

В.А. Максимюк, д.ф.-м.н., Є.А. Сторожук, д.ф.-м.н.,
І.С. Чернишенко, член-кор. НАН України, д.т.н.
(Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України, Україна)

Чисельне моделювання деформування днища паливного бака ракети з нелінійно-пружного композитного матеріалу

Досліджено нелінійно-пружний стан ортотропних композитних сферичних оболонок з отвором, підкріпленим фланцем. На прикладі днища паливного бака ракети носія «Циклон-4М» показано, що у випадку виготовлення його з нелінійно-пружного композиту нелінійність проявляється менше, ніж пластичність в металевій конструкції.

Паливний бак ракети носія «Циклон-4М» виготовляється з алюмінієвого сплаву [1]. Поряд з цим, для зменшення ваги та збільшення міцності й жорсткості елементів ракетно-космічної техніки широко використовуються композитні матеріали (КМ). Полімерні композиційні матеріали (ПКМ) за підвищених рівнів навантажень проявляють нелінійно-пружні властивості [2]. Нижче досліджено напружено-деформований стан (НДС) верхнього сферичного днища бака, якби воно було б виготовлене з нелінійно-пружного ПКМ. Паливний бак має вигляд тонкої циліндричної оболонки з двома сферичними днищами (рис. 1).

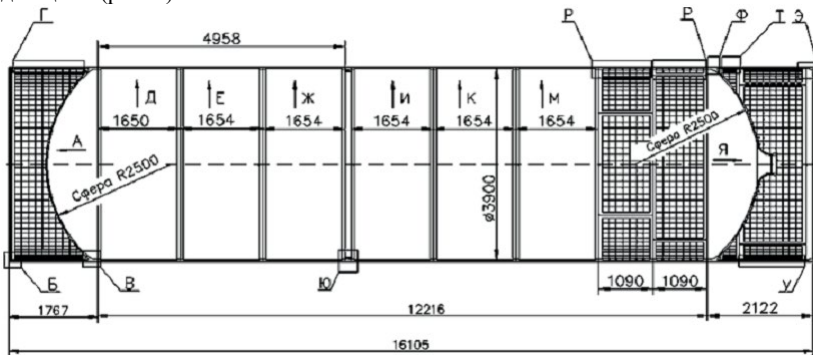


Рис. 1. Загальний вигляд бака [1]

На загал, конструкція бака через наявність підкріплювальних елементів та вафельну поверхню не є вісесиметричною, проте сферичні днища можна розглядати як вісесиметричні оболонки. Причому верхнє днище фактично є сферичною оболонкою з підкріпленим отвором, який спричинює концентрацію напружень.

Для чисельного моделювання вісесиметричного НДС тонких оболонок обертання, виготовлених з нелінійно-пружних ПКМ була розроблена методика

на основі методу скінченних різниць, методу послідовних наближень та методу Ньютона для обернення нелінійних фізичних співвідношень [2].

Вважаємо, що процес навантаження під дією поверхневих і крайових сил відбувається за постійної температури та є активним і простим [2]. Вісі ортотропії ПКМ збігаються з лініями головних кривин оболонки. За певних величин діючих навантажень в оболонці проявляються нелінійні властивості анізотропного матеріалу, але прогини й деформації залишаються малими. Зазначені передумови дозволяють скористатися геометрично лінійною теорією оболонок з аналітичною реалізацією гіпотез Кірхгофа – Лява [2] і теорією пластичності анізотропних середовищ [2, 3].

Тоді геометричні співвідношення в напівгеодезичній системі координат (s, γ) матимуть вигляд [2]:

$$\varepsilon_s = u' + \kappa_s w; \quad \varepsilon_\theta = B^* u + \kappa_\theta w;$$

$$\kappa_s = k'_s u - k_s^2 w - w''; \quad \kappa_\theta = k'_\theta u - k_\theta^2 w - B^* w',$$

де u , w – компоненти вектора переміщень у напрямку осей (s, γ) відповідно; $\theta = k_s u - w'$ – кут повороту нормалі навколо осі θ ; k_ρ ($\rho = s, \theta$) – головні кривини; $B^* = B'/B$; $B = r$ – радіус паралельного кола; знак (') відповідає диференціюванню по координаті s .

Оболонка перебуває під дією внутрішнього тиску p , який за допомогою кришки приводить до дії перерізуючого зусилля $Q_0 = pr_0/2$ на фланець отвору радіусом r_0 (рис. 2). Приймемо, що фланець є пружним кільцем прямокутного поперечного перерізу, висотою a й шириною b .

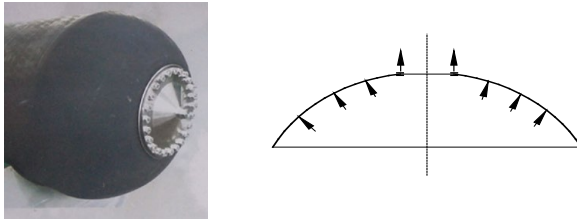


Рис. 2. Верхнє сферичне днище

Тоді в перерізі з'єднання кільця з оболонкою ($r = r_0$, $s = 0$) будуть мати місце граничні умови [2]:

$$Q_s \sin \varphi + T_s \cos \varphi - \frac{F_0 E_0}{r_0^2} (w \sin \varphi + u \cos \varphi) = 0;$$

$$Q_s \cos \varphi - T_s \sin \varphi = -Q_0; \quad M_s + Q_s r_1 + T_s r_2 + \frac{J_0 E_0}{12 r_0^2} g = 0,$$

де φ – кут між нормаллю до оболонки й віссю обертання у вузлі з'єднання; r_1 , r_2 – координати центру кільця в системі (s, γ) ; E_0 – модуль пружності матеріалу кільця; $F_0 = ab$ і $J_0 = a^3b/12$ – площа й момент інерції його поперечного перерізу. На зовнішньому ($r = r_k$) краї оболонки приймемо умови рухливого в радіальному напрямку шарнірного опирання

$$u = 0; Q_s = 0; M_s = 0.$$

Розрахунки виконано для тонкої сферичної оболонки радіусом $R=2,5$ м і постійної товщини $h=2,8$ мм. Діаметр верхнього центрального люка $d=0,69$ м, діаметр нижньої частини, з'єднаної з циліндричним корпусом $D=3,9$ м. Тоді геометричні параметри оболонки будуть такими: $r_0=0,345$ м; $r_k=1,95$ м; $0 \leq s \leq 1,89$ м.

Щоб показати можливий ефект від врахування нелінійності ПКМ приймемо, що паливний бак виготовлений з ортотропного нелінійно-пружного 8-шарового органопластику, нелінійні властивості якого добре досліджені [2]. Основні параметри цього КМ такі: $E_{ss}=26,8$ ГПа; $E_{\theta\theta}=46,5$ ГПа; $\nu_{\theta s}=0,166$.

З метою пошуку раціональних розмірів a і b поперечного перерізу кільця досліджено в лінійній постановці НДС біля отвору для $r_1 = r_2 = 0$; $p=1$ МПа. У табл.1 наведені значення меридіональних і колових напружень на зовнішній ($\tilde{\gamma} = \gamma/h = 0,5$) і внутрішній ($\tilde{\gamma} = -0,5$) поверхнях оболонки біля отвору ($s = 0$) для ряду варіантів розрахунків. Меридіан оболонки розбивався на 640 вузлових точок.

Табл. 1.

N	a , мм	b , мм	E_0 , ГПа	$\tilde{\gamma}$	σ_s , МПа	σ_θ , МПа
1	Відсутнє кільце			0,5	8	6898
				-0,5	8	5038
2	10	10	67	0,5	715	2374
				-0,5	-121	1699
3	10	60	67	0,5	576	649
				-0,5	276	537
4	20	40	67	0,5	540	519
				-0,5	333	457
5	20	60	67	0,5	437	376
				-0,5	467	385
6	20	60	46,5	0,5	529	503
				-0,5	348	448
7	30	60	46,5	0,5	413	351
				-0,5	493	363
8	Абсолютно жорстке кільце			0,5	178	51
				-0,5	796	229

Збільшення жорсткості кільця, від його відсутності (варіант 1) аж до абсолютно жорсткого (варіант 8), приводить до перерозподілу максимальних

напружень із зовнішньої (σ_θ) на внутрішню (σ_s) поверхню. Можна вважати, що кільця перерізом 20 мм × 60 мм, $E_0=67$ ГПа (варіант 5) і 30 мм × 60 мм, $E_0=46,5$ ГПа (варіант 7) є близькими до оптимальних, оскільки в цьому випадку відбувається вирівнювання меридіональних і колових напружень на зовнішній і на внутрішній поверхнях оболонки, тобто має місце практично безмоментний НДС.

Вплив фізичної нелінійності покажемо (табл. 2) у випадку кільця перерізом $a=20$ мм і $b=60$ мм, $E_0=46,5$ ГПа (варіант 6). Розрахунки в нелінійній постановці виконані з відносною похибкою в процесі послідовних наближень за максимальними деформаціями $\varepsilon=0,01$.

Табл. 2.

$r, \text{ м}$	$\tilde{\gamma}$	Лінійна задача		Нелінійна задача	
		$\sigma_s, \text{ МПа}$	$\sigma_\theta, \text{ МПа}$	$\sigma_s, \text{ МПа}$	$\sigma_\theta, \text{ МПа}$
0,345	0,5	529	503	494	457
	-0,5	348	448	382	447
0,356	0,5	503	504	480	466
	-0,5	376	457	399	453
0,368	0,5	483	501	468	470
	-0,5	399	462	414	455
0,391	0,5	454	488	451	470
	-0,5	432	462	434	453
0,461	0,5	435	454	438	453
	-0,5	457	448	451	443
0,804	0,5	445	447	443	446
	-0,5	447	448	445	443
1,23	0,5	445	446	444	445
	-0,5	447	446	445	444
1,95	0,5	446	446	444	444
	-0,5	446	446	444	444

Врахування нелінійності в цьому випадку приводить до незначного (на 7%) зменшення максимальних ($\sigma_s, \tilde{\gamma}=0,5$) напружень біля отвору.

Розподіл меридіональних напружень на зовнішній поверхні оболонки (σ_s^+) уздовж її меридіана (залежно від параметра $0,345 \text{ м} \leq r \leq 1,95 \text{ м}$), отриманих у лінійній (пунктир) і нелінійній (суцільна) постановках, показано на рис. 3.

Принадно відзначимо, що ПКМ на відміну від авіаційних алюмінієвих сплавів притаманне лінійно-пружне деформування в ширшому діапазоні деформацій [2] аж до розтягів уздовж волокон на 1 – 2 %. При цьому напруження можуть досягати 1 – 2 ГПа. Разом з тим, при розтяганні під кутом 45° до осей армування межа лінійності є значно нижчою (0,5 %). Зазначене, виконані розрахунки та накопичений досвід [4] дозволяють сформулювати висновки практичного характеру.

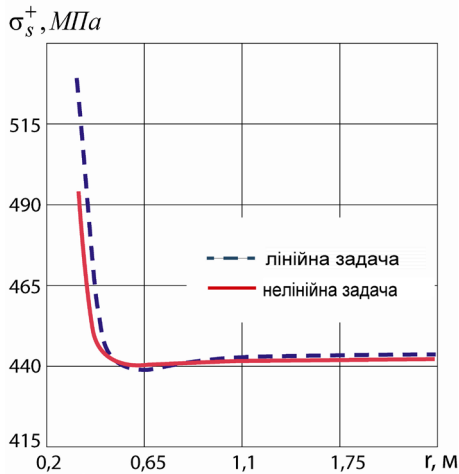


Рис. 3. Меридіональні напруження на зовнішній поверхні оболонки

Висновки

1. За вісесиметричного навантаження композитних конструкцій у вигляді замкнутих оболонок обертання фізична нелінійність, як правило, проявляється незначно. Наявність центрального отвору внаслідок концентрації напружень може збільшити вплив нелінійних факторів. Підкріплення отвору фланцем або накладкою певної жорсткості знижує концентрацію напружень.

2. За несиметричного деформування оболонок обертання під дією невісесиметричного навантаження або за наявності бокових отворів необхідність врахування нелінійно-пружних властивостей КМ зростає в порівнянні з випадком вісесиметричного деформування.

Список літератури

1. Наука для космічної промисловості. Інформаційний бюлетень координаційної ради з організації спільних робіт ДП «КБ «Південне» і наукових установ НАН України. – 2020. – № 1–2. – 58 с.
2. Концентрація напружень / Гузь А.Н., Космодамианский А.С., Шевченко В.П. и др. – К.: “А.С.К.”, 1998. – 387с. – (Механика композитов: В 12-ти т.; Т. 7).
3. Ломакин В.А., Юмашева М.А. О зависимостях между напряжениями и деформациями при нелинейном деформировании ортотропных стеклопластиков // Механика полимеров. – 1965. – № 4. – С.28–34.
4. Maksimyuk V.A., Storozhuk E.A., Chernyshenko I.S. Variational finite-difference methods in linear and nonlinear problems of the deformation of metallic and composite shells (review) // Int. Appl. Mech. – 2012. – 48, N 6. – P. 613 – 687.