

УДК 624.011

**МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СЭНДВИЧ
ПАРАБОЛИЧЕСКИХ ПАНЕЛЕЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ
КОМБИНИРОВАННОЙ НАГРУЗКИ**

**MULTICRITERIA OPTIMIZATION OF SANDWICH
PARABOLIC PANELS UNDER COMBINED LOADS**

Жгаллі Ш. аспірант, Рєзніков А.О. магістр (Одеська державна академія будівництва та архітектури).

Jgalli S. P.G.S., Ryznikov A. M.S. (Odessa state academy of civil engineering and architecture).

У статті описано модель полі-оптимізації сандвіч параболічних панелей під дією комбінованого навантаження. Розрахункова змінна є товщина шарів. Обмеження включають в себе умову стійкості, напруження стану, технологічні та конструктивні вимоги. Проблему можливо вирішити за допомогою концепції Парето-Оптимальності, з безперервними і дискретними наборами змінних проектування.

The aim of this paper is to present the Polyoptimal design model of a parabolic sandwich panel under combined loads. The design variables are the thicknesses of the layers. The constraints include a stability condition, stress conditions, the validation of theoretical models, and finally, technological and constructional requirements. The problem was solved with the help of Pareto's concept of optimality, with continuous and discrete sets of the design variables. Typical sandwich structures are composed of two thin carrying layers and a core made of plastic foam, honeycomb-structure material, fibre-reinforced composite materials, or corrugated sheets. The elastic properties of the carrying layers ensure the high rigidity of the entire structure, and a suitable core structure and core material properties increase the stiffness of the sandwich structures and also ensure additional thermo-insulation, damping of mechanical or acoustic vibrations, etc.

Ключевые слова: оптимизация, поли-оптимизация, многокритериальная, Парето оптимальность, непрерывными, дискретными, параболических.

Keywords: Polyoptimal, parabolic sandwich panel, concept of

optimality, continuous, discrete.

Не развертывающаяся поверхность гиперболического параболоида создает определенные трудности при аппроксимации поверхности оболочки на сборные элементы. Известны подходы, определяющие ограниченность типовых клефанерных конструкций поверхностей гиперболических оболочек [1]. Ныне имеются возможности использовать широкий спектр новых строительных материалов (лвл-kerto, дсп, osb, фанера, стеклопластик, сэндвич материалов и др.) для составных гипаров разных типов и размеров.

Например, это могут быть пятилепестковые оболочки из цельной или клееной древесины (рис.1).

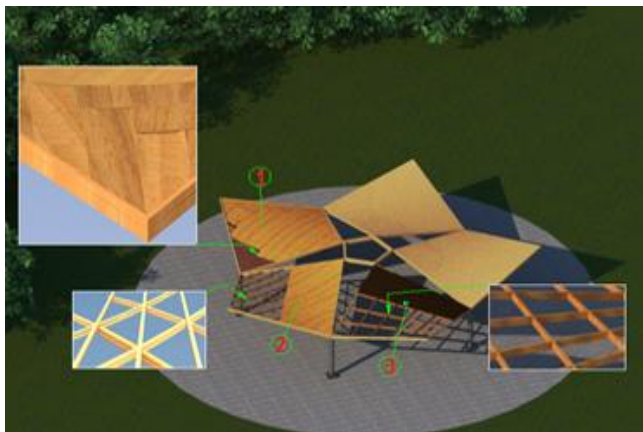
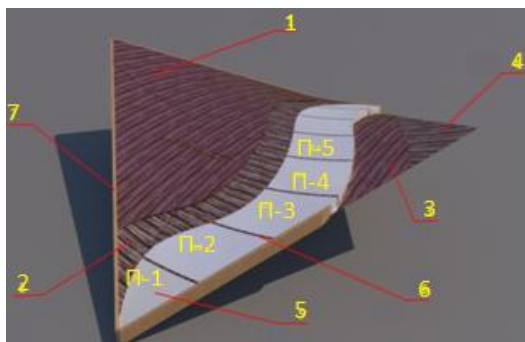


Рис.1. Конструктивная схема пятилепестковой гиперболической оболочки (г.о.) покрытия:

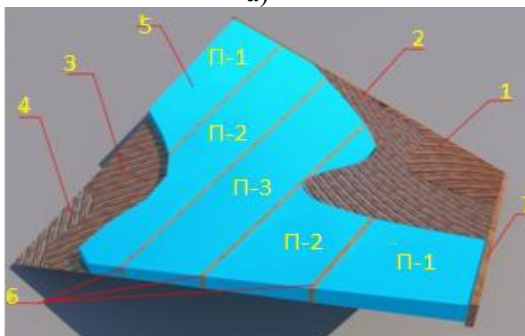
1 - слоистый гипар; 2 - сетчатый гипар по образующей параболы; 3 - панельная г.о. по прямолинейной образующей.

Эффективность конструкций, созданных на основе тонколистовых материалов и трудногораемых легких заполнителей, определяется их малым весом, простотой и скоростью их монтажа, высокой эксплуатационной надежностью. Здания, возведенные с применением легких многослойных панелей, уже нашли широкое применение в практике мирового строительства, что в определенной степени определяет

актуальность их использования в формообразовании оболочки типа гиперболического параболоида с прямолинейным контуром в качестве материалов для заполнения поверхности составных элементов. Тем не менее, накопленный опыт проектирования и эксплуатации обсуждаемых конструкций является недостаточным относительно сборных параболических и скрученных прямоугольных элементов (в виде сэндвич панелей) (рис.2).



а)



б)

Рис.2. Гиперболические оболочки (г.о.) покрытия:

а) - гипар из параболических элементов;

б) - гипар из асимптотических элементов в виде скрученного прямоугольника;

1- первый слой верхней обшивки; 2 - второй слой верхней обшивки; 3 - второй слой нижней обшивки; 4 - первый слой нижней обшивки; 5 - наполнитель; 6 - поперечные деревянные элементы; 7 - бортовые элементы.

В связи с этим, авторами предполагается конструирование легких металлодеревянных сборных гиперболических покрытий (рис.3), составленных из трехслойных конструкций типовых панелей (из параболических элементов).

Трехслойные панели состоят из профилей обшивок внешней и внутренней, толщиной 0,4 мм, между которыми располагается изоляционный слой из пенополиуретана и через определенный шаг находятся поперечные деревянные элементы. Все панели соединяются между собой благодаря продольным деревянным элементам каркаса, состоящего из продольных и поперечных элементов, направленных по нисходящей и восходящей параболах.



Рис. 3. Вид оболочки из параболических панелей размером 3000х3000х35мм в лаборатории кафедры МДиПК ОГАСА

При этом большая сопротивляемость этой формы оболочки выпучиванию объясняется тем, что главные усилия растяжения располагаются по направлению восходящих парабол, а главное

усилия сжатия - по направлению нисходящих парабол. А продольные стыки располагаются перпендикулярно сжимающим усилиям и сосредотачиваются по диагоналям на опорные части. Увеличение активной нагрузки приводит к усилению прижима элементов продольных трехслойных панелей продольными кромками (рис.4-5). Детали формообразования параболических панелей подробно описаны в монографии [2] стр. 37-41.

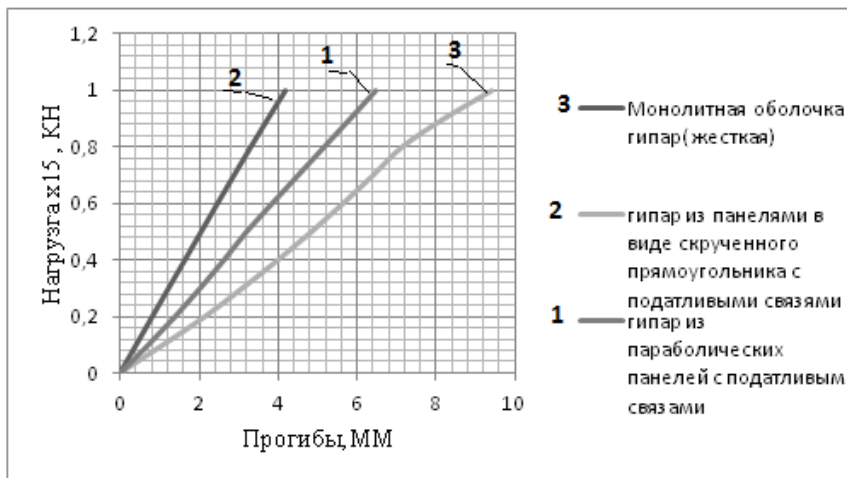


Рис.4. Зависимость прогиба от нагрузки

На рис. 4. представлены линии максимального прогиба под нагрузкой для гипара из параболических элементов и асимптотических (в виде скрученного прямоугольника) с одинаковой податливостью в местах соединения элементов. Так же в качестве сравнение, проводился расчет монолитного лепестка, представляющий жесткую конструкцию. Сравнение графиков прогиба показывает, что вертикальные перемещения оболочек значительно увеличиваются в сравнении 2-ой и 3-ей оболочки почти в два раза, таким образом гипар из параболических элементов воспринимает нагрузки сравнительно лучше, чем оболочка из асимптотических элементов.

Кроме того, на рис.5. характеризуется упругопластическая область работы конструкции, и наблюдается в стадии упругой деформации, большая близость работы 1-ой и 3-ей оболочки, в то

время как 2-ой гипар отдельно работает и испытывает больше всех усилия.

Отмечается большое сходство между 1-ой и 3-ей оболочками что, существенно демонстрирует стремление 1-ой оболочки работать как монолитной, за счет увеличения активной нагрузки и усиления прижима параболических элементов, более подробно описаны в [3].

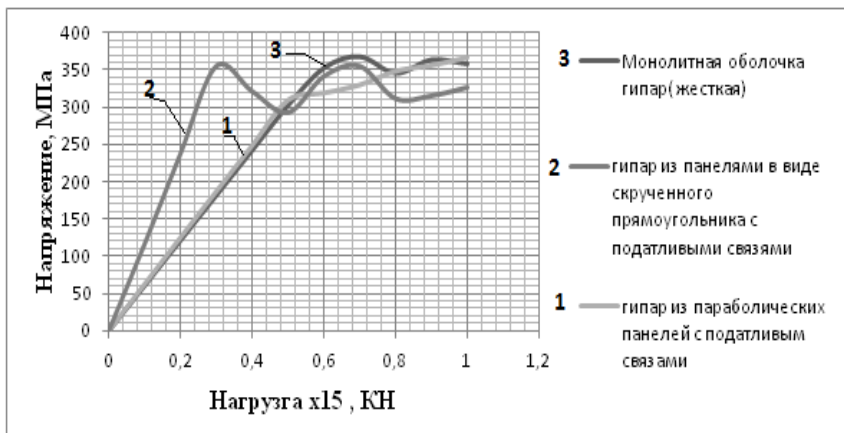


Рис.5. Зависимость максимального эквивалентного напряжения по Von Mises от нагрузки

Недостатком тонкостенных конструкций является их восприимчивость к глобальной и локальной потере устойчивости. Другие недостатки этих конструкции связаны с технологическим и монтажным процессом. Помимо низкой массы сэндвич панелей, несколько дополнительных требований должны быть удовлетворены, по жесткости, прогибам, стоимости и надежности. Это усложняет стадию конструирования за счет необходимости в удовлетворении большого числа противоречивых задач. Таким образом многокритериальная оптимизация (или поли-оптимизация) позволяет конструировать более подходящую модель сэндвич-панелей (рис.6).

Первый критерий (масса панели) имеет следующий вид (1):

$$Q_1(x) = a \cdot b \cdot (h_1 \gamma_1 + h_2 \gamma_2 + h_3 \gamma_3) (\kappa_2) \rightarrow \text{минимум} \quad (1)$$

где x - вектор проектных переменных, h_i - является толщина слоев панели принимается проектных переменных ($i = 1, 2, 3$), γ_i - плотность материал i -го слоя.

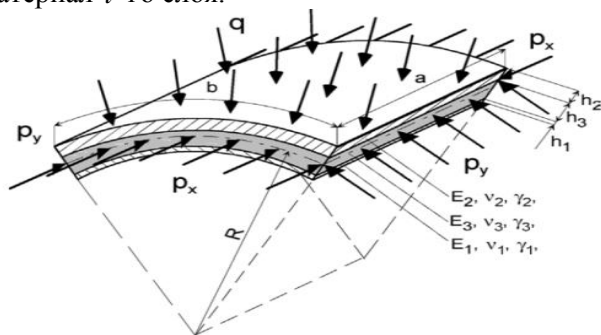


Рис.6. Модель параболических элементов сэндвич панель

Вторым критерием является требование максимальной жесткости конструкции в виде (2):

минимальные прогибы оболочки, условие минимальной податливости были сформулированы [5], [6-8]. Для цилиндрической панели, этот критерий определяется следующим образом:

$$Q_1(x) = 1/D(x) \rightarrow \text{минимум} \quad (2)$$

$$\text{где } D(x) = \frac{E_i h_1 h_2 (h_1 + 2h_3 + h_2)^2}{4(h_1 h_2) (1 - \vartheta_i^2)}$$

$E_i (i = 1, 2)$ - модули упругости обшивки, ϑ_i - коэффициент Пуассона обшивки.

Основным фактором предельного состояния является условие по устойчивости, с учетом начальных геометрических дефектов, связанных с производством и сборкой. Предельное состояние определяется в виде неравенств (3) и (5) - (8), приведены ниже.

- Допустимая критическая нагрузка должна быть больше, чем осевая сжимающая сила, P_x :

$$P_{кр.доп} = \frac{P_{кр}^{верх}}{\alpha \cdot n} \geq P_x \quad (3)$$

Проблема упрощается за счет взятия верхней критической нагрузки во внимание. Верхняя критическая нагрузка вычисляется как наименьший положительный корень полинома следующего уравнения (4):

$$A_1 \cdot \tilde{P}_x^4 + A_2 \cdot \tilde{P}_x^3 + A_3 \cdot \tilde{P}_x^2 + A_4 \cdot \tilde{P}_x + A_5 = 0 \quad (4)$$

$$[\tilde{P}_x] = 1, P_{кр}^{верх} = \frac{B \cdot (h_1 + h_2 + h_3)^2}{a \cdot b} \tilde{P}_x, B = \sum_{i=1}^{i=3}, B_i = \sum_{i=1}^{i=3} \frac{E_i h_i}{1 - g_i^2},$$

где A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 - являются коэффициенты, описывающие физический и геометрический параметры панели [9]. Факторы содержат соотношение $A_i = P_y / P_x = qR / P_x$, которое позволяет рассчитать критическую нагрузку при сжимающей силе и внешнему давлению. Согласно [10], коэффициент $\alpha = 1,4$ принимает во внимание влияние начальных прогибов (геометрических дефектов) от величины критической силы для панелей, и дополнительно коэффициент запаса прочности $n = 1,25$. Указанные коэффициенты выше, были введены в связи с проблемой неизвестных начальных несовершенств конструкции и их влияния на общую и локальную потерю устойчивости.

- Напряжения в обшивках не должно превышать допустимые напряжения (5):

$$\sigma_i^{об} = \left[(\sigma_{xi}(P_x q))^2 + (\sigma_{yi}(P_x q))^2 - (\sigma_{xi}(P_x q))(\sigma_{yi}(P_x q)) \right]^{1/2} \leq [\sigma_i].$$

- Прогиб в середине панели не может превышать предельных значений (6), [11]:

$$\omega = \frac{5}{384} \frac{q \cdot a^4}{D(x)} \cdot C \leq \omega_{дон} \quad (6)$$

$$\text{где } C = \left(1 + \frac{48k}{5\pi^2} \right) - \frac{1563}{5\pi^2 \cdot ch(\pi/2\lambda)} \left(1 + k + \frac{\pi \cdot th(\pi/2\lambda)}{4\lambda} \right).$$

$$k = \left(\frac{E_{1,2}}{1 - \mathcal{G}_{1,2}^2} \right) \frac{\pi^2 \cdot h_1 h_2 h_3}{G a^2 (h_1 + h_2)} \lambda = \frac{a}{b}.$$

- Важность критических уравнений нагрузки является приведение к следующему предположению (7):

$$\frac{R}{h_1 + h_2 + h_3} \geq 30. \quad (7)$$

- Когда технологические и конструктивные требования рассматриваются, следующие условия предполагаются (8):

$$0.1mm \leq h_1, h_2 \leq 3.0mm \text{ и } 1mm \leq h_3 \leq 50mm. \quad (8)$$

Эту проблему можно решить с использованием концепции Парето - оптимальности. В этом расчете паретовских решений, мультикритериальной задачи сводится к семейству скалярных задач оптимизации с использованием весовых коэффициентов $WAGA = [0, 1]$.

$$Q(x) = [Q_1(x), Q_2(x)] = (1 - WAGA) \cdot Q_1(x) + WAGA \cdot Q_2(x) \rightarrow \quad (9)$$

минимум

Где $Q(x)$ - вектор целевых функций и $WAGA$ - весовой множитель $0 \leq WAGA \leq 1$.

Выводы

- Под равномерно распределенной нагрузкой, работа гипара при использовании параболических и асимптотических элементов существенно отличается.

- Использование параболических панелей в отличие от асимптотических, способствует усилению сжатия в местах соединения в условиях равномерной распределенной нагрузки.

- Поли-оптимизации сэндвич параболических панели под действием комбинированной нагрузке. можно решить с помощью концепции Парето-Оптимальности, с непрерывными и дискретными наборами переменных проектирования.

Литература

1. Stojanov V.V. Kontovone lepene hiperbolice skrupiny. V zbornicu zo IV medzinarodeho sympozia “Drevo v stavebných konstrukciách”, Bratislava, 1989
2. Стоянов В.В. Конструирование легких сборных гиперболических покрытий. –Одесса, 2000 г.; –166с , ОГАСА.
3. Стоянов В.В , Жгаллі.Ш, Стоянов В.О, Покриття типу гіперболічний параболоїд зі збірних елементів Сборник научных трудов “современные строительные конструкции из металла и древесины №20” одесская государственная академия строительства и архитектуры, Одесса, ООО ,Внешрекламсервис, 2016,-176.
4. Engineering Optimization ISSN 0305-215X print/ISSN 1029-0273 online © 2006 Taylor & Francis <http://www.tandf.co.uk/journals> DOI: 10.1080/03052150600744555.
5. Magnucki, K. and Ostwald, M. (eds), Stability and Optimization of Sandwich Structures, 2001 (ITE Radom: Poznań) (in Polish).
6. Ostwald, M., Optimal design of sandwich structures. PhD thesis 290, Poznan University of Technology, 1993 (in Polish).
7. Ostwald, M., Multicriteria optimization of cylindrical sandwich shells under combined loads. Struct. Optimiz., 1996, 12(2/3), 159–166.
8. Ostwald, M. and Kasperska, R., Multicriteria optimization of sandwich cylindrical panels under axial compression and external pressure. In Proceedings of the 4th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization WCSMO–4, 2001 (Liaoning Electronic Press, Dalian, China) (CD–ROM).
9. Sekulski, Z., Non-linear problem of stability state of sandwich cylindrical panel under combined loads. Arch. Machine Construct., 1984, 31(1–2), 51–71 (in Polish).
10. Bushnell, D., PANDA-2: program for minimum weight design of stiffened, composite, locally buckled panels. Comput 11.Struct., 1987, 25(4), 469–605.
11. Aleksandrow, J., Brjuker, L.E., Kurszin, A.M. and Prusakow, A.P., Calculations Of Sandwich Panels, 1960 (Oborongiz: Moscow) (in Russian).