

УДК 539.3

ОПТИМІЗАЦІЯ ФОРМИ І СТРУКТУРИ ВЕЛИКОПРОГОНОВИХ ОБОЛОНОК ПОДВІЙНОЇ КРИВИЗНИ

*кандидат технічних наук, Костира Н.О.
Національний авіаційний університет, Київ*

Задачі оптимального проектування форми оболонок не мають загальної математичної формалізації і зводяться до вибору таких геометричних параметрів конструкції, які б задовольняли різним критеріям оптимальності. Ці задачі можна віднести до класу зворотніх задач теорії оболонок і для їх розв'язання на основі методів нелінійного програмування необхідне попереднє представлення області розв'язку в просторі стану з використанням аналізу чутливості, що пов'язано зі значними математичними труднощами. Тому більш доцільними є використання спеціальних алгоритмів геометричного моделювання, у тому числі управління формою за обмеженою кількістю узагальнених параметрів проектування, зміна яких суттєво впливає на функцію відповідного критерію якості для конкретно розглянутої задачі.

В [1, 2, 3, 4, 5] представлені спеціальні алгоритми нелінійного деформування оболонкових систем, як еволюційної задачі у просторі станів деформування і формозміни розрахункових скінченноелементних моделей. Розв'язки задач побудовані на основі явних і неявних різницьових схем, співвідношень нелінійної теорії пружності і пластичності, методів Ньютон-Канторовича та нелінійного програмування.

Для розв'язання задачі оптимального проектування великопрогонного покриття видовищної споруди розроблений комплексний підхід, який заснований на об'єднанні методу розрахунку на міцність за граничним станом з урахуванням розвитку локальних зон пружно-пластичних деформацій та пошукового (прямого) методу оптимізації форми і структури комбінованої оболонкової конструкції, що включає: а) власне саму тонколистову оболонку; б) стабілізуючий залізобетонний шар товщиною 30 мм (враховується тільки вага); в) опорний трубобетонний контур типу просторове криволінійне ребро-кривий брус з достатньо великою жорсткістю; г) внутрішнє кільце (симетричне ребро – з нульовим ексцентриситетом) овальної форми з пружно-піддатливими поперечними в'язями; д) комбіновану конструкцію арки в середньому перерізі покриття (верхній пояс – жорстке ребро оболонки, нижній пояс – розтягнутий шпренгель, пружно-піддатливі в'язі розміщені за напрямом шпренгеля). Математична модель задачі має стандартну форму [6] і містить:

- цільову функцію

$$f(b, u) \equiv \sigma_{\max}(b, u) \rightarrow \min ; \quad (1)$$

- обмеження у вигляді рівностей (система нелінійних рівнянь рівноваги)

$$h_k(b, u) = 0 ; \quad (2)$$

- обмеження у вигляді нерівностей

$$\max \sigma(b, u) \leq |\sigma^T|; \quad (3)$$

- розширений критерій Мізеса [7, 8]

$$\frac{3}{2} I_1(\hat{S}^2) \cos^2 \alpha - \sigma_s^2 \leq 0; \quad (4)$$

- параметричні обмеження

$$\begin{cases} \overset{\circ}{b} \geq \overset{*}{b} \geq \{b^{(k)}\}, \\ \overset{\circ}{u} \geq \overset{*}{u} \geq \{u^{(k)}\}, \end{cases} \quad (5)$$

де $\{b\} = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ - вектор змінних проектування; $\{u\} = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ - вектор змінних стану – перемішень; \hat{S} - тензор - девіатор функції напружень;

$$\alpha = \frac{1}{3} \arcsin \left[-\sqrt{6} \frac{I_1(\hat{S}^3)}{I_1^{3/2}(\hat{S}^2)} \right] - \text{параметр Лоде – Надаї [7];} \quad (6)$$

Результати оптимального проектування і розрахунку на міцність за граничним станом для розглянутого класу механічних систем наведені на прикладі великопрогонової комбінованої оболонкової конструкції покриття овальної форми в плані з розмірами 145×85 м (рис.1).

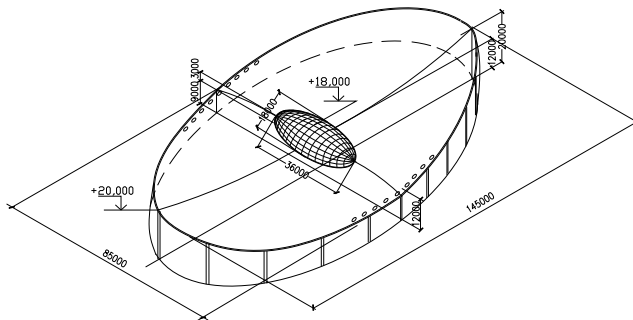


Рис. 1. Комбінована оболонкова конструкція покриття

Розв'язання такої задачі оптимізації тільки побічно пов'язане з найбільш розвиненою методологією вагової оптимізації і передбачає оптимізацію форми та структури просторових механічних систем, при цьому за головний критерій якості береться не мінімізація ваги, а мінімізація функції напружень.

Задача оптимізації форми і структури просторових механічних систем складної форми вимагає попереднього розв'язку цілої низки проблем: ефективного геометричного дискретного моделювання розрахункової схеми для відповідного чисельного методу, попередній розв'язок задачі про

мінімальну серединну поверхню для вибраного у першому наближенні зовнішнього опорного контуру, урахування різних природних і спеціальних обмежень, які необхідні для отримання адекватного реалістичного проекту розглянутого класу механічних систем, вибір ефективних підходів і алгоритмів, а також їх комбінацій з множини відомих в теорії нелінійного програмування, аналізу чутливості, нелінійної теорії пружності і пластичності.

На основі розробленої методики нелінійного деформування гнучких оболонок і спеціального алгоритму оптимізації форми і структури комбінованих оболонкових систем розв'язана задача розрахунку на міцність з урахуванням пружно-пластичних деформацій сильно нелінійної тонколистової оболонки на пружно-піддатливому криволінійному у просторі контурі. Результати оптимального проектування і розрахунку на міцність за граничним станом наведені на прикладі великопрогонової комбінованої конструкції покриття, овальної у плані, з розмірами 145x85 м. Тонка гнучка оболонка з приведеним конструктивно-ортотропним матеріалом $E_2^{(e)} = 1,64 \cdot 10^6$ кґ/см², $E_3^{(e)} = 1,52 \cdot 10^6$ кґ/см², $G_{23} = 0,81 \cdot 10^6$ кґ/см², $\nu_{32} = 0,3$, $\nu_{23} = 0,32$, що за еквівалентними характеристиками циліндричної і згинальної жорсткостям відповідає реальній конструкції тонколистової оболонки товщиною 0,4 см і постелі з прокатної полоси 300x8 мм, розташованої у радіальному напрямі з середнім кроком 350 см і широтному напрямі – прокатних вставок із полоси 200x6 мм із кроком 350 см.

Нитки скінченної жорсткості в радіальному напрямі спираються на пружно-піддатливий зовнішній контур з трубетону і пружне опорне кільце еліптичної форми у плані з розмірами 36x18 м. Розрахункова схема покриття з урахуванням двох площин симетрії та дискретна модель ¼ частини покриття наведені на рис. 2.

У якості перемінних проектування прийняті два параметри форми поверхні покриття, яка описується канонічними рівняннями гіперболічного параболоїду, сім параметрів жорсткості елементів каркасу покриття і два структурних параметра. Всього задіяні одинадцять параметрів проектування. Початкові значення і їх зміни у межах інтервалів раціонального проектування мають вигляд:

$$\begin{aligned} \{b_i^0\}_{i=1,11} &= \left\{ b_1^0, b_2^0, b_3^0, b_4^0, b_5^0, b_6^0, b_7^0, b_8^0, b_9^0, b_{10}^0, b_{11}^0 \right\} = \\ &= \{800,0; -800,0; 102,0; 70,0; 14,0; -16,25; 0,4; 7,5 \cdot 10^4; 9,0 \cdot 10^4; 1,0; 600,0\}; \\ \{\delta b_i^0\}_{i=1,11} &= \left\{ \delta b_1^0, \delta b_2^0, \delta b_3^0, \delta b_4^0, \delta b_5^0, \delta b_6^0, \delta b_7^0, \delta b_8^0, \delta b_9^0, \delta b_{10}^0, \delta b_{11}^0 \right\} = \\ &= \{100,0; 200,0; 20,0(0,2); 2,0; 2,0; 3,5; 0,05; 1,5 \cdot 10^4; 2,0 \cdot 10^4; 1,0; 300,0\}, \end{aligned}$$

де $b_1 \equiv f_a$; $b_2 \equiv f_b$ - параметри форми серединної поверхні (стріли підйому в поздовжньому і поперечному перерізах); $b_3 \equiv D_{mp}(t_{np})$; $b_4 \equiv e_x^{mp}$; $b_5 \equiv h_s$; $b_6 \equiv e_x^{ap}$; $b_7 \equiv h_0$; $b_8 \equiv R_0^1$; $b_9 \equiv R_0^2$; $b_{10} \equiv K_p = 1, 2$ - число сполучень оболонки з каркасом; $b_{11} \equiv l_k$ - крок опорних колон.

Параметричні обмеження на компоненти $\{b\}$ прийняті у межах норм проектування з урахуванням обмежень за міцністю у граничному стані і локальній втраті стійкості за ступенем розвитку пружно-пластичних деформацій. Обмеження за максимальними прогинами оболонки і переміщеннями основних елементів каркасу – зовнішнього опорного контуру і внутрішнього опорного кільця під конструкції світового ліхтаря – наступні:

$$u_{49}^{2'} \leq 4,0 \text{ см}; \quad u_{1349}^{2'} \leq 12,0 \text{ см}; \quad u_{1301}^{3'} \leq 8,0 \text{ см}; \quad u_{49}^{1'} \leq 100,0 \text{ см};$$

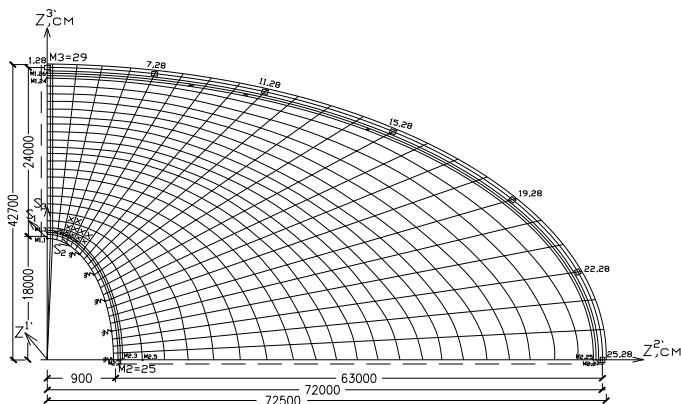


Рис. 2. Розрахункова схема $1/4$ покриття з урахуванням двох площин симетрії

При обмеженій кількості узагальнених параметрів проектування вектора $\{b_i\}$, $i=1+11$, найбільш ефективними (при сильній нелінійності обмежень у вигляді рівностей) є пошукові методи (прямі) оптимізації [6, 9], які засновані на обчисленні значень цільової функції для даного вектора значень параметрів проектування, послідовність зміни яких реалізується відповідно до формули:

$$\vec{b}^{t+1} = \vec{b}^t + \vec{\delta b}^t, t = 0, 1, 2, \dots, k, \quad (7)$$

де t – номер ітерації прямого пошуку, $\vec{\delta b}^t$ - величина зміни вектора параметрів проектування.

Сутність методу прямого пошуку полягає в зміні кожний раз на окремій ітерації „ t ” однієї перемінної проектування (однієї компоненти незалежного

вектора $\vec{b} \equiv \{b\}$), тоді як інші залишаються сталими, поки не буде досягнутий мінімум цільової функції. У зв'язку з обмеженим числом перемінних проектування в даній роботі використовується алгоритм оптимального прямого пошуку Хука і Дживса [9].

В розрахунковій схемі і дискретній моделі на рис. 2 наведені значення параметрів проектування, які отримані за алгоритмом визначення оптимального проекту, виконаний остаточний розрахунок на міцність у позаграничному стані матеріалу оболонки і примикань вставок до елементів каркасу з обмеженнями за розвитком пластичних деформацій.

Від дії максимальних навантажень отримані чисельні результати напружено-деформованого стану, які наведені у вигляді ізоліній і епюр внутрішніх зусиль. На рис. 3 представлені епюри поздовжніх сил і тангенціальних згинних моментів у зовнішньому контурі, а також епюри поздовжніх сил і поперечних згинних моментів у внутрішньому контурі. Також отримані ізолінії мембранних напружень в межах фрагменту тонколистової оболонки. Максимальні напруження мають локальний характер розповсюдження в області розвитку пластичних деформацій і досягають $3500-3700 \text{ кгс/см}^2$ ($350-370 \text{ МПа}$), тобто у межах $\sigma^T = 3400 \text{ кгс/см}^2$ для площадки текучості якісної легованої сталі 09Г2С ($\sigma^T = 3300 \text{ кгс/см}^2$) при повторному навантаженні (з урахуванням зміцнення матеріалу сталі на 10%). Мінімальні стискаючі напруження у тонколистовій оболонці спостерігаються в області примикання (II типу) і досягають величини $\sigma^{\min} = -4000 \text{ кгс/см}^2$, що відповідає граничній величині втрати локальної стійкості для сталі 09Г2С, тобто маємо одновісний напружений стан, але зони складкоутворення запропонованої конструкції тонколистової оболонки практично виключаються.

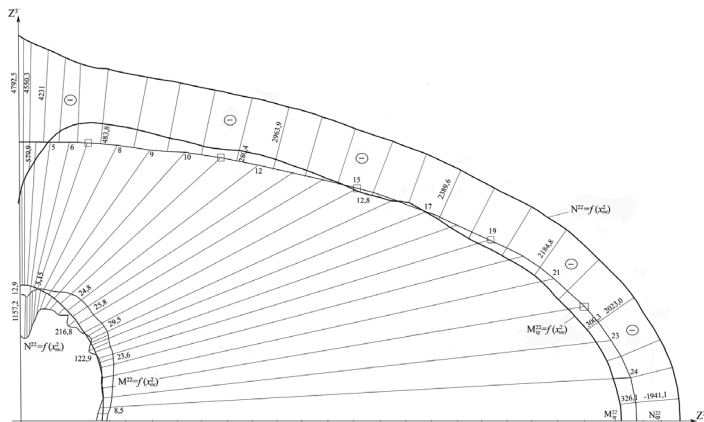


Рис. 3. Епюри поздовжніх сил і тангенціальних згинних моментів в опорному і внутрішньому контурах

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Цыхановський В. К. Несущая способность комбинированных оболочечных конструкций с учётом развития пластических деформаций / В. К. Цыхановський, С. М. Козловец, Н. А. Костыра // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2008. – №3. – К.: ВАТ “УкрНДІпроектстальконструкція” ім. В.М. Шимановського. – С. 17–21.
2. Баженов В. А. Метод скінченних елементів у задачах нелінійного деформування тонких та м'яких оболонок / В. А. Баженов, В. К. Цыхановський, В. М. Кислоокий. – Київ: КНУБА, 2000. – 386 с.
3. Шимановский А. В. Теория и расчет сильнонелинейных конструкций / А. В. Шимановский, В. К. Цыхановский – К.: Изд-во «Сталь», 2005. – 432 с.
4. Цыхановский В. К. Расчет тонких плит на упругом основании методом конечных элементов / В. К. Цыхановский, С. М. Козловец, А. С. Коряк. – К.: Изд-во «Сталь», 2008. – 234 с.
5. Цыхановський В. К. Оптимізація форми і структури комбінованої оболонкової системи / В. К. Цыхановський, С. М. Козловець, Н. О. Чабан // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – Київ: КНУБА, 2007. – №77. – С. 51–62.
6. Хог Э. Прикладное оптимальное проектирование: Механические системы и конструкции / Э. Хог, Я. Арора; пер. с англ. В. М. Картвелишвили и А. А. Меликяна. – М.: Мир, 1983. – 478 с.
7. Теллес Д. К. Ф. Применение метода граничных элементов для решения неупругих задач / Д. К. Ф. Теллес; пер. с англ. канд. техн. наук В. Н. Сидорова. – М.: Стройиздат, 1987. – 160 с.
8. Прагер В. Введение в механику сплошных сред / В. Прагер. – М.: ИЛ, 1963. – 312 с.
9. Химельблау Д. Прикладное нелинейное программирование / Д. Химельблау; пер. с англ. канд. техн. наук В. Н. Сидорова. – М.: Мир, 1975. – 534 с.

УДК 69.059.7:728

ФОРМУВАННЯ СУКУПНОСТІ СПОСОБІВ КОМПЛЕКСНОЇ РЕКОНСТРУКЦІЇ БУДІВЕЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ ЖИТЛОВОЇ ЗАБУДОВИ

к.т.н., доц. Кравчуновська Т.С.

Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»

Постановка проблеми та її зв'язок із науковими і практичними завданнями. Відносини у сфері комплексної реконструкції житлової забудови регулюються Конституцією України, Цивільним, Господарським і Земельним кодексами України, Законом України «Про регулювання