

К УСТАНОВЛЕНИЮ ОСОБЕННОСТЕЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТРЕХСЛОЙНОЙ ЭФФЕКТИВНОЙ ПАНЕЛИ

Бабаев В.Н., Шмуклер В.С., Резник П.А., Петрова Е.А.

Харьковский национальный университет городского хозяйства
имени А.Н. Бекетова
г. Харьков, Украина

АННОТАЦИЯ: В статье предложены новые конструктивные решения трехслойных сэндвич-панелей с армирующими элементами из просечно-вытяжного листа. Показано, что динамические характеристики панелей нового типа улучшены по сравнению с существующими, а панель может использоваться для применения на объектах, расположенных в зонах с сейсмической ответственностью.

АННОТАЦІЯ: У статті запропоновані нові конструктивні рішення тришарових сендвіч-панелей з армуючими елементами з просічно-втяжного листа. Показано, що динамічні характеристики панелей нового типу поліпшені в порівнянні з існуючими, а панель може використовуватися для застосування на об'єктах, розташованих в зонах з сейсмічної відповідальністю.

ABSTRACT: New designs of three-layer sandwich panels with reinforcing elements of expanded metal are proposed. It is shown that the dynamic characteristics of a new type of panels are improved comparably with existing ones and the panel can be used for application on objects located in areas with seismic liability.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сэндвич-панель, напряженно-деформированное состояние (НДС), просечно-вытяжной лист (ПВЛ), сейсмическое воздействие, потенциальная энергия деформации (ПЭД).

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

В современной строительной отрасли широкое распространение получили многочисленные строительные конструктивы, которые отличаются высокой степенью заводской готовности, малым весом и простотой монтажа. К таким конструктивам, несомненно, следует отнести и трехслойные сэндвич-панели, которые преимущественно используются в качестве стеновых ограждений, реже - в виде покрытий зданий и сооружений различного назначения. Популярный в Украине и за ее пределами трехслойный конструктив – это многослойная панель типа сэндвич, которая состоит из двух металлических обшивок и облегченного среднего слоя. Наружные слои наиболее часто представлены плоскими, профилированными или гофрированными листами из стали или алюминия. Средний слой выполняется из легких пенополистиролов или ориентированной минеральной ваты. Благодаря применению высокопрочных полиуретановых клеев осуществляется объединение элементов конструктива в цельный сэндвич и обеспечивается их совместная работа.

Особым требованием к рассматриваемым конструкциям, с учетом ограничений национальных и международных нормативных баз, является необходимость использования их для строительства зданий и сооружений, расположенных в сейсмозонах. Анализ конструктивных решений трехслойных панелей показывает, что жесткостные характеристики этого конструктива существенным образом зависят от жесткости среднего слоя. Интегрируя сказанное, можно заключить, что повышение жесткости панели без существенного увеличения ее веса представляется актуальной и своевременной задачей.

Следует отметить, что востребованная в настоящее время сэндвич-панель не имеет внутренних ребер или каких-либо каркасов, а, значит, является наиболее удобной в технологическом плане. Однако, как было отмечено ранее, данное обстоятельство предопределяет повышенные требования к материалу среднего слоя. Так, имеющиеся на сегодняшний день отечественные и зарубежные исследования [1, 2], в том числе ряд экспериментальных исследований [3, 4], проведенный авторами данной работы, подтверждают, что выгодные с экономической точки зрения легкие утеплители, применяемые в сэндвич-панелях, отличаются пониженными физико-механическими характеристиками, что отражается в повышенной деформативности и пониженной несущей способности панелей. В свою очередь, применение более жестких утеплителей, таких как экструдированный пенополистирол или пенополиуретан, ведет к непосредственному удорожанию конструкции. Наиболее целесообразным является создание некой «low cost» конструкции, в которой используется

недорогой утеплитель, сочетающий хорошие теплозвукоизоляционные, жесткостные и прочностные характеристики. Кроме того, перспективным считается создание универсальной панели, которую можно использовать не только как ограждающую конструкцию, но и как элемент покрытия.

В связи с вышесказанным, в рамках данной работы было предложено новое конструктивное решение «low cost» сэндвич-панели, которая, однако, является некоторым прототипом ранее применяемых каркасных сэндвич-панелей. В ней, наряду с использованием классических металлических обшивок и легкого утеплителя из минеральной ваты, применены облегченные конструктивные вставки из просечно-вытяжного листа. Использование таких армирующих элементов существенно повышает жесткостные характеристики панели вместе с незначительным удорожанием конструкции. Тестирование предложенного конструктивного решения проведено на базе лаборатории строительных конструкций Харьковского национального университета городского хозяйства имени А.Н. Бекетова. Кроме того, было произведено теоретическое моделирование напряженно-деформированного состояния панелей на базе метода конечных элементов в среде программного комплекса «ЛИРА-САПР» [5].

Целью исследования являлось определение экспериментально-теоретическим путем компонентов напряженно-деформированного состояния предложенных конструктивных решений сэндвич-панелей и сопоставление полученных данных с характеристиками, определенными для традиционной конструкции.

КОНСТРУКТИВНОЕ ПРЕДЛОЖЕНИЕ

Рассматриваемая в работе традиционная сэндвич-панель – это трехслойный конструктив, в котором наружные слои имеют вид стальных оцинкованных обшивок, а средний слой выполнен из отдельных ламелей ориентированной минеральной ваты на основе базальтового волокна. На поверхность обшивок нанесен слой защитного антикоррозионного красящего полимерного покрытия, а объединение обшивок с утеплителем осуществлено при помощи двухкомпонентного полиуретанового клея.

В свою очередь, новое конструктивное решение предполагает использование в традиционной конструкции легких армирующих вставок из просечно-вытяжного листа. Следует отметить, что просечно-вытяжной лист обладает некоторыми преимуществами по сравнению со сплошными металлическим листом. В первую очередь, такие листы на 80% легче горячекатаных с аналогичными параметрами, а безотходная технология производства позволяет существенно экономить стоимость материала. Конфигурация «просечки» обеспечивает также надежное сцепление с

волоконми утеплителя для повышения жесткости. Армирующие вставки выполнены на всю длину панели в виде плоских полос или объемных лонжеронов. Предложенное конструктивное решение обладает патентной чистотой [6]. Поперечное решение традиционной панели и двух вариантов панелей, усиленных просечно-вытяжным листом, приведены на рис. 1.

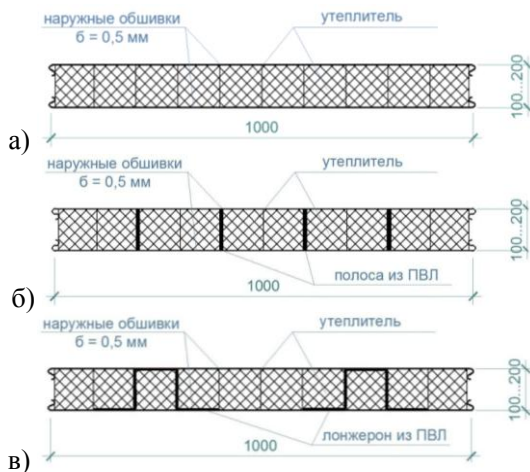


Рис. 1. Поперечное сечение рассматриваемых сэндвич-панелей:
а) традиционной; б) с армирующей полосой из ПВХ; в) с армирующим лонжероном из ПВХ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПРИВЕДЕННОЙ ТОЛЩИНЫ ВСТАВКИ ИЗ ПРОСЕЧНО-ВЫТЯЖНОГО ЛИСТА

Для упрощения теоретического моделирования панелей в среде программного комплекса «Лира-САПР» предлагается заменить армирующие вставки из просечно-вытяжного листа сплошным металлическим листом, приведенная толщина которого определяется на основании нового экспериментально-теоретического подхода.

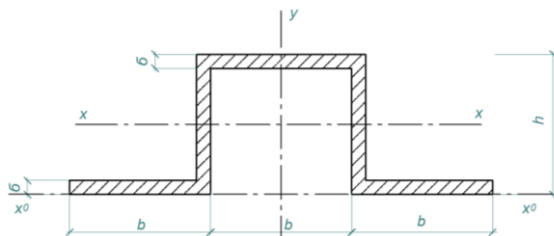


Рис. 2. К определению приведенной толщины лонжерона

Площадь лонжерона определяется по формуле:

$$A = (3b + 2h) \cdot \delta \quad (1)$$

Статический момент относительно оси x_0-x_0 :

$$S_{x_0x_0} = 2b \cdot \delta \cdot \frac{\delta}{2} + 2 \cdot h \cdot \delta \cdot \frac{h}{2} + b \cdot \delta \cdot h \quad (2)$$

Поскольку величина $2b \cdot \delta \cdot \frac{\delta}{2}$ является величиной второго порядка малости, ею можно пренебречь. Тогда статический момент относительно центральной оси примет вид:

$$S \approx h^2 \delta + bh \delta = (h + b)h \delta \quad (3)$$

Центр тяжести сечения располагается на расстоянии:

$$y_0 = \frac{(h+b)h\delta}{(2h+3b)\delta} = \frac{h+b}{2h+3b} \cdot h \quad (4)$$

Вычислим момент инерции сечения относительно центральной оси:

$$I_x = (3b + 2h)\delta y_0^2 - 2(h + b)h\delta y_0 + (2h + 3b) \frac{\delta h^2}{3} \quad (5)$$

Введем обозначение $\alpha = \frac{h}{b}$ (6)

Тогда с учетом (6), (4) и (5) примут вид:

$$y_0 = \frac{1+\alpha}{3+2\alpha} \cdot h \quad (7)$$

$$I_x = \frac{(\alpha+3)^2-3}{3+2\alpha} \cdot \frac{b\delta h^2}{3} \quad (8)$$

Для упрощения преобразований, введем еще одно обозначение:

$$\varphi(\alpha) = \frac{(\alpha+3)^2-3}{3+2\alpha} \quad (9)$$

Соответственно, (8) можно записать как:

$$I_x = \varphi(\alpha) \cdot \frac{b\delta h^2}{3} \quad (10)$$

Максимальный прогиб вычисляем по формуле: $f = \frac{PL^3}{48EI_x}$ (11)

Тогда из формулы $I_x = \frac{PL^3}{48Ef} = \varphi(\alpha) \cdot \frac{b\delta h^2}{3}$ (12)

Получим значение приведенной толщины лонжерона:

$$\delta = \frac{PL^3}{16 \cdot E \cdot b \cdot f \cdot h^2 \cdot \varphi(\alpha)} \quad (13)$$

где f – экспериментально установленный прогиб, L – пролет лонжерона, P – сосредоточенная сила, приложенная в центре, E – модуль стали, $E = 2,06 \cdot 10^5 \text{ МПа}$, b , h – геометрические параметры (см. чертеж) – ширина и высота панели, δ – приведенная толщина лонжерона.

В свою очередь, максимальный прогиб объемного лонжерона из просечно вытяжного листа определялся экспериментально. Для этого, фрагмент панели с лонжероном нагружался сосредоточенной нагрузкой, и

замерялись прогибы объекта исследования в центре пролета. Образец устанавливался на специальные опоры (козлы), в центре пролета подсоединялись датчики индуктивного типа ДПИ-100 для определения прогибов. Датчики соединялись с измерительной тензометрической системой СИИТ-3, которая преобразовала аналоговые сигналы к цифровому виду. Нагружение производилось штучными грузами ступенчато с разгрузкой каждой ступени для определения зоны упругой работы лонжерона. Схема установки для испытания и общий вид образца под нагрузкой приведен на рис. 3, 4.



Рис. 3. Общий вид установки для испытаний



Рис. 4. Общий вид образцов под нагрузкой

Результаты исследования демонстрируются усредненным графиком «нагрузка – перемещение», приведенным на рис. 5.

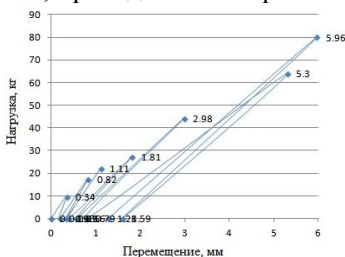


Рис. 5. График «нагрузка - перемещение» для лонжерона

Полученный максимальный прогиб был подставлен в формулу (13) для определения приведенной толщины лонжерона, которая в свою

очередь использовалась для моделирования панелей в конечно-элементной форме.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НДС ПАНЕЛЕЙ

Расчет трехслойных панелей выполнен в среде программного комплекса «Лира-САПР». В основу расчета положен метод конечных элементов в перемещениях. В качестве основных неизвестных приняты следующие перемещения узлов:

X - линейное по оси X;

UX - угловое вокруг оси X;

Y - линейное по оси Y;

UY - угловое вокруг оси Y;

Z - линейное по оси Z;

UZ - угловое вокруг оси Z.

В ходе моделирования решались статическая и динамическая задачи. В первой части расчета рассмотрены три типа конструкций сэндвич-панелей, приведенные на рис. 1. Исследуемые панели имели пролет 3000 мм, ширину 1000 м и толщину 100 мм.

Результаты расчета для трех вариантов конструкции сэндвич-панели приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты статического расчета

Схема	Тип конструкции	Перемещение Z		Нормальные напряжения, σ		Касательные напряжения, τ	
		мм	%	МПа	%	МПа	%
1	2	3	4	5	6	7	8
Одно-пролетная	Традиционная	7,78	100,0	33,4	100,0	0,044	100,0
	Плоская полоса из ПВХ	3,54	45,5	29,0	86,8	0,004	9,1
	Объемный лонжерон из ПВХ	1,89	24,3	22,0	65,9	0,003	6,8
1	2	3	4	5	6	7	8
Двух-пролетная	Традиционная	1,44	100,0	7,05	100,0	0,021	100,0
	Плоская полоса из ПВХ	0,2	13,9	12,0	170,2	0,003	14,3
	Объемный лонжерон из ПВХ	0,14	9,7	6,2	87,9	0,0026	12,4
Трех-пролетная	Традиционная	0,65	100,0	3,3	100,0	0,014	100,0
	Плоская полоса из ПВХ	0,11	16,9	4,8	145,5	0,003	21,4
	Объемный лонжерон из ПВХ	0,09	13,8	2,55	77,3	0,0025	17,9

Вертикальные перемещения панели при трехпролетной схеме работы для традиционной конструкции и конструкции с объемным лонжероном из ПВЛ приведены на рис.6.

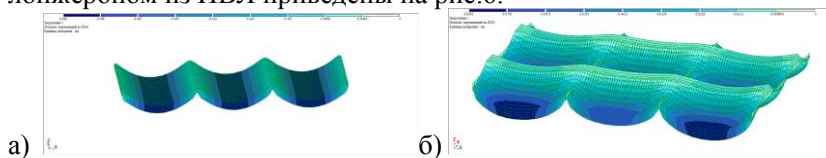


Рис. 6. Вертикальные перемещение для трехпролетной панели: а) традиционной, б) с объемным лонжероном из ПВЛ.

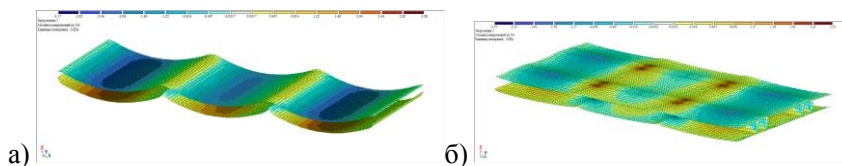


Рис. 7. Нормальные напряжения: а) в обшивка для традиционной панели; б) в обшивках для панели с лонжеронами.

Кроме того, был проведен модальный анализ рассматриваемых сэндвич-панелей. КЭ модель конструкции представляет собой шарнирно опертую плиту. Утеплитель был смоделирован с использованием КЭ тип 36 (7200 шт.) Размеры КЭ $5 \times 5 \times 5$ см, характеристики материала - $E = 10$ МПа, $\mu = 0,3$. Обшивка и элементы лонжерона были смоделированы с использованием КЭ тип 41 (6240 шт.). Размеры КЭ 5×5 см. Толщина обшивки 0.5 мм. Толщина стенок лонжерона 2 мм ($E = 210000$ МПа, $\mu = 0,3$).

Стоит отметить, что для лонжерона было принято пониженное значение плотности по сравнению с плотностью стали, чтобы учесть уменьшенную на 30% по сравнению со сплошным металлическим листом массу лонжерона из просечно-вытяжного листа.

Максимальное вертикальное перемещение от собственного веса для сэндвич-панели без лонжерона составило 2,01 мм. Максимальное вертикальное перемещение от собственного веса для сэндвич-панели с лонжероном составило 1,2 мм. В результате применения лонжерона прогиб уменьшился более чем на 40%. Результаты модального анализа представлены на рис. 8.

Конструктив	Номер формы	Частоты		Периоды		Модальная масса
		Гц	%	сек	%	
Без лонжерона	1	12.47	100.00	0.0802	100.00	29.47
С лонжероном		16.25	130.28	0.0615	76.76	30.64
Без лонжерона	2	17.02	100.00	0.0588	100.00	21.79
С лонжероном		17.65	103.68	0.0567	96.45	22.16
Без лонжерона	3	31.00	100.00	0.0323	100.00	0.00
С лонжероном		48.41	156.14	0.0207	64.04	1.33
Без лонжерона	4	34.21	100.00	0.0292	100.00	0.03
С лонжероном		62.77	183.49	0.0159	54.50	0.46
Без лонжерона	5	56.08	100.00	0.0178	100.00	3.73
С лонжероном		82.75	147.57	0.0121	67.77	8.33
Без лонжерона	6	60.96	100.00	0.0164	100.00	0.56
С лонжероном		110.03	180.50	0.0091	55.40	0.03
Без лонжерона	7	77.41	100.00	0.0129	100.00	0.00
С лонжероном		130.58	168.69	0.0077	59.28	8.53
Без лонжерона	8	90.86	100.00	0.0110	100.00	2.50
С лонжероном		167.58	184.45	0.0060	54.22	0.22
Без лонжерона	9	98.40	100.00	0.0102	100.00	1.17
С лонжероном		191.72	194.83	0.0052	51.32	0.03
Без лонжерона	10	101.96	100.00	0.0098	100.00	4.81
С лонжероном		196.85	193.08	0.0051	51.79	7.55

Рис.8. Результаты модального расчета

Первые 10 форм собственных колебаний традиционной конструкции и усиленной объемным лонжероном приведены в табл. 2.

Для решения динамической задачи была предложена следующая модель. Рассмотрена железобетонная рама с колоннами и ригелями сечением 300×300 мм из бетона класса C25/30 с размерами в плане $3,0 \times 6,0$ м. Закрепление колонн жесткое. Между колоннами установлены стеновые сэндвич панели толщиной 150 мм. Конечно-элементная модель приведена на рис. 9.



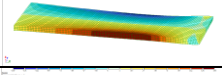
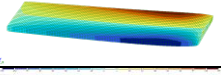
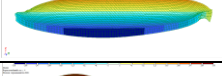
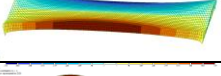
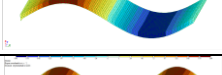
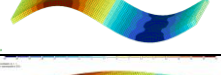
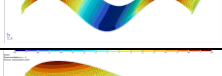
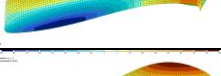

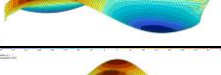
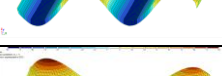

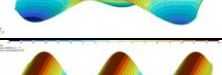

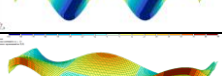
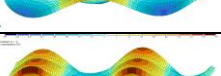




Рис.9. Конечно-элементная модель рамы

Объемные элементы смоделированы с использованием конечных элементов тип 36 - универсальный пространственный восьмиузловой изопараметрический КЭ. (36864 шт.) Размеры КЭ $5 \times 5 \times 5$ см. Обшивка сэндвич-панелей и лонжероны смоделированы с использованием КЭ тип 41 - универсальный прямоугольный КЭ оболочки (12480 шт.) размером 5×5 см. Расчет выполнен на следующие загрузки: 1 - статическое нагружение от собственного веса, 2 - динамическое нагружение (сейсмическое воздействие по ДБН В.1.1-12:2006 [8]).

Таблица 2

Формы собственных колебаний

№ формы колебаний	Традиционная конструкция	Конструкция с лонжероном из ПВЛ
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

В расчете учитывается заданное количество форм собственных колебаний (KF). Для расчета было задано 50 форм. Количество динамических составляющих равно количеству форм собственных колебаний, по которым раскладывается динамическая нагрузка. Значения сейсмических нагрузок, соответствующих каждой форме собственных колебаний, вычислены согласно положениям строительных норм Украины [7].

Динамические перемещения модели при сейсмическом воздействии в 7 баллов приведены на рис.10-11.

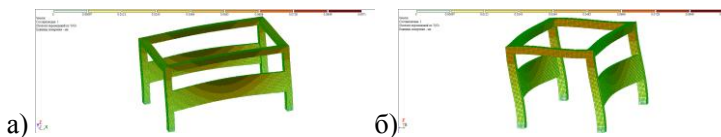


Рис. 10. Результаты расчета на сейсмическое воздействие для традиционной панели по оси y в разных проекциях (рис. а и б)

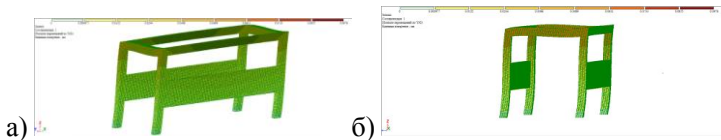


Рис. 11. Результаты расчета на сейсмическое воздействие для панели с объемным лонжероном по оси y в разных проекциях (рис. а и б)

Разница между динамическими перемещениями в сэндвич-панелях при 7-ми балльной сейсмике составила больше 43%. Максимальное динамическое перемещение в сэндвич-панели без лонжерона при 7-ми баллах составило 0,095 мм. Максимальное динамическое перемещение в сэндвич-панели с лонжероном при 7-ми баллах составило 0,054 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенное конструктивное решение было внедрено на стендовом участке линии непрерывного производства трехслойных сэндвич-панелей предприятия ООО «НТК» в г. Змиев Харьковской области, одного из пионеров отечественного рынка по производству сэндвич-панелей. Данная автоматическая линия по производству сэндвич-панелей обеспечивает возможность непрерывного контроля качества на всех стадиях изготовления панелей с помощью новых компьютерных технологий. Производственная мощность предприятия позволяет выпускать порядка 1 млн. м^2 сэндвич-панелей в год. При этом внедрение конструктивного решения было произведено без существенного изменения технологического цикла предприятия. При определении экономической целесообразности предложенного решения, выполнялся анализ стоимости материалов для четырех типов панелей:

- с минераловатным утеплителем,
- минераловатным утеплителем и плоским армирующим элементом из ПВХ,
- минераловатным утеплителем и объемным лонжероном,

с экструдированным пенополистиролом.

Стоимость определена для панелей длиной 3000мм, шириной 1000мм и толщиной 100 мм.

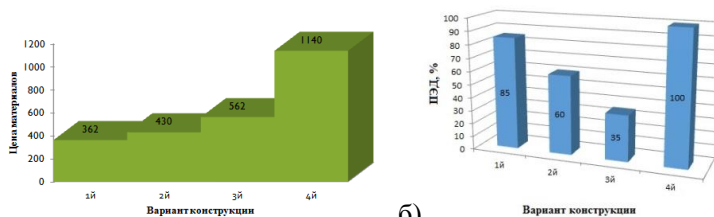


Рис. 12. Сравнение вариантов: а) по материалам, б) по распределению ПЭД (1й вариант – традиционная панель с минватой; 2й вариант – панель со вставкой плоских армирующих элементов (удорожание 18%); 3й вариант – панель со вставкой объемного лонжерона (удорожание 55%); 4й вариант – панель с использованием экструдированного пенополистирола (удорожание 215%)).

Как видно из диаграммы, удорожание материалов для усиленной конструкции по сравнению с традиционной, при определении их расхода для трехметровой панели, составляет 18% и 55%, что, однако в 2,65 и 2 раза, соответственно, меньше, чем использование дорогостоящих жестких утеплителей. Кроме того, конструкция с наиболее жестким утеплителем обладает самым высоким запасом накопленной потенциальной энергии, в то время как конструкция с объемным лонжероном имеет наименьшее значение ПЭД. Предложенное конструктивное решение обеспечивает увеличение запаса упругой работы конструкции на 40% и ее жесткости на 50%, таким образом, обосновывая целесообразность применения утеплителей низких марок совместно с просечно-вытяжными армирующими элементами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ильдияров Е.В. Несущая способность и деформативность кровельных сэндвич-панелей с минераловатным средним слоем на основе базальтового волокна: дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / Ильдияров Евгений Викторович. – Самара, 2009. - С. 163-168.
2. Хайруллин Л.Р. Несущая способность сэндвич-панелей с металлическими обшивками и технологическими стыками среднего слоя. : дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / Хайруллин Ленар Равилович. – Казань, 2012. –205 с. – Библиогр. - С. 186-199.
3. Experimental investigation of wall and roof sandwich panels of “Aluterm” series (Экспериментальное исследование стеновых и кровельных сэндвич-

- панелей серии «Алютерм»). / В.С. Шмуклер, Е.И. Лугченко, Е.А. Петрова // Коммунальное хозяйство городов. – №118 (2014). – С. 11-20.
4. Анализ характера деформирования и разрушения трехслойных стеновых панелей серии “Алютерм” / Е.А. Петрова. // Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. – Вип. 151 (2015) – С. 26-43.
 5. Патент на изобретение «Трехслойная панель». Заявка №а2014 09413, Шмуклер В.С.
 6. Городецкий А.С. Информационные технологии расчета и проектирования строительных конструкций / Городецкий А.С., Шмуклер В.С., Бондарев А.В. - Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. - 889 с.
 7. Будівництво у сейсмічних районах України: ДБН В.1.1 – 14:2014 / науковий керівник Ю.І. Немчинов. - [Чинні від 2014-10-01]. – К.: Мінрегіон України, 2014. - VI, – 110 с. – (Будівельні норми України).

REFERENCES

1. Ildiyarov E.V. Bearing capacity and deformability of sandwich roof panels with the middle layer of mineral wool on the basis of the basalt fiber. – Samara, 2009. – 179p.
2. Hayrullin L.R. Bearing capacity of sandwich panels with metal faces and technological junction of the middle layer. - Kazan, 2012. – 205p.
3. Experimental investigation of wall and roof sandwich panels of “Aluterm” series / V.S. Smukler, E.I. Lugchenko, E.A. Petrova // Коммунальное хозяйство городов. – №118 (2014) – p. 11-20.
4. The analysis of the deformation and fracture character of wall sandwich panels of "Aluterm" series / E.A. Petrova //Col. Scient. Works of USART. – Vol. 151 (2015) – P. 26-43.
5. The patent for the invention «Sandwich panel». Application №a2014 09,413, Shmukler V.S.
6. Gorodeckiy A.S. Information technologies of calculation and designing of building structures / Gorodeckiy A.S., Smukler V.S., Bondarev A.V. - Kharkov, NTU “KPI”, 2003 – 889 p.
7. Construction in seismic regions of Ukraine: State building codes B. 1.1–14: 2014 / scientific chief Yu.I. Nemchinov. - [Valid from 2014-10-01]. – K.: Minregion of Ukraine, 2014. - VI, – 110 p. – (Building norms of Ukraine).

Статья поступила в редакцию 25.08.2015 г.