

УДК 539.3

Соловей М.О. канд. техн. наук  
Кривенко О.П.

## ВПЛИВ НАГРІВУ НА СТІЙКІСТЬ ГРАНОВАНИХ ПОЛОГИХ СФЕРИЧНИХ ОБОЛОНОК

Робота є продовженням виконаних за розробленою скінченноелементною методикою [1-3] досліджень стійкості гнучких оболонок різної змінної товщини однакових об'ємів [4-7]. У роботах [4-6] порівнювалась поведінка та несуча спроможність пологих змінної товщини сферичних (гладких і гранованих) оболонок жорстко затиснутих уздовж контуру при дії тиску (рис. 1). В [7] розглянутий вплив попереднього нагріву на стійкість гладких пологих сферичних панелей сталі та лінійно-змінної товщини, що навантажуються рівномірно розподіленим тиском. Особливості впливу попереднього нагріву на стійкість гладких оболонок стимулюють розглядання цієї ж мало вивченої проблеми для гранованих оболонок.

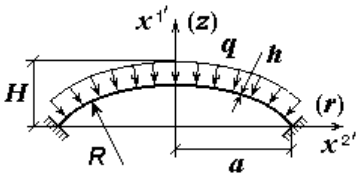


Рис. 1. Сферична панель

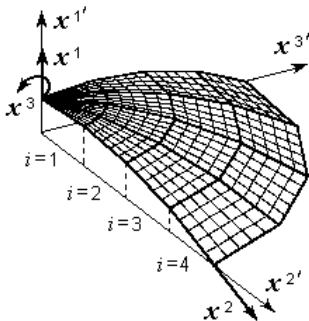


Рис. 2. Скінченноелементна сітка на серединній поверхні гранованої панелі

Розглядається вплив інтенсивності попереднього нагріву на стійкість гранованих сферичних панелей сталі товщини  $h$ . Заміна гладких пологих панелей на грановані, яка застосовується на практиці для спрощення виготовлення оболонок [6], виконана наступним чином. Криволінійна серединна поверхня панелі (рис. 1) замінена на вписану в неї грановану, чверть якої складається з 16 плоских граней, що отримані рівномірним поділом  $4 \times 4$  вздовж радіуса опорного контуру та по колу (рис. 2).

У виконаних чисельних розрахунках вихідні геометричні та термопружні величини панелей мають ті ж самі чисельні значення, як і у розглянутих в [4-7] прикладах. Це дає можливість

дослідити вплив попереднього нагріву на розглянуті грановані оболонки. Прийняті наступні вихідні величини: стріла підйому  $H=0.05$  м, радіус серединної поверхні  $R=10.025$  м, радіус опорного контуру  $a=1$  м, характерна товщина  $h^* = 0.01$  м, модуль пружності (для сталі)  $E = 19.6 \cdot 10^4$  МПа, коефіцієнт Пуассона  $\nu=0.3$ , коефіцієнт лінійного теплового розширення  $\alpha = 0.125 \cdot 10^{-4}$  град $^{-1}$ . Властивості матеріалу вважаються сталими та незалежними від температури, бо для розглянутих сталевих оболонок температура нагрівання не виходила за допустимі межі ( $-10^\circ\text{C} \div +100^\circ\text{C}$  [8]).

Дослідження збіжності показали, що для моделювання однієї плоскої грані достатньо є сітка  $5 \times 5$  скінчених елементів (СЕ), а для всієї розрахункової моделі (чверть панелі) -  $20 \times 20$  СЕ.

Дія на сталеву оболонку нагріву та тиску розглядається як спільний процес навантаження, що виконується за два етапи:

1) На першому етапі оболонка нагрівається рівномірно по об'єму на  $T$  градусів. Цей процес, що супроводжується нелінійним деформуванням, може розглядатись як попереднє збурення напружено-деформованого стану оболонки, яке позначається на формах її деформування та втрати стійкості при подальшому силовому навантаженні.

2) На другому етапі оболонка навантажується тиском інтенсивністю  $q$  при незмінному (зафіксованому) температурному полі, в результаті чого вона може втратити стійкість.

Дослідження проводились при порівнянні трьох пар гладких і гранованих оболонок сталюї товщини  $h$  (0.010 м, 0.013 м, 0.020 м) при чотирьох варіантах рівномірного нагріву на  $T^\circ\text{C}$  ( $-10^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $100^\circ$ ). Результати і аналіз розрахунків представлені на рис. 3, рис. 4 та в табл. 1 - табл. 3. На рис. 3 результати розрахунків усіх панелей (з табл. 1) зображені у відносному вигляді. Критичні навантаження (верхнє  $\tilde{q}_{kp}^6$  та нижнє  $\tilde{q}_{kp}^h$ ) представлені на осі  $\tilde{q}_{kp}$  як доля від верхнього критичного навантаження  $q_{kp}^6(h^*)$  гладкої оболонки сталюї товщини  $h^*$ , а об'єми  $\tilde{V}$  - у долях об'єму цієї ж оболонки  $V(h^*)$

$$\tilde{q}_{kp} = q_{kp} / q_{kp}^6(h^*), \quad \tilde{V} = V / V(h^*).$$

Величини критичних навантажень і відповідних прогинів центра для гладких і гранованих оболонок при різних інтенсивностях попереднього нагріву

$T, ^\circ\text{C}$	$q_{кр}, \text{МПа}$ $u_{кр}^I, \text{м}$	$h, \text{м}$					
		0.010		0.013		0.020	
		Гладка	Грано-вана	Гладка	Грано-вана	Гладка	Грано-вана
		$V \times 10^5, \text{м}^3$	$V \times 10^5, \text{м}^3$	$V \times 10^5, \text{м}^3$	$V \times 10^5, \text{м}^3$	$V \times 10^5, \text{м}^3$	$V \times 10^5, \text{м}^3$
		3146	3069	4196	4094	6274	6119
-10	$q_{кр}^e$	0.1870	0.2024	0.2267	0.2381	0.4788	0.5056
	$q_{кр}^н$	0.0517	0.0554	0.1148	0.1222	0.3736	0.3958
	$u_{кр}^{Ie}$	-1.0030	-0,9794	-1.4280	-1.4680	2.1900	2.2460
	$u_{кр}^{In}$	-6.9630	-6.9480	-6.4930	-6.4300	-5.7620	-5.7110
0	$q_{кр}^e$	0.2261	0.2365	0.2668	0.2748	0.5375	0.5652
	$q_{кр}^н$	0.0556	0.0597	0.1212	0.1289	0.3901	0.4107
	$u_{кр}^{Ie}$	-0.6770	-0.6930	-1.1507	-1.1633	-1.9428	-2.0781
	$u_{кр}^{In}$	-7.2451	-7.1818	-6.8383	-6.7671	-6.0353	-6.0413
20	$q_{кр}^e$	0.2826	0.3032	0,3266	0,3451	0.6629	0.6958
	$q_{кр}^н$	0.0640	0.0681	0.1351	0.1428	0.4158	0.4389
	$u_{кр}^{Ie}$	-0.1882	-0.1675	-0.7690	-0.7068	-1.5560	-1.5350
	$u_{кр}^{In}$	-7.7400	-7.6590	-7.2680	-7.2580	-6.4770	-6.4180
100	$q_{кр}^e$	0.1817	0.1930	0.4338	0.4609	1.2053	1.3630
	$q_{кр}^н$	0.1010	0.1057	0.1960	0.2057	0.5328	0.5458
	$u_{кр}^{Ie}$	0.6449	0.6091	0.4949	0.5353	-0.1677	-0.1238
	$u_{кр}^{In}$	-9.0390	-9.1040	-8.7310	-8.7100	-7.9591	-7.9940

Таблиця 2

Оцінка впливу інтенсивностей попередніх нагрівів на величини критичних навантажень гранованих панелей (відносно ненагрітих)

$h, \text{ м}$	$\Delta(q_{кр}^e), \%$			$\Delta(q_{кр}^H), \%$		
	$-10^\circ \text{ C}$	$20^\circ \text{ C}$	$100^\circ \text{ C}$	$-10^\circ \text{ C}$	$20^\circ \text{ C}$	$100^\circ \text{ C}$
0.010	-14.4	28.2	-18.4	-7.2	14.1	77.0
0.013	-13.4	25.6	67.7	-5.2	10.8	59.6
0.020	-10.5	23.1	141.1	-3.6	6.9	32.9

Таблиця 3

Різниця критичних навантажень, прогинів центра й об'ємів гранованих і гладких оболонок однакової товщини (відносно гладких)

$h, \text{ м}$	$\Delta(V), \%$	$\Delta(q_{кр}^e), \%; \Delta(u_{кр}^{I^e}), \%$				$\Delta(q_{кр}^H), \%; \Delta(u_{кр}^{I^H}), \%$			
		$-10^\circ \text{ C}$	$0^\circ \text{ C}$	$20^\circ \text{ C}$	$100^\circ \text{ C}$	$-10^\circ \text{ C}$	$0^\circ \text{ C}$	$20^\circ \text{ C}$	$100^\circ \text{ C}$
0.010	-2.45	8.2	4.6	7.3	6.2	7.2	7.4	6.4	4.6
		-2.4	2.4	-11.0	-5.5	-0.2	-0.9	-1.0	0.7
0.013	-2.43	5.0	3.0	5.7	6.2	6.4	6.3	5.7	4.9
		2.8	1.1	-8.1	8.2	-1.0	-1.0	-0.1	-0.2
0.020	-2.47	5.6	5.2	5.0	13.1	5.9	5.9	5.5	2.4
		2.6	7.0	-1.3	-18.3	-0.9	0.1	-0.9	0.5

Величина інтенсивності попереднього нагріву неоднаково впливає на втрату стійкості гранованих оболонок різної товщини (табл. 2). Охолодження панелей на  $10^\circ \text{ C}$  призводить до появи стискуючих напружень і тому природнім є падіння (у порівнянні з ненагрітими) величин верхнього (на 10.5% - 14.4%) та нижнього (на 3.6% - 7.2%) критичних навантажень (рис. 3,а).

Нагрів відносно тонкої ( $h=0.01\text{ м}$ ) гранованої оболонки на  $20^\circ \text{ C}$  призводить до підвищення  $q_{кр}^e$  на 28.2%. Більш інтенсивний нагрів на  $100^\circ \text{ C}$  викликає, як і в випадку гладкої оболонки такої ж товщини [7], зворотній ефект - падіння  $q_{кр}^e$  на 18.4%. Виявлена нелінійна залежність зміни  $q_{кр}^e$  при зміні інтенсивності попереднього нагріву пояснюється (як і у випадку гладких панелей) еволюцією відповідних форм деформування та втрати стійкості (рис. 8, рис. 12 в [7]).

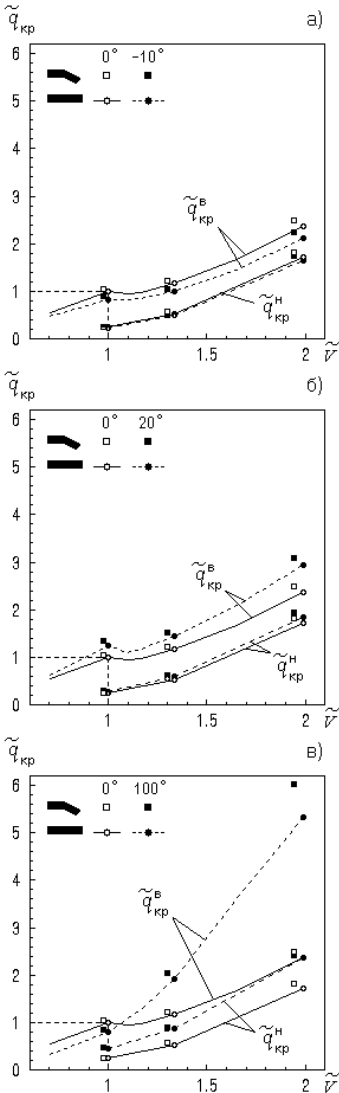


Рис. 3. Залежності " $\tilde{q}_{кр} - \tilde{V}$ " для гранованих і гладких панелей при попередньому нагріві

Для більш товстих гранованих оболонок ( $h=0.013\text{м}$ ,  $h=0.020\text{м}$ ) підвищення інтенсивності попереднього нагріву веде до послідовного

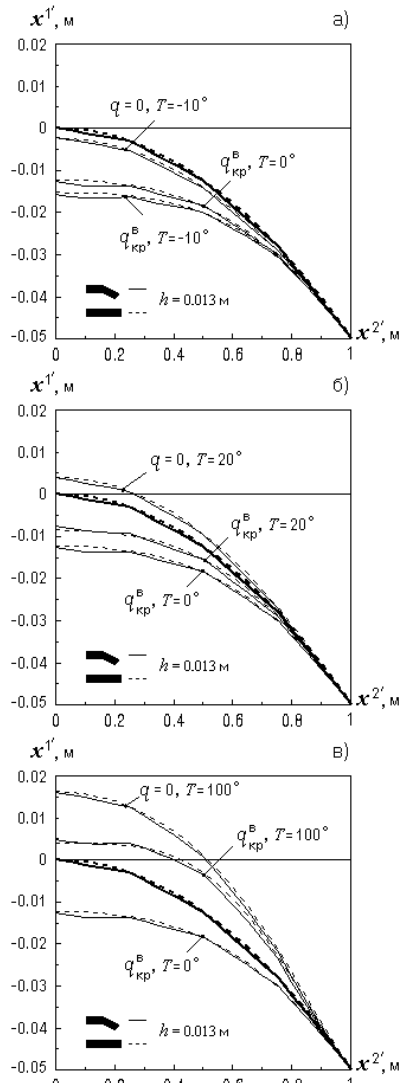


Рис. 4. Форми деформування та втрати стійкості гранованою і гладкою панелями сталой товщини ( $\tilde{V} = 1.334$ )

зростання величин верхнього та нижнього критичних навантажень. Так нагрів на 20°C збільшує  $q_{кр}^{\epsilon}$  відповідно в 1.25 і 1.23 рази, а нагрів на 100°C - в 1.67 і 2.41 рази (рис. 3,б та рис. 3,в).

Розглядаючи вплив попереднього нагріву на несучу спроможність гранованих і гладких оболонок, можна сказати наступне. При заміні гладких панелей на грановані об'єми останніх зменшуються (незалежно від товщин панелей) на 2.5% (табл. 1, табл. 3). При цьому для усіх розглянутих прикладів відбувається тільки збільшення критичних навантажень: верхніх - у межах 3% - 13.1%, нижніх - у межах 2.4 % - 7.4%.

Для гранованих і гладких панелей форми нелінійного деформування та форми втрати стійкості практично не розрізняються, як це видно на прикладі оболонок товщиною  $h=0.013$ м при різних величинах попередніх нагрівів (рис. 4,а,б,в, де вихідна форма панелей зображена жирними лініями). Співпадіння форм деформування, очевидно, пояснюється пологістю розглянутих панелей.

Таким чином, в проведених дослідженнях виявлений суттєвий вплив попереднього нагріву на несучу спроможність пологих гранованих панелей при дії тиску. Доцільність використання на практиці пологих гранованих панелей доводиться їх порівнянням з гладкими тієї ж товщини: при спрощенні виготовлення маємо, хоч і незначне, але підвищення несучої спроможності конструкції.

1. *Баженов В.А., Соловей М.О., Кривенко О.П.* Нелінійні рівняння деформування тонких багатошарових оболонок при термосилових навантаженнях // Опір матеріалів і теорія споруд: Наук.-тех. збірн. - К.: КДТУБА, 1998. - Вип. 64. - С. 116-127.
2. *Баженов В.А., Соловей М.О., Кривенко О.П., Аят Н.* Стійкість гнучких оболонок в умовах складного термосилового навантаження // Опір матеріалів і теорія споруд: Наук.-тех. збірн. - К.: КДТУБА, 1999. - Вип. 65. - С. 75-90.
3. *Баженов В.А., Соловей М.О., Кривенко О.П.* Співвідношення моментної схеми скінченних 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.
4. *Баженов В.А., Соловей Н.А., Кривенко О.П.* Вплив змінної товщини на стійкість пологих панелей при дії рівномірного тиску // Системні технології. Математичні проблеми технічної механіки. Збірник наукових праць. - Випуск 4(27).- Дніпропетровськ: "Сист. тех.", 2003. - С. 15-20.
5. *Баженов В.А., Соловей Н.А., Кривенко О.П.* Устойчивость пологих оболочек вращения линейно-переменной толщины // Авиационно-космическая техника и технология. - 2004. - N 2 (10). - С. 18-25.
6. *Соловей М.О., Кривенко О.П.* Аналіз стійкості гладких лінійно-змінної та гранованих ступінчато-змінної товщини пологих сферичних оболонок // Опір матеріалів і теорія споруд: Наук.-тех. збірн. - К.: КНУБА, 2003 р. - Вип. 72. - С. 83-96.

7. Соловей М.О., Кривенко О.П. Вплив нагріву на стійкість гладких пологих сферичних оболонок лінійно-змінної товщини // Опір матеріалів і теорія споруд: Наук.-тех. збірн. - К.: КНУБА, 2004 р. - Вип. 74.
8. Металлические конструкции. В 3-х томах. Т 1. Элементы стальных конструкций: Учеб. пособие для строит. вузов / В.В.Горев, Б.Ю.Уваров, В.В. Филиппов и др.; Под ред. В.В.Горева. - М.: Высш. школа, 1997. - 527 с.

*Матеріал надійшов до редакції 01.10.04.*