

УДК 539.3

Володимир Ромащенко¹, к.т.н., с.н.с.; Світлана Тарасовська¹, к.т.н., ст. досл.; Петро Лепіхін¹, д.ф.-м.н., проф.; Олег Бейнер¹; Сергій Мариненко², к.т.н., доц.

¹Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

²Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

МІЦНІСТЬ МЕТАЛОКОМПОЗИТНИХ ЦИЛІНДРІВ ЗА УМОВ ВНУТРІШНЬОГО ІМПУЛЬСНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Анотація. Чисельно досліджено особливості зміцнення металокомпозитної циліндричної двошарової оболонки постійної загальної товщини під дією внутрішнього динамічного тиску від вибуху сферичного заряду вибухової речовини, розташованого в центрі симетрії циліндра, при постійній відносній масі заряду. Обрані оптимальні товщини металевих шарів і фізико-механічні характеристики композитів, які забезпечують найбільшу несівну здатність двошарового металокомпозитного циліндра. Внутрішній шар - ізотропна пружнопластична сталь, зовнішній — циліндрично-транстропний пружний композитний матеріал із коловим армуванням. Показано, що для розглянутих металокомпозитних циліндрів міцність оболонок монотонно зростає разом зі зростанням границі текучості внутрішнього сталевго шару, а також залежність міцності металокомпозитних циліндрів від виду матриці, волокна та його об'ємного вмісту.

Ключові слова: критерій міцності, анізотропний матеріал, металокомпозитний циліндр.

Volodymyr Romashchenko¹, Ph.D., Senior Researcher; Svitlana Tarasovska¹, Ph.D., Senior Researcher; Petro Lepikhin¹, D.Sc., Prof.; Oleh Beiner¹; Serhii Marynenko², Ph.D., Assoc. Prof.

STRENGTH OF METAL-COMPOSITE CYLINDERS UNDER INTERNAL IMPULSE LOADING

Abstract. The numerical investigation of the reinforcement characteristics of a metal-composite cylindrical two-layer shell of constant total thickness under the action of internal dynamic pressure from the detonation of a spherical explosive charge, located at the cylinder's center of symmetry, is presented, with a constant relative charge mass. Optimal thicknesses of the metal layers and the physicommechanical properties of the composites that provide the maximum load-bearing capacity of the two-layer metal-composite cylinder were selected. The inner layer consists of isotropic elastic-plastic steel, while the outer layer is a cylindrically transversely isotropic elastic composite material reinforced circumferentially. It is shown that, for the considered metal-composite cylinders, the shell strength monotonically increases with the yield strength of the inner steel layer, and that the strength of the metal-composite cylinders also depends on the type of matrix, fiber, and its volume fraction.

Keywords: strength criterion, anisotropic material, metal-composite cylinder.

Дослідженню динамічного напружено-деформованого стану (НДС) і міцності багатошарових намотувальних металокомпозитних (МК) оболонок обертання при внутрішньому вибуху сферичного заряду вибухової речовини (ВР) в повітряному середовищі присвячена незначна кількість теоретичних і експериментальних робіт [1]. На сьогоднішній день недостатньо розроблені чисельно-аналітичні методи визначення товщин пружнопластичних металевих і фізико-механічних характеристик композитних шарів, які забезпечують максимальну несівну здатність МК циліндрів при внутрішньому вибуховому навантаженні. В цій роботі досліджується особливості зміцнення МК циліндричної двошарової (метал-композит) оболонки постійної

загальної товщини H під дією внутрішнього динамічного тиску від вибуху сферичного заряду ВР, розташованого в центрі симетрії циліндра, при постійній відносній масі заряду (маса заряду поділена на масу оболонки).

Математична постановка задачі. В циліндричних координатах x, φ, r розглянемо НДС і міцність двошарового циліндра під дією осесиметричного внутрішнього імпульсного тиску від вибуху сферичного заряду ВР певної маси M в повітряному середовищі розташованого на осі симетрії. Внутрішній шар – ізотропна пружнопластична рівномічна при розтязі-стиску сталь (використовувались рівняння теорії течії без зміцнення Прандтля-Рейса), зовнішній – циліндрично трансформований пружний нерівномічний при розтязі-стиску композитний матеріал (КМ) з коловим армуванням (закон Гука для нього наведено в [1, 2]), контакт між шарами ідеальний. НДС і міцність досліджується в найбільш небезпечному осьовому перерізі $x = \text{const}$, що проходить через заряд в умовах плоского деформованого стану (ПДС). При цьому імпульс тиску відповідає вибуху сферичного заряду ВР певної маси M в повітряному середовищі на відстані внутрішнього радіуса циліндра, відносна маса заряду ξ дорівнює $\xi = M/m$ де m – погонна маса циліндра. Ударна вибухова хвиля тиску на внутрішній поверхні оболонки розраховується методикою CONWER [3, 4]. Повна система диференціальних рівнянь разом з початковими, граничними і контактними умовами приведена в [1].

Для дослідження було обрано такі матеріали: внутрішній шар - ізотропна пружнопластична сталь Ст20 з фізико-механічними характеристиками: $\rho = 7860 \text{ кг/м}^3$; $E = 212000 \text{ МПа}$; $\nu = 0,3$; $\sigma_T = 250 \text{ МПа}$. Тут ρ – щільність; E – модуль Юнга; ν - коефіцієнт Пуассона; σ_T – границя текучості. Для зовнішнього шару було обрано 4 найбільш характерних композита: графітоепоксит Т300/Ероху з об'ємним вмістом волокон 0,3 та 0,65 (КМ №1 та КМ №2 відповідно), склоепоксит S2/8511-7 з об'ємним вмістом волокон 0,3 та 0,65 (КМ №3 та КМ №4 відповідно). Фізико-механічні характеристики наведено в [5]. Внутрішній радіус R і загальна товщина H циліндричної МК оболонки залишались у всіх розрахунках постійними: $R = 150 \text{ мм}$ і $H = 20 \text{ мм}$. Тобто маємо циліндричну оболонку середньої товщини: $H/R = 0,13333$. Товщина внутрішнього сталевго шару h змінювалася в межах від 0 до 10мм. Таким чином відносна товщина металу $\beta = h/H$ змінювалася в закритому інтервалі від 0 до 0,5. При $\beta = 0$ маємо одношарову композитну оболонку, при $\beta > 0$ – МК двошарову.

Навантаження. Маса заряду вибухової речовини в тротиловому еквіваленті M залежала від β таким чином, щоб відносна маса заряду $\xi = M/m$ лишалася незмінною [1, 5]. Тут m – погонна маса (на одиницю довжини) оболонки:

$$m = \pi H [\rho_m \beta (2R + \beta H) + \rho_k (1 - \beta) (2R + H + \beta H)] , \quad (1)$$

де ρ_m – щільність металу; ρ_k – щільність композиту. Тобто $M(\beta)$ дорівнює

$$M(\beta) = \xi m \quad (2)$$

при цьому $m(\beta)$ розраховується згідно (1). Всюди далі ξ для всіх чотирьох видів МК циліндрів і різних β (від 0 до 0,5) було незмінне і дорівнювало $\xi = 5 \text{ мм} = \text{const}$. Значення M (в грамах) для всіх чотирьох видів МК циліндрів і різних β (від 0 до 0,5) наведені в табл.1, ударна хвиля (УХ) тиску діюча на внутрішню поверхню оболонок розраховувалась за методикою CONWER [3, 4].

Табл.1. Залежність $M(\beta)$ для чотирьох видів МК циліндрів.

β	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
[Ст20; КМ №1]	135,4Г	197,2Г	259,8Г	323,2Г	387,4Г	452,5Г
[Ст20; КМ №2]	156,2Г	216Г	276,6Г	338Г	400,2Г	463,2Г
[Ст20; КМ №3]	164,2Г	223,2Г	283,1Г	343,7Г	405,1Г	467,2Г
[Ст20; КМ №4]	206,8Г	261,9Г	317,6Г	374,2Г	431,4Г	489,4Г

Розрахунки $\Phi_{\max}$ для всіх розглянутих видів МК циліндрів в залежності від β представлені в табл.2. Верхнє число в клітинках відповідає розрахунку коли внутрішній сталевий шар (Ст20) пружнопластичний ($\sigma_T = 250$ МПа), нижнє – ідеально пружний ($\sigma_T = \infty$).

Табл.2. Залежність $\Phi_{\max}(\beta)$ для чотирьох видів МК циліндрів.

β	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
[Ст20; КМ №1]	1,347	1,235	1,16	1,149	1,107	1,218
	1,347	1,104	1,024	0,911	0,782	0,688
[Ст20; КМ №2]	1,342	1,357	1,287	1,34	1,311	1,172
	1,342	1,26	1,105	1,049	0,897	0,804
[Ст20; КМ №3]	0,9834	0,861	0,778	0,7225	0,715	0,7155
	0,9834	0,8635	0,778	0,7225	0,652	0,582
[Ст20; КМ №4]	0,9994	0,952	0,864	0,811	0,7595	0,808
	0,9994	0,909	0,864	0,811	0,719	0,597

Пружнопластичний розрахунок для всіх циліндрів окрім [Ст20; КМ №2] показує що оптимальне співвідношення $\beta_{\text{опт}}$ товщин шарів Ст20/КМ (при якому $\Phi_{\max}$ буде мінімальною) знаходиться в околиці $\beta_{\text{опт}} \approx 0,4$. При цьому для МК циліндрів з КМ №1 і КМ №2 умова міцності (3) не задовольнялась ні при яких β , а для циліндрів з КМ №3 і КМ №4 задовольнялась при всіх β включаючи $\beta=0$. Для МК циліндрів [Ст20; КМ №2] підкріплення пружнопластичною Ст20 взагалі для розглянутого $\xi = 5$ мм не має практичного сенсу: ефект зміцнення починається тільки при достатньо великих β (починаючи з $\beta \approx 0,5$ і можливо ще більших) але при цьому об'єм сталеві частки оболонки починає перевищувати об'єм композитної, а маса сталевий шару більше ніж в п'ятеро перевищувати масу композитного. Ідеально пружний розрахунок показав достатньо очікувані результати: при заданому фіксованому $\xi = 5$ мм міцність всіх МК циліндрів росте разом з β ($\Phi_{\max}$ як функція β монотонно спадає). Тобто підкріплення таких оболонок високоміцними сталями (типу Ст40ХНМА) з високими границями текучості буде ефективніше ніж сталями з відносно низькими σ_T .

Амплітуда радіальних коливань циліндрів також суттєво залежала від виду КМ зовнішнього шару, β і границі текучості σ_T внутрішнього сталевий шару. В пружнопластичній постановці ($\sigma_T=250$ МПа) для всіх чотирьох типів МК циліндрів максимальний прогин $u_{\max}$ внутрішньої поверхні при зростанні β від 0 до 0,5 також монотонно зростає, причому майже лінійно. В пружній постановці ($\sigma_T=\infty$) ця залежність монотонно спадаюча для циліндрів з КМ №3 і КМ №4, монотонно зростаюча для [Ст20; КМ №2], а для [Ст20; КМ №1] вона хоч і немонотонна але дуже незначна: $u_{\max}$ при зміні β майже не міняється. Пружнопластичний розрахунок завжди показує більший прогин порівняно з ідеально пружним і різниця між ними росте разом із β .

Небезпечна точка в більшості випадків знаходилась в КМ поблизу контактної поверхні зі сталевим внутрішнім шаром ($r=R+h+0$) або (при $\beta=0$) поблизу внутрішньої

поверхні циліндра ($r=R+0$). Небезпечним моментом часу був або початок навантаження, коли в композит проходила УХ тиску максимальної амплітуди, або чверть періоду ($T/2$) радіальних коливань, коли оболонка максимально вигиналась і σ_ϕ були також максимальні. При цьому в пружнопластичній постановці в більшості випадків небезпечним моментом був $T/2$ а в ідеально пружній – початок навантаження. Найбільшу небезпеку з трьох тензорних компонент зазвичай представляли радіальні і/або осеві напруження.

Досліджувані композити мають суттєво (на порядок і навіть більше) нижчі границі міцності в площині ізотропії xr порівняно з аналогічними в коловому напрямку армування. Тому міцність визначається всіма напруженнями: σ_r , σ_x і σ_ϕ хоча останнє зазвичай і набагато вище перших двох і з точки зору НДС повинно було б грати головну роль при оцінці міцності. Зауважимо, що в більшості теорій оболонок радіальними напруженнями σ_r взагалі нехтують хоча для даних задач саме вони в половині (можливо і в більшій половині) випадків і будуть визначати міцність.

Висновки. Для розглянутих МК циліндрів міцність оболонок монотонно зростає разом зі зростанням границі текучості внутрішнього сталевго шару. При використанні в якості підкріплюючого внутрішнього шару Ст20 при фіксованій відносній масі заряду $\xi = 5\text{мм}$ оптимальна з точки зору міцності відносна товщина металу β для більшості МК циліндрів виявилась близькою до $\beta \approx 0,4$ але для деяких КМ ефект зміцнення не проявлявся зовсім – міцність циліндрів зростала разом з β . Міцність МК циліндрів суттєво залежить від виду матриці, волокна і його об'ємного вмісту а також пластичних властивостей металу. Найбільшу небезпеку можуть представляти як колові напруження σ_ϕ так і радіальні σ_r . Найбільш небезпечний момент часу може бути таким: початок навантаження коли маємо максимальні стискаючі σ_r на внутрішній поверхні внутрішнього композитного шару; відбиття УХ від зовнішньої поверхні циліндра коли маємо максимальні розтягуючі σ_r близько зовнішньої поверхні циліндра (зовнішній відкол); чверть періоду радіальних коливань циліндра $T/2$ коли оболонка максимально вигинається і маємо максимальні розтягуючі σ_ϕ . Небезпечна точка при цьому також може знаходитись в різних місцях: як близько внутрішньої або зовнішньої поверхні композитного шару так і в його середині.

Перелік посилань

1. P. P. Lepikhin, V. A. Romashchenko, O. S. Beiner, S. O. Tarasovska Influence of metal layer thickness on the stress-strain state and strength of metal composite cylinders under internal explosion. *Strength Mater.* 2022. Vol. 54, N 3. P. 358-371.
2. П. П. Лепихин, В. А. Ромащенко Прочность неоднородных анизотропных полых цилиндров при импульсном нагружении. – Киев: Наук. думка, 2014. – 232с.
3. D. W. Hyde User's guide for microcomputer program CONWEP, application of TM5-855-1, Fundamentals of protective design for conventional weapons, 1992.
4. G. Randers-Pehrson, K. A. Bannister Airblast Loading Model for Dyna-2D & Dyna-3D. *Army Research Laboratory*. - ARL-TR-1310. – 1997, 97p.
5. Lepikhin, P.P., Romashchenko, V.A., Tarasovska, S.O. *et al.* Influence of Filler and Fiber Properties and Their Ratio on the Dynamics and Strength of Reinforced Cylinders Under Internal Explosion. *Strength Mater.* 2024. Vol. 56, N 5. P. 917–927.
6. Romashchenko, V.A. Limitations Of Some Strength Criteria For Composite Materials. *Strength Mater.* 2019. Vol. 51, N 6. P. 828–833.