T = 343$ МПа, относительное удлинение $\delta = 21\%$ рекомендуется применять следующие покрытия, которые по долговечности можно расположить в следующей последовательности:

1. Покрытие профилированных листов полиуретановым эластомером обеспечивает устойчивость на воздухе при 65 °С – 100 лет, скорость деградации покрытия от погодных воздействий 0,25 мм за несколько десятилетий [18].

2. Технология цинкования фирмы ZINCA METALL позволяет на десятилетия лет уберечь профилированные листы от коррозии. Покрытие можно наносить напылением, валиком или кистью. При этом металл не обязательно пескоструить, если слой ржавчины не слишком глубок. Покрытие можно использовать в качестве грунтовки под окраску, что увеличивает срок службы еще в 2,0...2,5 раза [20].

3. Покрытие антикоррозионно-стойкой эмалью (ЭМАКС) Казанской фирмы ТИМ-СФЕРА, предохраняющее металл, дерево, бетон от воды, щелочей, кислот (кроме серной) и органических растворителей. Эмаль эластична,

обладает высокой адгезией, 25 лет выдерживает перепад температур от -70 до $+300^{\circ}\text{C}$, при которых покрытия из обычных эмалей трескаются и теряют герметичность [19].

4. Обработка профилированных листов поверхностно-активными веществами (ПАВ), при которой молекулы ПАВ сорбируются поверхностями металла, формируя на поверхностях листа очень тонкий ($10\dots 20$ мкм), но ровный и плотный гидрофобный слой, препятствующий проникновению кислорода и других газов внутрь листа, надежно защищая его от коррозии. Способ защиты от коррозии разработан научным центром «Износостойкость» Московского энергетического института и внедряется для защиты от коррозии и различных отложений трубчатых и пластинчатых теплообменников энергетических объектов и труб жилищно-коммунального хозяйства [21].

5. На Московском предприятии ООО «МАТЕК» создано новое средство защиты от коррозии – грунт-протектор «жидкий цинк» АК-100. Грунт-протектор коррозии (ГПК), нанесенный на стальную поверхность образует покрытие с высоким содержанием цинка, который является анодом по отношению к стали, обеспечивает эффективную протекторную защиту металла от коррозии и при двух-трехслойном покрытии увеличивает срок службы до 10-15 лет.

Ни в чем не уступая по своим характеристикам зарубежным протекторам, отечественная новинка в несколько раз дешевле по стоимости. Нанесение жидкого цинка на подготовленную поверхность металла может осуществляться различными способами – с помощью пневматического распыления, кистью или валиком в диапазоне температур окружающего воздуха от -15°C до $+40^{\circ}\text{C}$. Расход ГПК на один слой составляет от 110 до 160 г/м² и зависит от способа нанесения покрытия. После высыхания покрытие образует довольно прочную матовую пленку серого цвета толщиной 30...50 мкм с содержанием цинка до 92...96%. Покрытие отличается высокой водостойкостью и стойкостью к воздействиям химических сред.

Этот способ холодного цинкования металлической поверхности в отличие от известного метода горячей оцинковки не требует дополнительных сложных трудоемких операций термической подготовки материала, упрощается процесс сушки обработанной поверхности.

Для обеспечения высокого качества работ и достижения максимального срока службы покрытия ГПК необходима тщательная подготовка поверхности перед проведением окрасочных работ ([5], с.40...42).

Для защиты металла профилированных листов от коррозии возможно сочетание нескольких из приведенных способов защиты, что увеличит их долговечность до 40...70 лет.

2.3. РАСЧЕТ ТЕХНИКО–ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЕКТА № _____ ПО ТЕМЕ «РАЗРАБОТКА, ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И ВНЕДРЕНИЕ ПРОФИЛИРОВАННЫХ ЛИСТОВ С ПЕРИОДИЧЕСКИМИ ВОЛНАМИ ГОФР ПО ДВУМ ОРТОГОНАЛЬНЫМ НАПРАВЛЕНИЯМ В РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ ПРОИЗВОДСТВА»

В разделе проекта «Обоснование целесообразности производства профилированных листов с периодическими волнами гофр по двум ортогональным направлениям» по патенту РФ № 2200807 «Гофрированная оболочка» показано, что при той же суммарной глубине волн гофр, что и у профилированных листов по ГОСТ 24045-94 предлагаемые профилированные листы допускают в 10 раз большую предельную равномерно распределенную нагрузку (см. таблицу). Поэтому для сравнительного анализа технических характеристик известных профилированных листов с предлагаемыми профилированными листами выбираем профилированный лист Н114-750-1,0 для которого глубина продольных волн гофр $H_{г1пр}=114$ мм и предельная равномерно распределенная нагрузка составляет $p_{г1}=7,33$ кН/м² [1] и при толщине листа $h_{г1}=0,8$ мм удельная масса $m_{г1}=12,5$ кг/м².

Технико-экономическую эффективность проекта № _____ определим из условия равенства или превышения предельной равномерно распределенной допустимой нагрузки $p_{г1}=7,33$ кН/м² для предлагаемых профилированных листов, технические характеристики которых приведены в таблице. Так, например, профилированный стальной лист НГ2-26-18-960-1344-0,55 толщиной $h=0,55$ мм имеет предельную равномерно распределенную нагрузку $p_{нр2}=10$ кН/м², значительно превышающую нагрузку $p_{г1}$.

Экономический эффект от внедрения профилированных листов по патенту РФ № 2200807 «Гофрированная оболочка» взамен профилированных листов с волнами гофр только в одном направлении определяется экономией материала на изготовление 1 м² листа (удельной массы листа m) при сохранении тех же функциональных возможностей в строительной конструкции или оборудовании, т.е. способности нести заданную нагрузку.

При годовом производстве профилированных листов $S_r=100000$ м² экономический эффект составит

$$\mathcal{E}_r = S_r \cdot (m_{г1} - m_{г2}) \cdot C_1 = 29,2 \text{ млн. руб.},$$

где $m_{г2}=5,2$ кг/м² – удельная масса профилированного листа НГ2-28-18-960-1344-0,55; C_1 – стоимость 1 кг листа в зависимости от марки стали составляет 30-120 рублей, в качестве расчетной величины принимаем $C_1=40$ руб./кг.

При одной и той же несущей способности по нагрузке и примерно равных производственных затратах на изготовление 1 м² профилированных листов с волнами гофр только в продольном направлении (по ГОСТ 24045-94) и с волнами гофр в двух ортогональных направлениях (по патенту РФ № 2200807) (штамповка, прокатка) экономический эффект будет примерно равен стоимости сэкономленного металла.

Таблица

Предельная равномерно распределенная нагрузка P_m для различных профилированных листов с периодическими синусоидальными волнами гофр по двум ортогональным направлениям, заземленных по четырем краям (патент РФ № 2200807).

Марка профилированных листов, № чертежа, аналог	Размеры листа $B \times L$, мм	Толщина заготовки листа h , мм	Расстояние между продольными опорами $B_{оп}$, мм	Расстояние между поперечными опорами $L_{оп}$, мм	Длина волн гофр в продольном и поперечном направлениях $l_{пр}$, мм	Плотность ортотропной конструкции ρ , кг/м ³	Удельная масса листа m , кг/м ²	Предельная равномерно распределенная нагрузка P_m , кН/м ²
НГ2-26-18-960-1344-0,55 (ПЛ-01) С44-1000-0,8	1008x1392	0,55	960	1344	96	118	5,2	10
НГ2-32-24-960-1320-0,55 (ПЛ-11) Н57-750-0,7	1020x1380	0,55	960	1320	120	93	5,2	30
НГ2-64-48-960-1440-0,7 (ПЛ-12) Н114-750-0,8	1080x1560	0,7	960	1440	240	60	6,6	70
НГ2-80-60-1200-1500-0,9 (ПЛ-13)	1350x1650	0,8	1200	1500	300	54	7,5	100

Примечание: Первые буквы НГ и цифра 2 в обозначении марки профилированного листа обозначают профилированный лист с гофрами в продольном и поперечном направлениях, последующие цифры – глубину волн гофр в продольном и поперечном направлениях, последующие 3-4 цифры – расстояние между осями продольных и поперечных опор, последняя цифра – толщина заготовки листа (мм).