

УДК 539.3

Баженов В.А. д-р техн. наук
Кривенко О.П. канд. техн. наук
Соловей М.О. канд. техн. наук

ВПЛИВ РЕЖИМІВ ТЕРМОСИЛОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА СТІЙКІСТЬ І ПОЗАКРИТИЧНУ ПОВЕДІНКУ ОБОЛОНОК СТАЛОЇ ТА СТУПІНЧАТО-ЗМІННОЇ ТОВЩИНИ

Розглянуті питання впливу різних режимів комбінованої дії рівномірно розподіленого тиску та нерівномірного за товщиною температурного поля на втрату стійкості та позакритичну поведінку оболонок сталюї та ступінчато-змінної товщини (з ребрами, каналами й отворами).

Тонкостінні оболонкові конструкції широко використовуються в різних галузях сучасної техніки. При експлуатації вони знаходяться під дією різноманітних силових і температурних навантажень. Температурні поля можуть суттєво впливати на напружено-деформований стан і бути важливим фактором, від якого залежить несуча спроможність конструкції. Руйнування тонких оболонок у таких випадках відбувається, як правило, через різку зміну форми – випучування. Проектувальника може цікавити не тільки момент втрати стійкості, але й позакритична поведінка конструкції. Врахування самозрівноважених внутрішніх напружень від температурних деформацій, що істотно впливають на жорсткість конструкції, дозволяє уточнити величину зовнішнього силового критичного навантаження та поведінку оболонки в до- та позакритичній областях. Різні варіанти термосилового навантаження зустрічаються, наприклад, при розрахунках елементів авіаційних, космічних, будівельних та інших конструкцій внаслідок перепаду температур між тонкою обшивкою та елементами силового каркасу [1, 2].

З технологічних причин оболонки можуть бути послаблені виїмками, каналами, отворами, мати зломи серединної поверхні. З метою запобігання втрати стійкості оболонки проектують змінної товщини, підкріплюють ребрами, накладками. Ці способи раціонального розподілу матеріалу за товщиною звичайно підвищують загальну жорсткість конструкції. Вплив різних законів термосилового навантаження на нелінійне деформування та втрату стійкості подібних конструкцій досліджений у теперішній час недостатньо.

Робота продовжує дослідження за розробленою скінченноелементною методикою [3-5] стійкості гнучких неоднорідних оболонок з різними геометричними особливостями за товщиною [6-14]. У роботах [6-11]

виконаний порівняльний аналіз нелінійних розв'язків тонких гнучких панелей змінної товщини при дії тиску: ребристих, з каналами, виїмками, отворами [6-8], лінійно-змінної товщини та гранованих [9-11]. Дослідженню стійкості та порівнянню несучої спроможності оболонок сталюї та лінійно-змінної товщини при термосиловому навантаженні присвячені роботи [12-14].

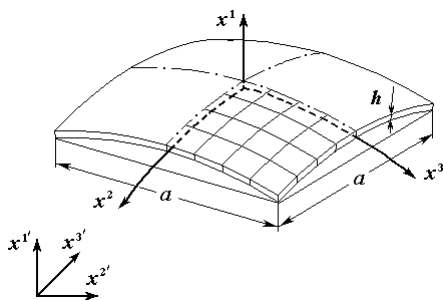


Рис. 1. Полога сферична панель

У даній роботі приведені важливі для практики результати досліджень впливу різних режимів спільної дії температурного та силового навантажень на втрату стійкості та позакритичну поведінку оболонок сталюї та ступінчато-змінної товщини. Дослідження виконані на прикладі пологих квадратних у плані сферичних панелей (рис. 1), які виготовлені з ізотропного матеріалу (E –

модуль пружності, ν – коефіцієнт Пуассона, α – коефіцієнт лінійного теплового розширення). Властивості матеріалу вважаються сталими та незалежними від температури. Кривина панелі визначається параметром $K = 2a^2/(Rh)$ [15], де h – товщина обшивки, a – розмір у плані, R – радіус серединної поверхні. За розрахунку в усіх випадках приймалася скінченноелементна модель у вигляді чверті оболонки, що має дві площини симетрії.

1. У першому дослідженні порівнюється поведінка оболонки сталюї товщини при трьох видах термосилових навантажень: 1) рівномірний нормальний тиск інтенсивністю q ; 2) нерівномірний нагрів; 3) спільна дія тиску та нагріву. При нерівномірному нагріві температура вздовж товщини змінюється за лінійним законом таким чином, що зовнішня поверхня панелі охолоджується на таку ж саму величину $T^\circ C$, на яку нагрівається її внутрішня поверхня (температура серединної поверхні залишається незмінною). На краях панель шарнірно скріплена з ребрами, що абсолютно жорсткі на згин у напрямку нормалі та гнучкі у площині дотичній до серединної поверхні оболонки. Кінцеві перерізи панелі закріплені від переміщень вздовж ребер. Прийняті наступні вихідні данні:

$$E = 6.963 \cdot 10^4 \text{ МПа}, \nu = 0.3, \alpha = 0.25 \cdot 10^{-4} \text{ град}^{-1}, h = 0.01 \text{ м}, a = 200h, K = 24.$$

При навантаженні тиском втрата стійкості панелі відбувається при величині критичного тиску $q_{кр}^6 = 2.660 \cdot 10^{-3}$ МПа (рис. 2, крива 1). Цей результат у докритичній і на початку позакритичної областей добре співпадає з нелінійним розв'язком [15] (крива 4).

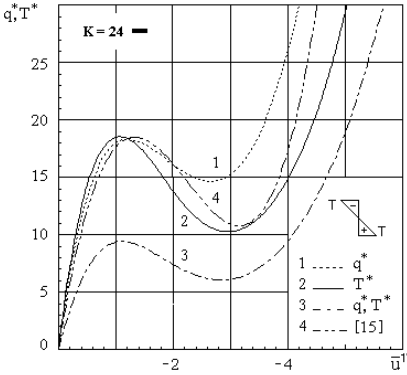


Рис. 2. Діаграми “навантаження–прогин центра панелі”

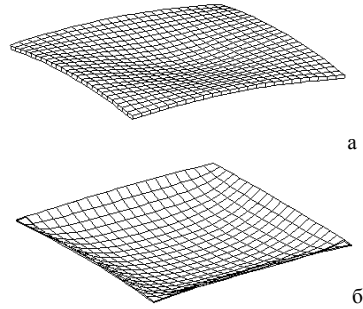
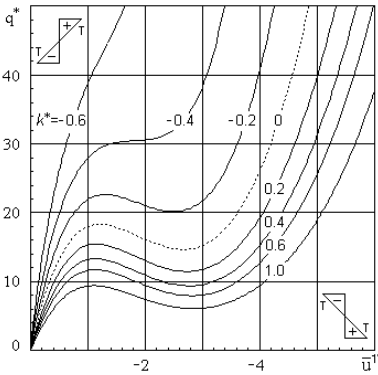
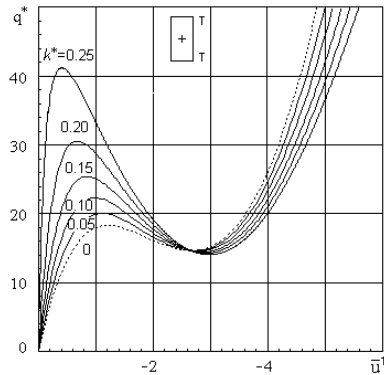


Рис. 3. Форми деформування



а



б

Рис. 4. Діаграми “навантаження–прогин центра панелі”
а) 1-й та 2-й варіанти, нерівномірний нагрів;
б) 3-й варіант, рівномірний нагрів

При нерівномірному нагріві втрата стійкості панелі відбувається при критичній температурі $T_{кр}^6 = 18.548^\circ C$ (крива 2). Для зручності порівняння результати на рис. 2 подані у безрозмірному вигляді

$$q^* = q/k, \quad T^* = T/1^\circ C, \quad \bar{u}^l = u^l/h, \quad (1)$$

де коефіцієнт $k = q_{кр}^6 / T_{кр}^{*6} = 1.4341 \cdot 10^{-4}$ МПа взятий таким, щоб безрозмірні величини $T_{кр}^{*6}$ та $q_{кр}^{*6}$ були чисельно рівні; u^l – переміщення характерної точки оболонки в декартовій системі координат x^l (рис. 1).

Спільне навантаження тиском і температурою виконувалося таким чином, щоб при нагріві на $1^\circ C$ безрозмірні параметри q^* та T^* одночасно зростали на одиницю. Втрата стійкості від такого навантаження відбулася при величині безрозмірних параметрів у два рази меншій – $q_{кр}^{*6} = T_{кр}^{*6} = 9.429$ (крива 3). Таке зниження величини критичного навантаження пояснюється тим, що напрямки одночасної дії тиску та температурного поля співпадають.

Зіставлення результатів розрахунків показує наступне. Для всіх трьох видів навантаження прогини центру панелі в критичних точках практично рівні, форми втрати стійкості (рис. 3, а) та форми деформування панелей у позакритичній області (рис. 3, б) мають однаковий вигляд. Температурне навантаження призводить до більш енергоємного процесу деформування у порівнянні з навантаженням тиском, наслідком чого є більший рівень мембранних і згинних напружень.

2. Продовжимо дослідження розглянутої вище панелі при різних співвідношеннях інтенсивностей нерівномірного температурного нагріву та тиску. Залежність між безрозмірними параметрами інтенсивностей цих двох видів навантажень (1) приймається у вигляді

$$T^* = k^* \cdot q^*, \quad (2)$$

де k^* – коефіцієнт взаємозв'язку параметрів інтенсивностей тиску та температурного нагріву.

Зміна коефіцієнта k^* виконувалась у межах $+1 \div -0.6$. Розглянутий вище варіант $k^* = +1$ є верхньою межею та базою для порівняння. Варіанту $k^* > 0$ відповідає нерівномірний нагрів, при якому верхня поверхня охолоджується на таку саму величину T , на яку нижня нагрівається. Варіанту $k^* < 0$ відповідає нерівномірний нагрів, при якому верхня поверхня нагрівається на таку саму величину T , на яку нижня

оохолоджується. Розглядуваним двом видам нерівномірного нагріву відповідають свої позначки (рис. 4, а). Варіант $k^*=0$ відповідає дії тільки одного тиску.

Зменшення алгебраїчного значення величини коефіцієнта k^* веде до збільшення величин верхнього та нижнього критичних навантажень і зменшення деформативності панелей у позакритичній області. При $k^*\leq-0.4$ оболонка не втрачає стійкість. Таким чином, величину $k^*=-0.4$ можна прийняти за межу безпечної (з точки зору втрати стійкості) спільної дії нерівномірного температурного нагріву та тиску.

3. Замінімо в нашому дослідженні стійкості оболонок нерівномірний за товщиною нагрів на рівномірний (рис. 4, б). У цьому випадку збільшення коефіцієнта k^* від 0 до 0.25 веде до різкого збільшення величини верхнього критичного навантаження при стабілізації величини нижнього критичного навантаження та практично однакового позакритичного деформування. Таким чином, вплив величини інтенсивності рівномірного нагріву найбільш суттєво проявляється у докритичній області.

Узагальнюючи результати наведених вище досліджень, можна зробити висновок, що рівномірний нагрів пологої панелі у сполученні з тиском веде до більш ефективного підвищення несучої спроможності оболонки у порівнянні з розглянутими варіантами нерівномірного нагріву.

4. Вплив на стійкість ребристих оболонок різних варіантів нагріву обшивки та ребер розглянутий на прикладі панелі, яка шарнірно оперта вздовж контуру. Для панелі прийняті наступні вихідні данні:

$E = 20.59 \cdot 10^4$ МПа, $\nu=0.3$, $\alpha = 0.120 \cdot 10^{-4}$ град⁻¹, $h=0.01$ м, $a=60h$, $R=225h$, $K=32$ (рис. 5, а). Оболонка по середині підкріплена із внутрішньої сторони двома перехресними ребрами висотою $h_p=3h$ та

шириною $b_p=2h$. Обшивка панелі та ребра виконані з однакового матеріалу. Розглядалися різні варіанти комбінованої дії рівномірно розподіленого нормального тиску інтенсивністю q , рівномірного нагріву обшивки оболонки на T_o градусів та ребер на T_p градусів. Результати розрахунків подані на рис. 5 - рис. 7 з використанням безрозмірних параметрів: навантаження – $\bar{q} = a^4 q / (E h^4)$, переміщення характерної точки – \bar{u}^I (1), енергії деформування – $\bar{W} = W / (E h^3)$.

Порівнювалися чотири варіанти термосилового навантаження.

У першому варіанті оболонка навантажувалась лише тиском (на рисунках відповідні криві позначені написом: 1. q).

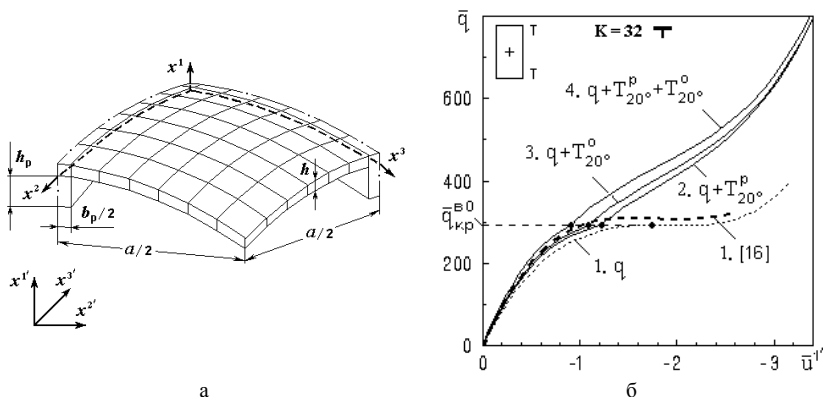


Рис. 5. Діаграми “навантаження–прогин центра ребристої панелі” для чотирьох варіантів комбінованої дії тиску та нагріву

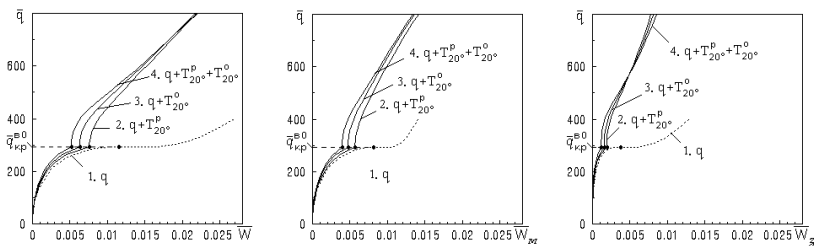


Рис. 6. Діаграми “навантаження–енергія деформування”

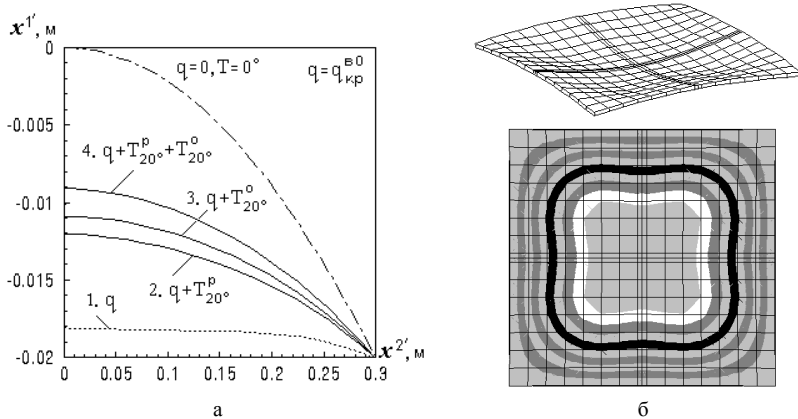


Рис. 7. Форми деформування ребристої сферичної панелі

Порівняльний аналіз результатів при дії лише тиску [6] показав гарний збіг з відомим нелінійним розв'язком [16]. Перший варіант використовується як вихідний для порівняння та визначення впливу різних режимів нагріву на стійкість ребристої оболонки (рис. 5). Відмітимо, що величина верхнього критичного навантаження для ненагрітої панелі становить $\bar{q}_{кр}^{e0} = 293.4$.

Очікувалося, що одночасна дія тиску та рівномірного нагріву всієї оболонки або окремих її частин (обшивки та ребер) призведе до різного підвищення величини верхнього критичного навантаження. Режим термосилового навантаження ребристої оболонки був встановлений наступним чином. У той момент, коли інтенсивність тиску, зростаючи, досягала величини $\bar{q}_{кр}^{e0}$, обшивка та ребра нагрівались відповідно на T^o та T^p градусів. З цього моменту подальша зміна тиску відбувалася при зафіксованому (незмінному) температурному полі.

У другому варіанті навантаження ребра нагрівались на $20^\circ C$, а обшивка при цьому залишалася ненагрітою (2. $q + T_{20}^p$).

У третьому варіанті обшивка нагрівалась на $20^\circ C$, а ребра залишалися ненагрітими (3. $q + T_{20}^o$).

У четвертому варіанті обшивка та ребра нагрівались разом на $20^\circ C$ (4. $q + T_{20}^p + T_{20}^o$).

Усі варіанти додаткової дії нагріву призводять до збільшення жорсткості ребристої оболонки та зникнення явища втрати стійкості (рис. 5, б). Найбільш цей ефект проявляється при одночасному нагріві обшивки та ребер, найменш – при нагріві лише ребер. Зміні режиму термосилового навантаження (в момент припинення зростання нагріву при $\bar{q} = \bar{q}_{кр}^{e0}$) відповідає поява точок злому на діаграмах. При подальшому навантаженні тиском відбувається стабілізація процесу деформування панелей – діаграми “навантаження-прогин центра” збігаються. Деформування ребристої оболонки відбувається з незначною перевагою мембранної \bar{W}_m складової енергії деформування \bar{W} у порівнянні з її згинною \bar{W}_z складовою (рис. 6). Загальна форма деформування панелі для всіх варіантів навантаження однакова (рис. 7, б). Форми деформування ребер, які відповідають різним варіантам навантаження (у

точці $\bar{q} = \bar{q}_{кр}^{e0}$) показані на рис. 7, а. Вихідній формі ребра відповідає крива з позначкою $q = 0, T = 0^{\circ}$.

5. Дослідження впливу на втрату стійкості оболонки послідовності комбінованої дії температурного та силового навантажень виконане на прикладі панелі, що послаблена з внутрішньої сторони чотирма перехресними каналами однакових розмірів: довжиною a , шириною $b_k = 2h$ та глибиною $h_k = 0.3h$ (рис. 8, а). Канали розташовані на відстані $a/3$ від країв оболонки. Вихідні дані для панелі з каналами взяті з попереднього дослідження (пункт 4). Розглянуті три варіанти послідовності дії тиску та рівномірного нагріву (рис. 8 - рис. 10).

У першому варіанті оболонка навантажувалась лише тиском. Порівняльний аналіз результатів при дії лише тиску [6] показав гарний збіг з відомим нелінійним розв'язком. Перший варіант використовується як вихідний для порівняння впливу різних режимів нагріву на стійкість оболонки з каналами (рис. 8, б). Відмітимо, що величина верхнього критичного навантаження для ненагрітої панелі становить $\bar{q}_{кр}^{e0} = 178.8$.

У другому варіанті на оболонку одночасно діють рівномірний нагрів і тиск. У той момент, коли інтенсивність тиску \bar{q} досягає значення $\bar{q}_{кр}^{e0}$, нагрів панелі закінчується при $T=40^{\circ}\text{C}$. З цього моменту подальша зміна тиску відбувається при незмінному температурному полі.

У третьому варіанті оболонка спочатку рівномірно нагрівається на величину $T=40^{\circ}\text{C}$, а потім навантажується рівномірним тиском при зафіксованому температурному полі.

Результати дослідження подані у вигляді діаграм на рис. 8 - рис. 10, на яких для I-го, II-го та III-го варіантів навантаження введені наступні позначення: I, $T=0^{\circ}$; II, $T=40^{\circ}$; III, $T=40^{\circ}$.

Аналіз результатів показав, що в другому варіанті величина верхнього критичного навантаження підвищилась за рахунок температурного поля на 68.3%, у третьому – на 17.7%. Таким чином, другий варіант термосилового навантаження у порівнянні з третім призводить до зростання величини $\bar{q}_{кр}^e$ на 43.0%, значно підвищуючи при цьому

величину нижнього критичного навантаження $\bar{q}_{кр}^h$ – у 11 разів.

Причиною суттєвого збільшення $\bar{q}_{кр}^e$ в обох задачах є те, що дія температурного поля призводить до деформування оболонки в бік протилежний її деформуванню при дії тиску. Як наслідок, це викликає збільшення жорсткості оболонки.

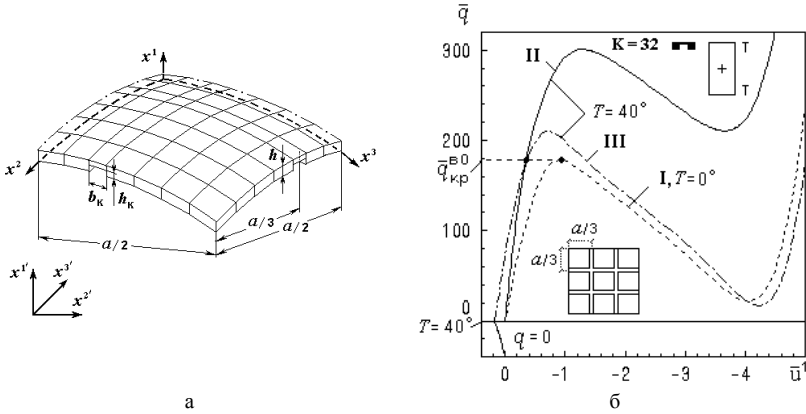


Рис. 8. Діаграми “навантаження-прогин центра панелі з каналами” для трьох варіантів комбінованої дії тиску та нагріву

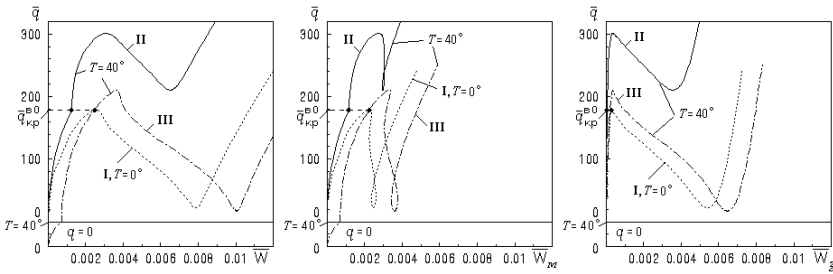


Рис. 9. Діаграми “навантаження-енергія деформування”

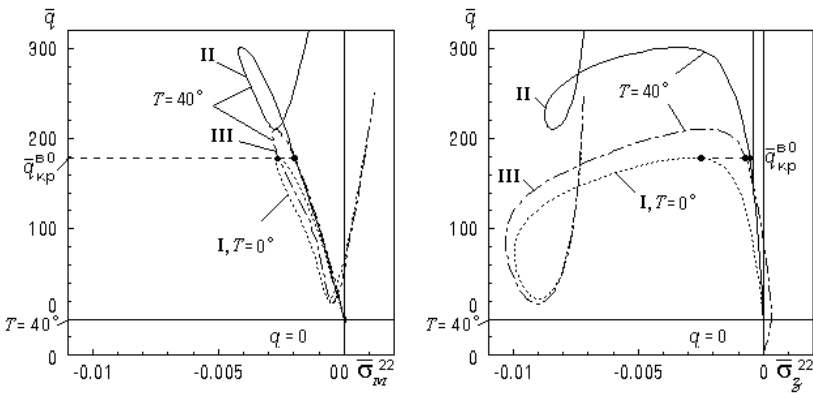


Рис. 10. Діаграми “навантаження-напруження у центрі панелі”

Діаграми на рис. 9 показують відмінності у зміні величин енергії деформування \overline{W} та її складових (мембранної \overline{W}_m та згинної \overline{W}_z). В точці, коли температурне поле в II-й та III-й задачах закінчує своє зростання, помітне зменшення інтенсивності зростання енергії деформування. Це пояснюється збільшенням жорсткості оболонки за рахунок температурного нагріву. В докритичній області енергія деформування зростає в основному за рахунок мембранної складової, а у позакритичній області – за рахунок згинної складової. Подібна картина також спостерігається на діаграмах (рис. 10) відносно мембранних $\overline{\sigma}_m^{22} = \sigma_m^{22}/E$ та згинних $\overline{\sigma}_z^{22} = \sigma_z^{22}/E$ складових напруження в скінченному елементі в околі центра панелі.

6. Вплив на втрату стійкості оболонки комбінованої дії попереднього рівномірного нагріву (різної інтенсивності) та подальшого навантаження тиском досліджений на прикладі панелі, що має квадратний центральний отвір шириною $b_o = 12h$. Вихідні данні для оболонки з отвором взяті як і в дослідженні пункту 4. Розглянуті чотири варіанти нагріву: на $T = -20^\circ, 0^\circ, 20^\circ, 40^\circ\text{C}$ (рис. 11 - рис. 14).

Аналіз результатів розрахунків (рис. 11, табл. 1) показав, що послідовне підвищення температури попереднього нагріву оболонки на 20°C призводить до рівномірного збільшення величини верхнього критичного навантаження тиском \overline{q}_{kp}^e на 11.2%, 10.8%, 10.9% та відповідного рівномірного зменшення величини нижнього критичного навантаження \overline{q}_{kp}^H на 6.7%, 7.4%, 7.9%. При цьому, еволюція нелінійного деформування оболонки відбувається без суттєвої якісної зміни результатів розрахунків.

Таблиця 1

Величини критичних навантажень тиском для різних варіантів нагріту панелі з центральним отвором					
№ варіанта	Комбіноване навантаження	\overline{q}_{kp}^e	$\Delta, \%$	\overline{q}_{kp}^H	$\Delta, \%$
1	$T = -20^\circ\text{C}, \overline{q}$	140.60	0	38.82	0
2	$T = 0^\circ\text{C}, \overline{q}$	156.40	11.2	36.22	-6.7
3	$T = 20^\circ\text{C}, \overline{q}$	171.50	22.0	33.33	-14.1
4	$T = 40^\circ\text{C}, \overline{q}$	186.80	32.9	30.28	-22.0

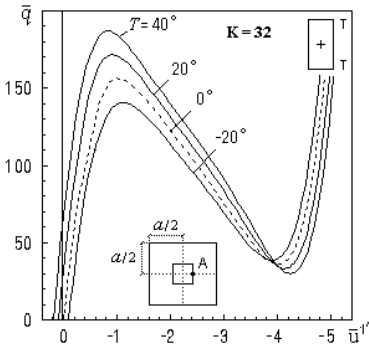


Рис. 11. Діаграми “навантаження-прогин в точці А”

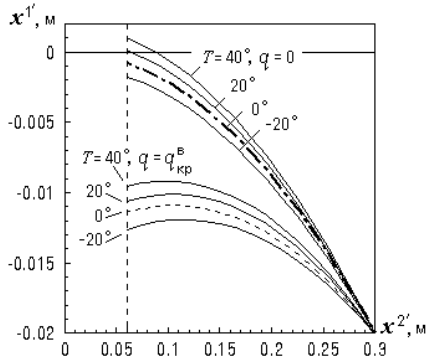


Рис. 12. Форми деформування та втрати стійкості

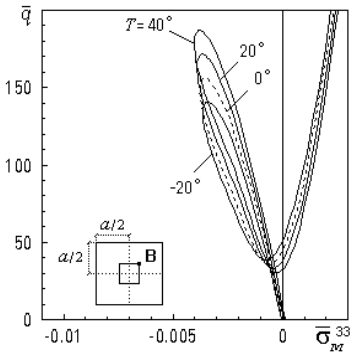


Рис. 13. Діаграми “навантаження-напруження в околі точки В”

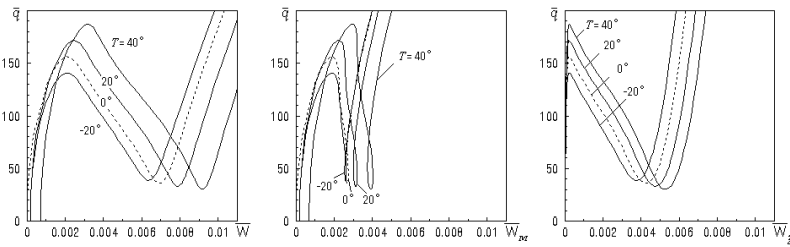
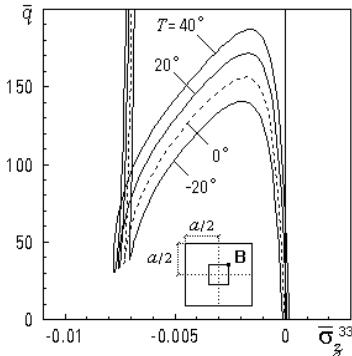


Рис. 14. Діаграми “навантаження-енергія деформування”

Перерізи в площині $x^1 x^2$ (рис. 12) дають уяву про форми деформування панелі при попередніх нагрівах і в момент втрати стійкості від дії тиску.

Діаграми “навантаження-напруження” (рис. 13) приведені для найбільш напруженої ділянки оболонки (в околі кута отвору – точці В). Мембранні напруження $\bar{\sigma}_m^{22}$ при переході з докритичної області у закритичну змінюють свій знак, а згинні напруження $\bar{\sigma}_3^{22}$ при цьому поступово зростають, стабілізуючись після нижньої критичної точки.

На діаграмах рис. 14 наведений розподіл величин безрозмірної сумарної енергії деформування \bar{W} та її складових (мембранної \bar{W}_m та згинної \bar{W}_3). Енергія деформування у докритичній області зростає за рахунок мембранної складової, а у позакритичній області – в основному за рахунок згинної складової.

Проведені дослідження дозволили виявити існуючі закономірності нелінійного деформування, стійкості та позакритичної поведінки оболонок сталі та ступінчато-змінної товщини для різних режимів комбінованого навантаження нагрівом та рівномірним нормальним тиском. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні різноманітних несучих оболонкових конструкцій та їх елементів.

1. Бушнелл Д. Исследование подкрепленных кольцами оболочек вращения, находящихся под совместным действием температурных и механических нагрузок // Ракетная техника и космонавтика. – 1971. – N3. – С. 64-77.
2. Замула Г.Н., Иерусалимский К.М., Карпова Г.С. Исследование устойчивости и термоустойчивости сложных подкрепленных конструкций // Уч. записки ЦАГИ. – 1989. – Т. XX. – N4. – С. 84-87.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Баженов В.А., Соловей М.О., Кривенко О.П. Вплив параметрів ребер на стійкість гнучких панелей // Опір матеріалів і теорія споруд: Наук.-тех. збірн. - К.: КНУБА, 2001 р. - Вип. 69. - С. 18-24.

8. *Баженов В.А., Соловей М.О., Кривенко О.П.* Стійкість гнучких пологих панелей ступінчато-змінної товщини // Системні технології. Математичні проблеми технічної механіки. Збірник наукових праць. - Випуск 2(13).- Спец. вип. - Дніпропетровськ: "Сист. тех.", 2001. - С. 7-11.
9. *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.
10. *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.
11. *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.
12. *Соловей М.О., Кривенко О.П.* Порівняльний аналіз розв'язків у задачах стійкості гнучких оболонок при різних законах нерівномірного нагріву // Опір матеріалів і теорія споруд: Наук.-тех. збірн. - К.: КНУБА, 2002 р. - Вип. 70. - С. 104-109.
13. *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. - С. 60-73.
14. *Соловей М.О., Кривенко О.П.* Вплив нагріву на стійкість гранованих пологих сферичних оболонок // Опір матеріалів і теорія споруд: Наук.-тех. збірн. - К.: КНУБА, 2004 р. - Вип. 75. - С. 80-86.
15. *Вольмир А.С.* Устойчивость деформируемых систем. - М.: Наука, 1967. - 984 с.
16. *Ильин В.П., Карпов В.В.* Устойчивость ребристых оболочек при больших перемещениях. - Л.: Стройиздат, 1986. - 168 с.

Надійшла до редколегії 07.11.2005 р.