

УДК 539.3

Кривенко О.П. канд. техн. наук

ВПЛИВ КОМБІНОВАНОГО ЗАКРІПЛЕННЯ КОНТУРУ НА СТІЙКІСТЬ ПОЛОГИХ КВАДРАТНИХ У ПЛАНІ ПАНЕЛЕЙ

Вивчається вплив на втрату стійкості квадратної в плані сферичної панелі умов комбінованого закріплення контуру. Порівнюються два способи часткової заміни жорсткого затиснення контуру панелі на шарнірне опирання.

Несуча спроможність пологих панелей суттєво залежить від впливу комбінованих граничних умов на стійкість оболонок. У роботі [1] при дослідженні за скінченноелементною методикою [2-4] стійкості пологої осесиметричної сферичної панелі виявлена нелінійна залежність величини верхнього критичного навантаження від поступової заміни одного типу граничних умов (жорстке затиснення) на другий (шарнірне опирання). Важливим представляється проведення аналогічних досліджень для сферичних оболонок з іншою конфігурацією в плані – квадратною.

Квадратна в плані сферична панель сталі товщини навантажувалася зовнішнім рівномірним тиском інтенсивністю q (рис. 1, а). Матеріал оболонки – ізотропний. Для порівняння з пологою оболонкою обертання [1] розглянута квадратна в плані сферична панель, що має однакову з нею масу та стрілу підйому. Для розглядуваної панелі прийняті наступні вихідні дані: модуль пружності $E = 19.6 \cdot 10^4$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0.3$, товщина $h = 0.01$ м, стріла підйому $H = 4h$, розмір опорного контуру $a = 177.2h$, радіус серединної поверхні $R = 1968.49h$, параметр кривизни $K = 32$ ($K = 2a^2 / (Rh)$). Результати досліджень подані з використанням безрозмірних параметрів навантаження $\bar{q} = a^4 q / (Eh^4)$ і прогину $\bar{u}' = u' / h$, де u' – прогин панелі вздовж осі x' .

Збіжність розв'язків для шарнірно опертої сферичної панелі при $K = 32$, $R = 225h$, $a = 60h$ досліджена в роботі [5], де отриманий гарний збіг з розв'язком роботи [6]. Форми деформування панелі мають дві площини симетрії [5, 6], тому в дослідженні в якості розрахункового фрагмента прийнята чверть панелі з сіткою 18×18 СЕ, яка забезпечує збіжність розв'язків.

Досліджувався вплив на стійкість оболонки двох варіантів поступової заміни жорсткого затиснення на шарнірне опирання. У першому варіанті заміщення виконувалося, починаючи з центра бічної грані панелі

(рис. 1, б), у другому – з кута панелі (рис. 1, в). В обох випадках область шарнірного опирання скінченноелементної моделі оболонки b характеризується безрозмірним параметром $\bar{b} = 2b/a$ ($0 \leq \bar{b} \leq 1$). Значення $\bar{b} = 0$ відповідає умові жорсткого затиснення всієї панелі, а $\bar{b} = 1$ – умові її шарнірного опирання.

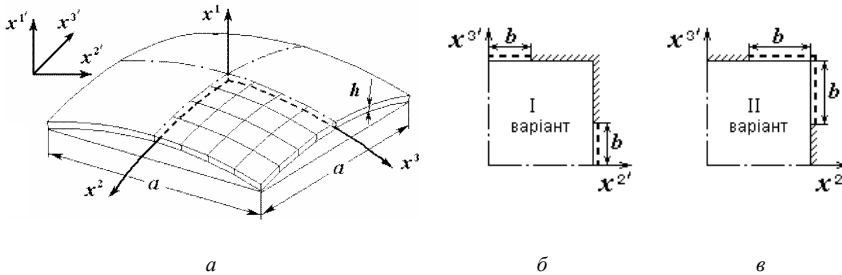


Рис. 1. Сферична панель з двома варіантами комбінованого закріплення

На рис. 2 показана еволюція діаграм “навантаження-прогин” в центрі панелі при зміні граничних умов за першим та другим варіантами. У всіх випадках діаграми мають вигляд, що характерний для втрати стійкості пологих панелей. Менший вплив на еволюцію діаграм справляє заміщення жорсткого затиснення контуру на шарнірне опирання за другим способом. Це пояснюється тим, що перехід на більш слабкі граничні умови відбувається з кутів, область яких відповідає більшій жорсткості панелі. У докритичній області діаграми практично збігаються.

У першому варіанті (рис. 2, а, табл. 1) збільшення зони шарнірного опирання позначається на зміні діаграми ($\bar{b} = 0$) починаючи вже з $\bar{b} \geq 2/9$. При $\bar{b} \geq 6/9$ діаграми співпадають з випадком повного шарнірного опирання ($\bar{b} = 1$).

У другому варіанті (рис. 2, б) при $0 \leq \bar{b} \leq 6/9$ діаграми співпадають з випадком повного жорсткого затиснення ($\bar{b} = 0$). Зменшення нижнього критичного навантаження при невеликому зростанні верхнього критичного навантаження спостерігається лише при $\bar{b} = 7/9$ і $\bar{b} = 8/9$. При цьому на відміну від першого варіанта зміни граничних умов збіг діаграм з випадком повного шарнірного опирання ($\bar{b} = 1$) не спостерігається.

Згідно до розрахунків у докритичній області для всіх варіантів граничних умов у розв’язках на діаграмах “навантаження-прогин” відсутні точки розгалуження. Точки розгалуження та сходження гілок розв’язків розміщуються лише на нестійких ділянках діаграм

“навантаження-прогин” – між верхньою $\bar{q}_{кр}^e$ та нижньою $\bar{q}_{кр}^н$ критичними точками для випадків: повного шарнірного опирання ($\bar{b}=1$) і для першого варіанта зміни граничних умов при $\bar{b} \geq 4/9$. В інших випадках точки розгалуження не спостерігаються.

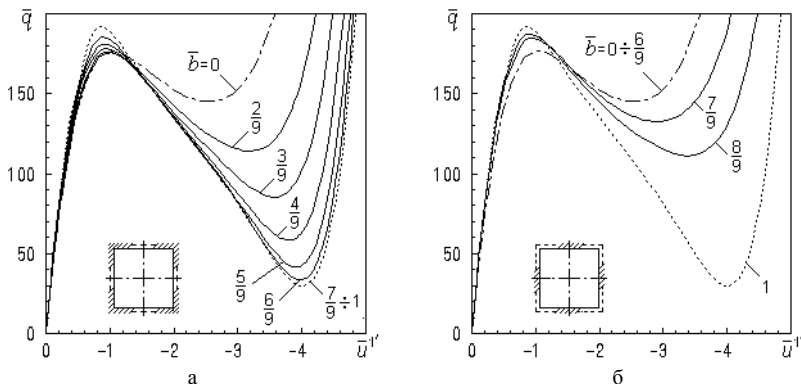


Рис. 2. Еволюція діаграм “навантаження-прогин” для першого (а) та другого (б) варіантів зміни граничних умов

Аналіз результатів виявив нелінійну залежність величин критичних навантажень від параметра \bar{b} (рис. 3, табл. 1, табл. 2). При повній заміні жорсткого затиснення ($\bar{b}=0$) на шарнірне опирання ($\bar{b}=1$) величина верхнього критичного навантаження $\bar{q}_{кр}^e$ збільшилася на 8.56%, а величина нижнього критичного навантаження $\bar{q}_{кр}^н$ зменшилася на 79.28%. Для відповідної пологої осесиметричної сферичної панелі з $k=4$ при однорідних граничних умовах також існує подібна відмінність між величинами критичних навантажень, яка складає 10% [1] і 14% [7].

Збільшення зони шарнірного опирання за першим варіантом (рис. 3, табл. 1) призводить до поступового зниження нижнього критичного навантаження $\bar{q}_{кр}^н$. В той же час верхнє критичне навантаження $\bar{q}_{кр}^e$ спочатку ($0 < \bar{b} \leq 2/9$) дещо падає (0.51%), а надалі ($\bar{b} > 2/9$) – зростає.

Для другого варіанта (рис. 3, табл. 2) характерним є сталість верхнього і нижнього критичних навантажень при зміні параметра \bar{b} в діапазоні $0 \leq \bar{b} \leq 5/9$. В закритичній області при однаковій величині зони шарнірного опирання (при $\bar{b} > 5/9$) в другому варіанті у порівнянні з першим

відмічається поступове прискорення зменшення величини нижнього критичного навантаження (рис. 3).

Характер зміни форм втрати стійкості панелей при зміні граничних умов наведений на рис. 4. На рис. 4

подані перерізи оболонки в площині $x^3 = 0$. Вихідній формі панелі відповідає штрих-пунктирна лінія з позначкою $\bar{q} = 0$. У всіх випадках форма втрати стійкості панелей відповідає загальній втраті стійкості оболонки з прокладуванням її центральної частини і має вид (рис. 5). У першому і другому варіантах способу зміни граничних умов спостерігається незмінна точка деформованих форм (вузол кривих точка А). У першому варіанті вона зміщена в напрямку центра панелі (рис. 4, а), у другому – вбік контуру (рис. 4, б). У другому варіанті при всіх значеннях $\bar{b} < 1$ форма панелі

не змінюється від контуру до точки вузла А.

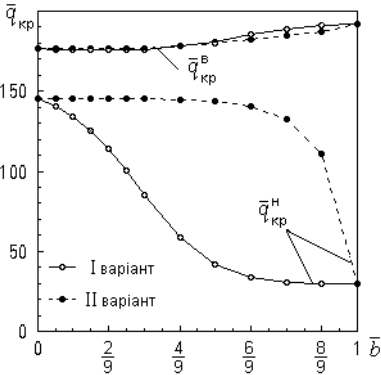


Рис. 3. Залежність верхнього та нижнього критичних навантажень від величини області шарнірного опирання

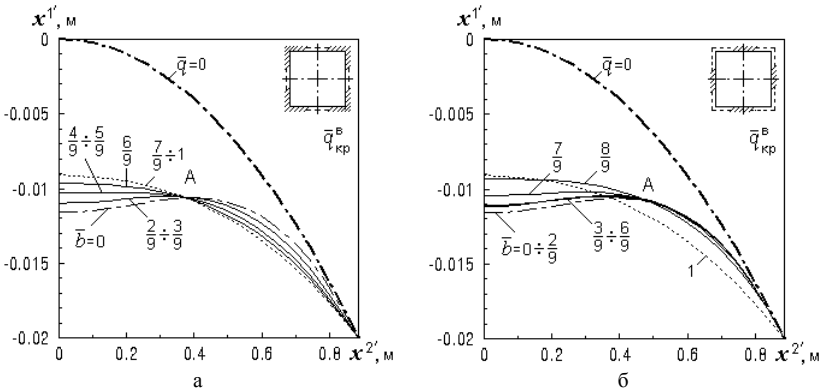


Рис. 4. Еволюція форм втрати стійкості при зміні комбінованих граничних умов

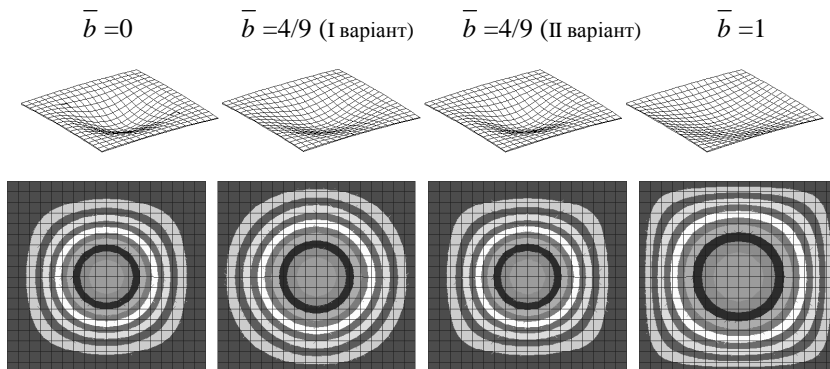


Рис. 5. Форми і муарові смуги прогинів панелі при втраті стійкості при зміні граничних умов

Проведені дослідження дозволили виявити існуючі нелінійні закономірності втрати стійкості пологих сферичних панелей при послідовній зміні областей комбінованого закріплення контуру. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні різноманітних несучих оболонкових конструкцій та їхніх елементів.

Таблиця 1

Вплив на несучу спроможність панелі зміни граничних умов за I варіантом

\bar{b}	$\bar{q}_{кр}^e$	$\Delta(\bar{q}_{кр}^e), \%$	$\bar{q}_{кр}^H$	$\Delta(\bar{q}_{кр}^H), \%$
0	176.4	0	145.1	0
1/18	176.1	-0.17	140.7	-3.03
1/9	175.1	-0.40	134.5	-7.30
1/6	175.6	-0.45	125.6	-13.44
2/9	175.5	-0.51	114.0	-21.43
5/18	175.6	-0.45	100.2	-30.94
3/9	176.2	-0.11	85.3	-41.18
4/9	178.2	1.02	58.6	-59.59
5/9	180.9	2.55	41.7	-71.26
6/9	185.2	4.99	33.7	-76.79
7/9	188.3	6.75	30.8	-78.74
8/9	191.0	8.28	30.1	-79.22
1	191.5	8.56	30.1	-79.28

Таблиця 2

Вплив на несучу спроможність панелі зміни граничних умов за II варіантом

\bar{b}	$\bar{q}_{кр}^e$	$\Delta(\bar{q}_{кр}^e), \%$	$\bar{q}_{кр}^H$	$\Delta(\bar{q}_{кр}^H), \%$
0	176.4	0	145.1	0
1/18	176.4	0	145.1	0
1/9	176.4	0	145.1	0
1/6	176.4	0	145.1	0
2/9	176.5	0.06	145.1	0
5/18	176.6	0.11	145.1	0
3/9	176.9	0.28	145.1	0
4/9	177.9	0.85	144.9	-0.14
5/9	179.8	1.93	144.1	-0.69
6/9	182.1	3.23	140.9	-2.89
7/9	184.7	4.71	132.6	-8.61
8/9	187.1	6.07	111.2	-23.23
1	191.5	8.56	30.1	-79.28

1. *Кривенко О.П.* Вплив комбінованих граничних умов на стійкість пологих оболонок обертаня // Опір матеріалів і теорія споруд: Наук.-тех. збірн. - К.: КНУБА, 2007 р. - №81. – С. 84-90.
2. *Баженов В.А., Соловей М.О., Кривенко О.П.* Нелінійні рівняння деформування тонких багатошарових поребричних оболонок при термосилових навантаженнях // Опір матеріалів і теорія споруд: Наук.-тех. збірн. - К.: КДТУБА. - 1998. - Вип. 64. - С. 116-127.
3. *Баженов В.А., Соловей Н.А., Кривенко О.П.* Нелинейные уравнения МКЭ в задачах устойчивости неоднородных оболочек // Математическое моделирование в механике сплошных сред на основе методов граничных и конечных элементов: Доклады XVII Международной конференции. - СПб.: НИИХ СПбГУ, 1999. С. 40-44.
4. *Баженов В.А., Соловей М.О., Кривенко О.П.* Співвідношення моментної схеми скінчених елементів у задачах стійкості неоднорідних оболонок при термосилових навантаженнях // Опір матеріалів і теорія споруд: Наук.-тех. збірн. К.: КНУБА, 1999. - Вип. 66. - С. 22-25.
5. *Баженов В.А., Соловей М.О., Кривенко О.П.* Стійкість гладких, ребристих та послаблених вирізами гнучких пологих панелей // Опір матеріалів і теорія споруд: Наук.-тех. збірн. - К.: КНУБА, 2000 р. - Вип.67. - С. 92-103.
6. *Ильин В.П., Картов В.В.* Устойчивость ребристых оболочек при больших перемещениях. - Л.: Стройиздат, 1986. - 168 с.
7. *Валивиши Н.В.* Методы расчета оболочек вращения на ЭЦВМ. - М.: Машиностроение, 1976. - 278 с.