

УДК 539.3

*В. С. Гудрамович, чл.-кор. НАН України, д-р техн. наук,
Е. Л. Гарт, канд. фіз.-мат. наук, О. А. Марченко*

ПРО ВПЛИВ ФОРМИ ПІДКРІПЛЕНЬ НА НАПРУЖЕНО- ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ЦИЛІНДРИЧНОЇ ОБОЛОНКИ З ВИДОВЖЕНИМИ ПРЯМОКУТНИМИ ОТВОРАМИ

Проведено комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану циліндричної оболонки з двома видовженими прямокутними отворами, підкріпченими накладками з іншого матеріалу. Досліджено вплив форми підкріплення на процес деформування оболонки.

Ключеві слова: циліндрична оболонка, прямокутні отвори, включення, напружено-деформований стан, метод скінченних елементів.

Вступ. Тонкостінні конструкції, елементами яких є тонкі пластини і оболонки, знайшли широке застосування у різних галузях техніки: аерокосмічній, енергетиці, будівництві та багатьох інших галузях народного господарства. Розрахунок пластинчато-оболонкових елементів конструкцій на міцність є однією із актуальних проблем механіки деформованого твердого тіла [1, 2, 4–9, 12–16].

Під час проектування багатьох тонкостінних конструкцій виникає необхідність використання циліндричних оболонок з отворами різних форм, що призводить до зменшення міцності конструкції. Для збереження необхідної міцності доводиться застосовувати різного роду підкріплюючі елементи, що значно ускладнює математичну постановку задачі та вимагає використання спеціальних підходів до її розв'язування. Один із універсальних методів отримання числового розв'язку таких задач є метод скінченних елементів (МСЕ) [10, 11, 17].

У даній роботі проведено скінченно-елементний аналіз впливу підкріплюючих елементів отворів циліндричних оболонок, які моделюються включеннями із матеріалу, відмінного від матеріалу оболонки, на її напружено-деформований стан (НДС) в місцях локальних концентраторів.

Постановка задачі. Розглянемо тонку ізотропну пружну циліндричну оболонку радіусу R , довжини H , товщини h з прямокутними (одним або двома) видовженими отворами розмірами $a \times b$ (рис. 1), що підкріплюються накладками з іншого матеріалу (h_1 – характерний розмір накладки (рис. 2)). Оболонка знаходиться під дією зовнішнього стискаючого навантаження $p = const$.

Необхідно визначити НДС оболонки з отворами, дослідити вплив форми і механічних характеристик підкріплень на її НДС в зонах конче-

трації напружень, провести порівняльний аналіз одержаних результатів з точки зору можливості зменшення параметрів НДС оболонки.

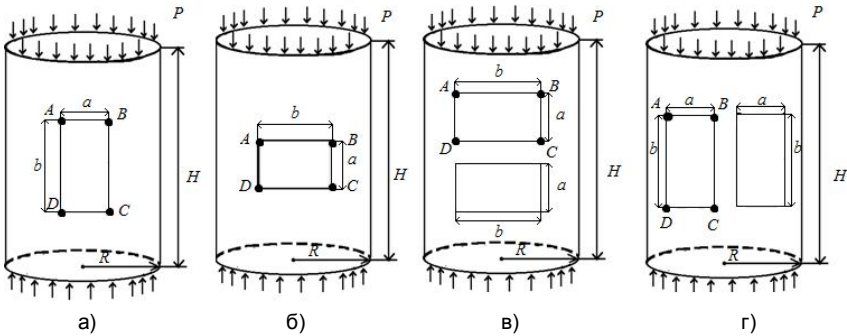


Рис. 1 – Схеми циліндричних оболонок з отворами: а) з одним вертикальним; б) з одним горизонтальним; в) з двома горизонтальними; г) з двома вертикальними

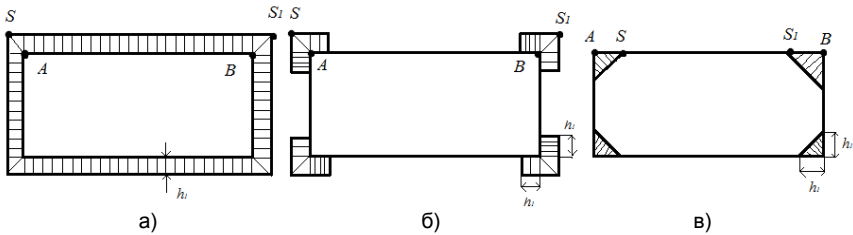


Рис. 2 – Форми включень: а) стрічкові; б) охоплюючі кутові; в) трикутні

Числовий аналіз. Розрахунки проведені на ПК з тактовою частотою Intel®Core™ i5-4460 CPU @ 3.20 GHz, оперативною пам'яттю – 8 GB, розрядність системи – x64. Кількість скінченних елементів – 55472, вузлів – 110944. Результати отримані для циліндричної оболонки $R = 1 м = L$, $H = 2L$, $h = 0,02L$ з видовженим прямокутним отвором $a = 0,1L$, $b = 0,4L$. У випадку двох отворів відстань між їх центрами $l = 0,4L$. Характерний розмір включення $h_1 = a/4 = 0,025L$. Для визначеності в розрахунках застосовано два види матеріалу з такими модулями пружності E та коефіцієнтами Пуассона ν : $E_1 = 70 ГПа$, $\nu_1 = 0,36$, $E_2 = 210 ГПа$, $\nu_2 = 0,3$, з відповідними їм границею міцності та умовною границею текучості $\sigma_g = 400 МПа$, $\sigma_{0,2} = 280 МПа$; $\sigma_g = 630 МПа$, $\sigma_{0,2} = 375 МПа$ [3].

Вибір матеріалів носить умовний характер. Зовнішнє навантаження $p = 10 МПа$.

Підкріплюючі елементи отворів моделюються включеннями (вставками) із матеріалу з іншими, ніж основний матеріал оболонки, механічними властивостями. Вважається, що на границях включень задано умови жорсткого зчеплення.

Введемо коефіцієнт відносної жорсткості включення $k = E_{\text{вкл}} / E_{\text{пл}}$. Розглянемо випадки, коли $k > 1$ (більш «жорстке» включення) і $k < 1$ (більш «м'яке» включення).

На рис. 3 і рис. 4 наведено розподіл відносної інтенсивності напружень σ_i/p по розгортці А–А прямокутного отвору для оболонки з одним вертикально розташованим отвором (рис. 1, а) для випадків $k > 1$ і $k < 1$ відповідно. Значення σ_i/p в пробних точках оболонки подано у табл. 1. Точка А – кутова точка отвору, S – точка, що знаходиться на межі поділу двох матеріалів. Наявність в оболонці двох отворів на певній відстані викликає їх взаємний вплив, тому додатково вводяться для дослідження пробні точки В – кутова точка отвору, розташованого поблизу іншого, та S₁ – точка, що знаходиться на межі поділу двох матеріалів з боку іншого отвору (рис. 2).

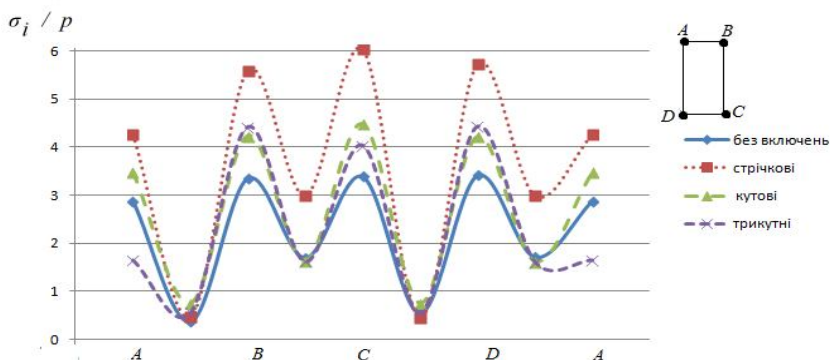


Рис. 3 – Розподіл відносної інтенсивності напружень σ_i/p по розгортці отвору А–А оболонки з одним вертикально розташованим отвором при $k > 1$

Таблиця 1 – Значення σ_i/p у пробних точках оболонки з одним вертикально розташованим отвором

Пробні точки	Без включень	Кутові	Стрічкові	Трикутні
$k > 1$				
Точка А	3,3	4,5	6,0	4,5
Точка S	2,1	1,8	1,9	1,7
$k < 1$				
Точка А	3,3	2,0	1,7	2,4
Точка S	2,1	2,0	2,0	2,1

Аналіз розподілу σ_i/p по розгортці А–А отвору (рис. 3, табл. 1) показує, що при $k > 1$ спостерігається збільшення інтенсивності напружень в місцях їх концентрації: для стрічкових включень на $\sim 80\%$, трикутних та кутових – на $\sim 36\%$ у порівнянні з отвором без включень. При $k < 1$ (рис. 4) наявність стрічкових включень дає змогу знизити інтенсивність напружень на $\sim 48\%$, трикутних – на $\sim 27\%$, кутових – на $\sim 33\%$.

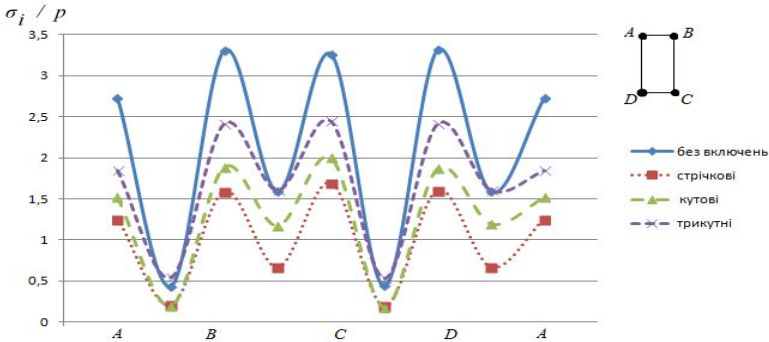


Рис. 4 – Розподіл відносної інтенсивності напружень σ_i/p по розгортці отвору А–А оболонки з одним вертикально розташованим отвором при $k < 1$

На рис. 5 і рис. 6 подано розподіл σ_i/p по розгортці А–А отвору оболонки з одним горизонтально розташованим отвором (рис. 1, б) для випадків $k > 1$ і $k < 1$ відповідно. При $k > 1$ спостерігається збільшення відносної інтенсивності напружень в зонах їх концентрації: за наявності стрічкових включень – на $\sim 95\%$, трикутних – на $\sim 54\%$, кутових – на $\sim 64\%$. Для випадку $k < 1$ наявність стрічкових включень призводить до зменшення інтенсивності напружень в місцях їх концентрації на $\sim 38\%$, трикутних – на $\sim 15\%$, кутових – на $\sim 34\%$ у порівнянні з оболонкою без включень (табл. 2).

Таблиця 2 – Значення σ_i/p у пробних точках оболонки з одним горизонтально розташованим отвором

Пробні точки	Без включень	Кутові	Стрічкові	Трикутні
$k > 1$				
Точка А	10,8	17,8	21,3	16,6
Точка S	5,2	4,7	4,7	4,8
$k < 1$				
Точка А	10,8	7,1	6,7	8,4
Точка S	5,2	5,8	5,2	5,9

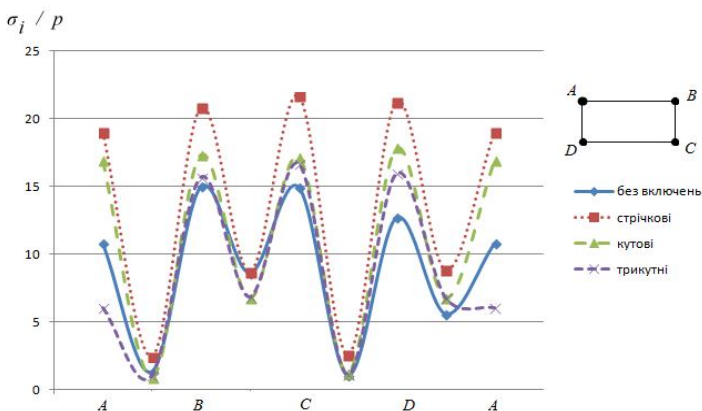


Рис. 5 – Розподіл σ_i/p по розгортці отвору А–А оболонки з одним горизонтально розташованим отвором при $k > 1$

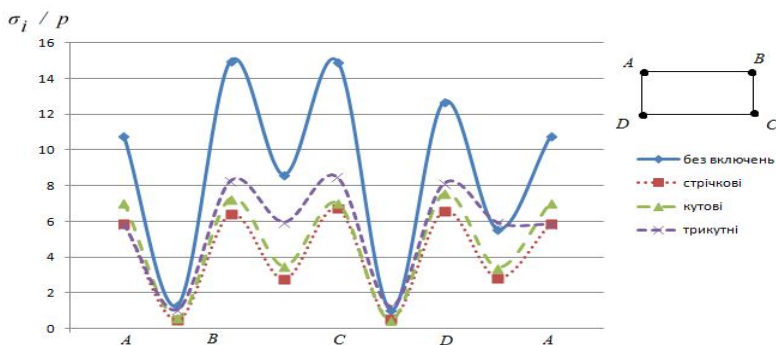


Рис. 6 – Розподіл σ_i/p по розгортці отвору оболонки з одним горизонтально розташованим отвором для $k < 1$

Розподіл σ_i/p по розгортці прямокутного отвору для оболонки з двома горизонтально розташованими отворами (рис. 1, в) при $k > 1$ і $k < 1$ подано на рис. 7 і рис. 8 відповідно. Аналіз одержаних результатів (табл. 3) показує, що у порівнянні з оболонкою без включень, при $k > 1$ стрічкові включення призводять до збільшення інтенсивності напружень в місцях їх концентрації на $\sim 38\%$, трикутні – на $\sim 5\%$, кутові – на $\sim 9\%$. При $k < 1$ наявність стрічкових включень дає змогу знизити інтенсивність напружень у зонах локальних концентраторів на $\sim 56\%$, трикутних – на $\sim 44\%$, кутових – на $\sim 48\%$.

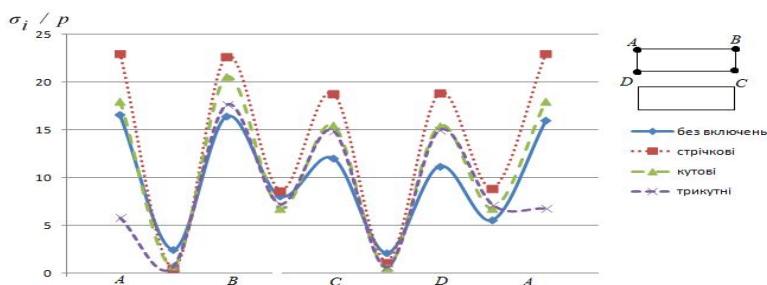


Рис. 7 – Розподіл σ_i / p по розгортці отвору оболонки з двома горизонтально розташованими отворами при $k > 1$

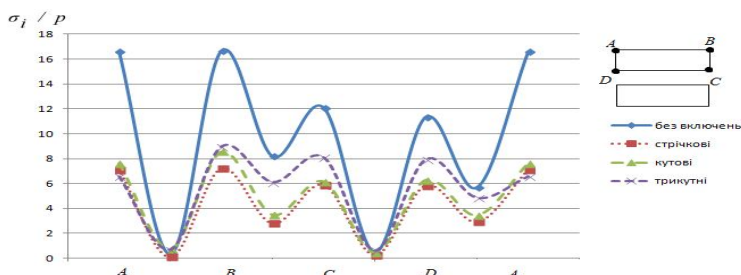


Рис. 8 – Розподіл σ_i / p по розгортці отвору оболонки з двома горизонтально розташованими отворами при $k < 1$

Таблиця 3 – Значення σ_i / p у пробних точках оболонки з двома горизонтально розташованими отворами

Пробні точки	Без включень	Кутові	Стрічкові	Трикутні
$k > 1$				
Точка A	16,6	18,0	23,0	5,8
Точка S	5,2	3,9	4,2	17,4
Точка B	16,5	20,6	22,7	6,7
Точка S ₁	7,2	5,9	5,7	17,6
$k < 1$				
Точка A	16,6	7,6	7,0	6,5
Точка S	5,2	5,2	4,9	7,5
Точка B	16,5	8,5	7,2	8,9
Точка S ₁	7,2	4,6	4,7	9,2

Для оболонки з двома вертикально розташованими отворами (рис. 1, в) аналіз одержаних результатів при $k > 1$ показує (табл. 4, рис. 9): стрічкові включення призводять до збільшення інтенсивності напружень у місцях локальних концентраторів на $\sim 27\%$, трикутних – на $\sim 32\%$, кутових – на $\sim 65\%$ у порівнянні з оболонкою без включень.

При $k < 1$ (рис. 10) стрічкові включення дають змогу зменшити інтенсивність напружень у місцях їх концентрації на $\sim 63\%$, трикутні – на $\sim 51\%$, кутові – на $\sim 41\%$.

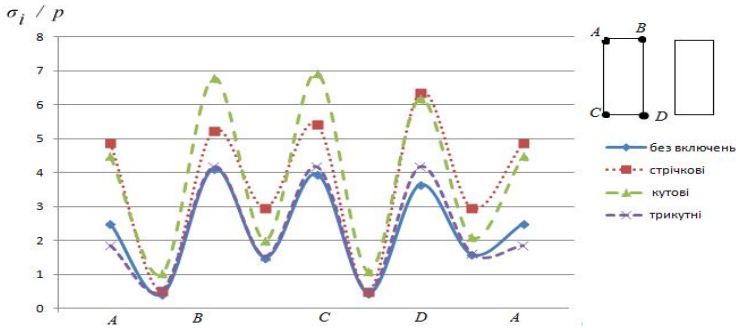


Рис. 9 – Розподіл σ_i / p по розгортці отвору оболонки з двома вертикально розташованими отворами при $k > 1$

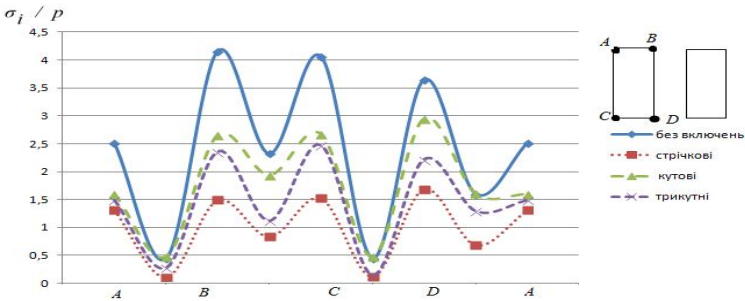


Рис. 10 – Розподіл σ_i / p по розгортці отвору оболонки з двома вертикально розташованими отворами при $k < 1$

Таблиця 4 – Значення σ_i / p у пробних точках оболонки з двома вертикально розташованими отворами

Пробні точки	Без включень	Кутові	Стрічкові	Трикутні
$k > 1$				
Точка А	2,5	4,5	4,9	1,9
Точка S	2,1	1,9	1,9	4,2
Точка В	4,1	6,8	5,2	4,2
Точка S ₁	3,1	1,7	1,7	5,4
$k < 1$				
Точка А	2,5	1,5	1,2	1,6
Точка S	2,1	2,7	1,9	1,4
Точка В	4,1	2,4	1,5	2,7
Точка S ₁	3,1	3,1	2,1	2,0

У табл. 5 подано значення інтенсивності деформацій ε_i в пробних точках оболонки для випадку (рис. 1, а) при $k > 1$ і $k < 1$. Так, при $k > 1$ стрічкові включення призводять до зменшення деформацій в місцях локальних концентраторів на $\sim 44\%$, кутові – на $\sim 24\%$, трикутні – на $\sim 32\%$ у порівнянні з оболонкою без включень. У випадку $k < 1$ стрічкові включення призводять до збільшення деформацій в місцях локальних концентраторів на $\sim 46\%$, кутові і трикутні – на $\sim 60\%$ у порівнянні з оболонкою без включень.

Таблиця 5 – Значення ε_i в пробних точках оболонки з одним вертикально розташованим отвором

Пробні точки	Без включень	Кутові	Стрічкові	Трикутні
$k > 1$				
Точка А	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$
Точка S	$7,8 \cdot 10^{-5}$	$9,7 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$
$k < 1$				
Точка А	$7,5 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$
Точка S	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$

У табл. 6 наведено значення ε_i в пробних точках оболонки для випадку (рис. 1, б). При $k > 1$ стрічкове включення дає змогу зменшити деформації в місцях локальних концентраторів на $\sim 40\%$, кутові – на $\sim 20\%$, трикутні – на $\sim 38\%$, у порівнянні з оболонкою без включень. У випадку $k < 1$ стрічкове включення призводить до збільшення деформацій в місцях локальних концентраторів на $\sim 75\%$, кутові – на $\sim 70\%$, трикутні – на $\sim 80\%$ у порівнянні з оболонкою без включень.

Таблиця 6 – Значення ε_i в пробних точках оболонки з одним горизонтально розташованим отвором

Пробні точки	Без включень	Кутові	Стрічкові	Трикутні
$k > 1$				
Точка А	$6,2 \cdot 10^{-4}$	$4,9 \cdot 10^{-4}$	$3,7 \cdot 10^{-4}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$
Точка S	$5,8 \cdot 10^{-4}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$
$k < 1$				
Точка А	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$
Точка S	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$

У табл. 7 подано значення ε_i в пробних точках оболонки для випадку (рис. 1, в). При $k > 1$ стрічкове включення дає змогу зменшити деформації в місцях локальних концентраторів на $\sim 68\%$, кутові і трикутні – на $\sim 40\%$ у порівнянні з оболонкою без включень. При $k < 1$ стрічкове

включення призводить до збільшення деформації в місцях локальних концентраторів на $\sim 50\%$, кутові – на $\sim 53\%$, трикутні – на $\sim 56\%$.

Таблиця 7 – Значення ε_i в пробних точках оболонки з двома горизонтально розташованими отворами

Пробні точки	Без включень	Кутові	Стрічкові	Трикутні
$k > 1$				
Точка А	$8,8 \cdot 10^{-4}$	$5,2 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$5,3 \cdot 10^{-4}$
Точка S	$4,6 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$	$4,3 \cdot 10^{-4}$	$4,3 \cdot 10^{-4}$
Точка B	$5,2 \cdot 10^{-4}$	$4,7 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-4}$	$4,2 \cdot 10^{-4}$
Точка S ₁	$4,3 \cdot 10^{-4}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$
$k < 1$				
Точка А	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$	$4,7 \cdot 10^{-4}$
Точка S	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$5,3 \cdot 10^{-4}$
Точка B	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$4,3 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$
Точка S ₁	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$

У табл. 8 наведено значення ε_i в пробних точках оболонки для випадку (рис. 1, з). При $k > 1$ стрічкове включення дає змогу зменшити деформації в місцях локальних концентраторів на $\sim 57\%$, кутові – на $\sim 35\%$, трикутні – на $\sim 25\%$ у порівнянні з оболонкою без включень. При $k < 1$ стрічкові включення призводять до збільшення деформації в місцях локальних концентраторів - на $\sim 27\%$, кутові – на $\sim 72\%$, трикутні – на $\sim 63\%$.

Таблиця 8 – Значення ε_i в пробних точках оболонки з двома вертикально розташованими отворами

Пробні точки	Без включень	Кутові	Стрічкові	Трикутні
$k > 1$				
Точка А	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$8,5 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$
Точка S	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$8,9 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$8,6 \cdot 10^{-5}$
Точка B	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$9,7 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$
Точка S ₁	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$
$k < 1$				
Точка А	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$
Точка S	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$9,5 \cdot 10^{-5}$
Точка B	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$8,0 \cdot 10^{-5}$
Точка S ₁	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$9,9 \cdot 10^{-5}$

При дослідженні впливу кривини оболонки на розподіл напружень в зонах локальних концентраторів було встановлено факт збільшення відносної інтенсивності напружень біля отворів при збільшенні кривини та її зменшення у випадку зменшення кривини (рис. 11). Так, при $R = 0,5L$ спостерігається збільшення ККН на $\sim 8\%$; при $R = 0,2L$ – на

~13% у порівнянні із вихідним випадком. При $R=3L$ та $R=4L$ має місце відповідне зменшення ККН на ~4% та ~8%.

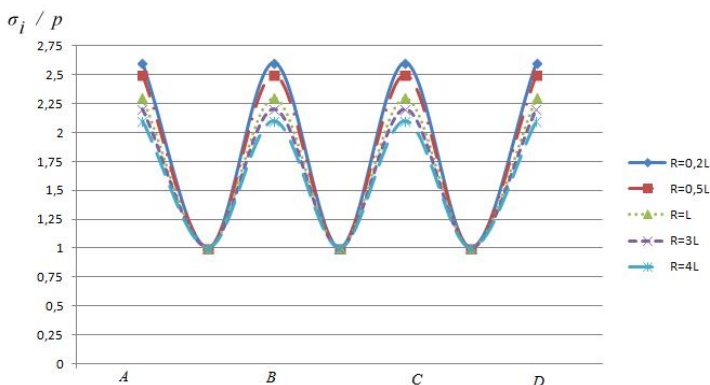


Рис. 11 – Залежність σ_i / ρ по розгортці отвору оболонки від її радіусу

Висновки. На основі проведенного скінченно-елементного аналізу НДС циліндричної оболонки з чотирма видами видовжених прямокутних отворів та трьома видами включень отримано розподіл інтенсивності напружень і деформацій в оболонці в зонах локальних концентраторів напружень. При використанні включень меншої жорсткості, ніж матеріал оболонки, встановлено зменшення інтенсивності напружень в місцях їх концентрації (у середньому на 40%), але у той же час спостерігається збільшення деформацій. У випадку використання включень з більшою жорсткістю матеріалу, ніж основний матеріал оболонки, має місце деяке збільшення інтенсивності напружень проте зменшення деформацій (у середньому на 33%). Форма підкріплень і їх механічні властивості мають суттєвий вплив на розподіл параметрів НДС оболонки.

БІБЛІОГРАФІЧНІ ПОСИЛАННЯ

1. **Абовский Н. П.** Вариационные принципы теории упругости и теории оболочек / Н. П. Абовский, Н. П. Андреев, А. П. Деруга. – М.: Наука, 1978. – 228 с.
2. **Авдонин А. С.** Расчет на прочность летательных аппаратов / А. С. Авдонин, В. ф. Фигуровский. – М.: Машиностроение, 1985. – 439 с.
3. **Арзамасов Б. Н.** Справочник по конструкционным материалам / Б. Н. Арзамасов, Т. В. Соловьева, С. А. Герасимов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 640 с.
4. **Гарт Е. Л.** Комп'ютерне моделювання поведінки пологої оболонки з круговими отворами при розтягу / Е. Л. Гарт, К. О. Василевський // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій: зб. наук. праць. – Д.: Ліра, 2014. – Вип. 22. – С. 57–66.
5. **Гарт Э. Л.** Численный анализ напряжённо-деформированного состояния пластины с прямоугольным отверстием, подкреплённым треугольными накладками / Э. Л. Гарт, С. В. Панченко // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій: зб. наук. праць. – Д.: Ліра, 2015. – Вип. 24. – С. 35–47.

6. **Гудрамович В. С.** Устойчивость упругопластических оболочек / В. С. Гудрамович. – К.: Наук. думка, 1987. – 216 с.
7. **Гузь А. Н.** Методы расчета оболочек. В 5 т. Т. 1. Теория оболочек, ослабленных отверстиями / А. Н. Гузь, И. С. Чернышенко и др. – К.: Наук. думка, 1980. – 636 с.
8. **Погорелов В. И.** Строительная механика тонкостенных конструкций / В. И. Погорелов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 528 с.
9. **Савин Г. Н.** Распределение напряжений около отверстий / Г. Н. Савин. – К.: Наук. думка, 1968. – 888 с.
10. **Сахаров А. С.** Метод конечных элементов в механике твердых тел / А. С. Сахаров, И. Альтенбах. – К.: Высш. шк., 1982. – 480 с.
11. **Сегерлинд Л.** Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. – М.: Мир, 1979. – 392 с.
12. **Чехов В. Н.** Концентрация напряжений в сферической оболочке с двумя близко расположенными круговыми отверстиями / В. Н. Чехов, С. В. Загора // *Мат. методы и физ.-мех. поля.* – 2010. – Т. 53, № 3. – С. 93–98.
13. **Gudramovich V. S.** Modeling of the behavior of plane-deformable elastic media with elongated elliptic and rectangular inclusions / V. S. Gudramovich, É. L. Gart, K. A. Strunin // *Materials Science.* – 2017. – Vol. 52. – Is. 6. – P. 768–774.
14. **Hart E. L.** Numerical simulation of stress-strain state for nonhomogeneous shell-type structures based on the finite element method / E. L. Hart, V. S. Hudramovich, S. A. Ryabokon', E. V. Samarskaya // *J. Modeling and Numerical Simulation of Mater. Sci.* – 2013. – Vol. 3. – No. 4. – P. 155–157.
15. **Hudramovych V. S.** Features of nonlinear deformation and critical states of shell systems with geometrical imperfections / V. S. Hudramovych // *Int. Appl. Mech.* – 2006. – Vol. 42. – No. 12. – P. 1323–1355.
16. **Maksim'uk V. A.** Variational-difference methods in linear and nonlinear problems of deformation of the shells from metallic and composite materials / V. A. Maksim'uk, E. A. Storozhuk, I. S. Chernyshenko // *Int. Appl. Mech.* – 2012. – Vol. 48. – No. 6. – P. 613–687.
17. **Zienkiewicz O. C.** The finite element method for solid and structural mechanics / O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor. – New York: Elsevier, 2005. – 632 p.

УДК 539.3

*В. С. Гудрамович, чл.-кор. НАН Украины, д-р техн. наук,
Э. Л. Гарт, канд. физ.-мат. наук, О. А. Марченко*

О ВЛИЯНИИ ФОРМЫ ПОДКРЕПЛЕНИЯ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ С ПРОТЯЖЕННЫМИ ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ ОТВЕРСТИЯМИ

Проведено компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния цилиндрической оболочки с двумя протяженными прямоугольными отверстиями, подкрепленными накладками из другого материала. Исследовано влияние формы подкреплений на процесс деформирования оболочки.

Ключевые слова: цилиндрическая оболочка, прямоугольные отверстия, включения, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов.

*V. S. Hudramovich, Corresponding member of NAS Ukraine, Dr. Sci. (Tech.),
E. L. Hart, Dr. Sci. (Phys.-Math.), O. A. Marchenko*

ABOUT THE INFLUENCE OF THE FORM OF REINFORCEMENT ON THE STRESS-STRAIN STATE OF A CYLINDRICAL SHELL WITH ELONGATED RECTANGULAR HOLES

Computer simulation of the stress-strain state of a cylindrical shell with two elongated rectangular holes reinforced with overlays of another material was carried out. The influence of the form of reinforcements on the shell deformation process is investigated.

Keywords: *cylindrical shell, rectangular holes, inclusions, stress-strain state, finite element method.*

Thin-walled structures, the elements of which are thin plates and shells, have found wide application in various fields of engineering: aerospace, power engineering, construction and many other branches of the national economy. The calculation of plate-shell elements of structures for strength is one of the topical problems of the mechanics of solid [1, 2, 4–9, 12–16].

During the design of many thin-walled structures, it is necessary to use cylindrical membranes with openings of various shapes, which leads to a decrease in the strength of the structure. To maintain the necessary strength, it is necessary to apply various types of reinforcing elements, which greatly complicates the mathematical formulation of the problem and requires special approaches to its solution. One of the universal methods for obtaining a numerical solution to such problems is the finite element method [10, 11, 17].

In this paper, a finite-element analysis of the effect of the supporting elements of the holes of cylindrical shells, which are simulated by inclusions from a material other than the shell material, on its stress-strain state in places of local concentrators is carried out.

Conclusions. On the basis of the finite-element analysis of SSS of a cylindrical shell with four types of elongated rectangular openings and three types of inclusions, the distribution of intensity of stresses and deformations in the shell is obtained in the zones of local stress concentrators. When using inclusions of less rigidity than the material of the shell, a decrease in the intensity of stresses in the places of their concentration (an average 40%), but at the same time there is an increase in deformation. In the case of the use of inclusions with greater stiffness of the material than the main material of the shell, there is a slight increase in the intensity of stress, but the deformation decrease (an average 33%). The form of reinforcements and their mechanical properties have a significant effect on the distribution of the shell parameters.

REFERENCES

1. **Abovskii N. P.** Variational principles of the theory of elasticity and the theory of shells / N. P. Abovskii, N. P. Andreev, A. P. Deruga. – Moscow: Nauka, 1978. – 228 p. (in Russian).
2. **Avdonin A. S.** Calculation of strength for aircrafts / A. S. Avdonin, V. F. Figurovskii. – Moscow: Mashinostrojenie, 1985. – 439 p. (in Russian).

3. **Arzamasov B. N.** Handbook of structural materials / B. N. Arzamasov, T. V. Solovieva, S. A. Gerasimov. – Moscow: MSTU them. N. E. Bauman, 2005. – 640 p. (in Russian).
4. **Hart E. L.** Computer simulation of the behavior of a shallow shell with circular holes under tension / E. L. Hart, K. A. Vasilevsky // Problems of Computational Mechanics and Strength of Structures: Col. of sci. art. – Dnipropetrovsk: Lira, 2014. – Vol. 22. – P. 57–66. (in Ukrainian).
5. **Hart E. L.** Numerical analysis of the stress-strain state of a plate with a rectangular hole, supported by triangular overlays / E. L. Hart, S. V. Panchenko // Problems of Computational Mechanics and Strength of Structures: Col. of sci. art. – Dnipropetrovsk: Lira, 2015. – Vol. 24. – P. 35–47. (in Russian).
6. **Hudramovich V. S.** Stability of elastoplastic shells / V. S. Hudramovich. – Kyiv: Nauk. dumka, 1987. – 216 p. (in Russian).
7. **Guz A. N.** Methods for calculating shells / A. N. Guz, I. S. Chernyshenko and etc. – Kiev: Nauk. dumka, 1980. – 636 p. (in Russian).
8. **Pogorelov V. I.** Construction mechanics of thin-walled structures / V. I. Pogorelov. – St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2007. – 528 p. (in Russian).
9. **Savin G. N.** Stress distribution around holes / G. N. Savin. – Kiev: Nauk. dumka, 1968. – 888 p. (in Russian).
10. **Sakharov A. S.** The finite element method in the mechanics of solids / A. S. Sakharov, I. Altenbach. – Kyiv: Vischa shkola, 1982. – 480 p. (in Russian).
11. **Seegerlind L.** Applied finite element analysis / L. Seegerlind. – Moscow: Mir, 1979. – 392 p. (in Russian).
12. **Chekhov V. N.** Stress concentration in a spherical shell with two closely spaced circular holes / V. N. Chekhov, S. V. Zakora // Matem. metody ta fizyko-mekhan. polya, 2010. – Vol. 53. – No. 3. – P. 93–98 (in Russian).
13. **Gudramovich V. S.** Modeling of the behavior of plane-deformable elastic media with elongated elliptic and rectangular inclusions / V. S. Gudramovich, É. L. Gart, K. A. Strunin // Materials Science. – 2017. – Vol. 52. – Is. 6. – P. 768–774.
14. **Hart E. L.** Numerical simulation of stress-strain state for nonhomogeneous shell-type structures based on the finite element method / E. L. Hart, V. S. Hudramovich, S. A. Ryabokon', E. V. Samarskaya // J. Modeling and Numerical Simulation of Mater. Sci. – 2013. – Vol. 3. – No. 4. – P. 155–157.
15. **Hudramovych V. S.** Features of nonlinear deformation and critical states of shell systems with geometrical imperfections / V. S. Hudramovych // Int. Appl. Mech. – 2006. – Vol. 42. – No. 12. – P. 1323–1355.
16. **Maksim'uk V. A.** Variational-difference methods in linear and nonlinear problems of deformation of the shells from metallic and composite materials / V. A. Maksim'uk, E. A. Storozhuk, I. S. Chernyshenko // Int. Appl. Mech. – 2012. – Vol. 48. – No. 6. – P. 613–687.
17. **Zienkiewicz O. C.** The finite element method for solid and structural mechanics / O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor. – New York: Elsevier, 2005. – 632 p.

*Дніпропетровський національний
університет ім. Олеся Гончара,
Дніпро, Україна*

Надійшла до редколегії 23.04.2017