А.П.Дзюба, П.А.Дзюба

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ ПОЗДОВЖНЬО СТИСНУТИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ОБОЛОНОК ПРИ НАКОПИЧЕННІ ВИПАДКОВИХ РОЗРІЗІВ-ТРІЩИН*

Дніпровський національний університет ім. Олеся Гончара, пр. Гагаріна, 72, 49045, Дніпро, Україна; e-mail: dzb@ua.fm

Abstract. The results of systematic experimental studies of the influence of different numbers of randomly located and oriented cylindrical shells are presented. The shells contain the rectilinear cross-sections simulating the accumulation process of material cracks. An effect of the critical strength of their stability loss during longitudinal compression is studied. The methods of pre-critical behavior, stability loss, waveforms, and the dependence of the critical load on the number of random cross-cuts-cracks were analyzed. The results can be useful for predicting the survivability of shell structures when a damage of various nature accumulates.

Key words: cylindrical shell, random damage, cut-crack, experimental study, stability, longitudinal compression.

Вступ.

Тонкостінні циліндричні оболонки є важливими елементами конструкцій в авіакосмічній, суднобудівній, хімічній, нафтогазовій та в багатьох інших галузях техніки, машинобудування і будівництва. У відповідності до конструктивних і технологічних вимог оболонкові конструкції часто мають на бічних поверхнях отвори різних розмірів, форми та розташування. Наскрізні вирізи, тріщини та інші пошкодження можуть з'являтися також і в процесі експлуатації. Їх поява знижує несучу здатність оболонки, оскільки призводить до втрати суцільності матеріалу на певних ділянках, виникнення концентраторів напружень та локального моментного напруженого стану, інтенсивність якого часто є визначальною причиною руйнування, як правило, у вигляді втрати стійкості таких тонкостінних елементів.

Напружено-деформований стан ослаблених вирізами оболонок досліджено досить повно і висвітлено у роботах [5, 7, 10, 14]. У той же час вирішення задачі про вплив отворів на стійкість тонкостінних пружних оболонок виявляється більш складним. Така ситуація обумовлюється тим, що ще задовго до досягнення критичного навантаження відбувається значний перерозподіл напружень, викликаний взаємодією двох полів – основного напруженого стану, що розподіляється по всій поверхні оболонки, та зони збурення біля отвору. Математичні труднощі пов'язані тут з неможливістю розділення напруженого стану на суму двох – основного і додаткового, викликаного наявністю концентратора напружень. Проблемі математичного моделювання нелінійного закритичного деформування оболонок присвячені роботи [2, 9, 13, 19, 20, 22].

Складність проблеми прогнозування несучої здатності тонкостінних оболонкових елементів зростає, коли місце розташування таких пошкоджень має випадковий характер, а їх кількість з плином часу експлуатації накопичується. У цьому випадку вини-

* За матеріалами доповіді на Міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми механіки – 2023», присвяченій 145-річчю від дня народження С.П. Тимошенка, Київ, 14 – 16 листопада 2023 р.

кає, зокрема, і додаткова проблема врахування взаємного впливу викликаних такими концентраторами напружень збурень. Зазначені аспекти проблеми у зв'язку з суттєвою нелінійністю процесу формозмінювання при втраті стійкості залишаються все ще недостатньо дослідженими.

Постановка і проведення відповідних системних експериментальних досліджень у цьому напрямку в свою чергу також пов'язана з подоланням суттєвих труднощів технічного характеру.

Опубліковані на даний час результати експериментальних досліджень з проблеми стійкості циліндричних оболонок з наскрізними пошкодженнями охоплюють лише незначну область зміни розмірів отворів, їх форми, кількості і розташування [4, 9, 21, 24, 25]. Це, як правило, моделі оболонок з одним або декількома отворами чи розрізами, результати досліджень яких були отримані різними авторами і відносяться до оболонок, виготовлених з різних матеріалів, за різними технологіями, що мають різні розміри і випробувані за різними методиками, тому зіставлення і узагальнення цих результатів є досить проблематичним.

Загалом проблема прогнозування критичних навантажень таких послаблених пошкодженнями оболонок належить до найважливіших задач механіки.

У даній статті поставлена задача проведення широкомасштабного системного експерименту, спрямованого на дослідження впливу накопичення різної кількості випадково розташованих і орієнтованих на бічній поверхні прямолінійних наскрізних розрізів на величину критичної сили, процес втрати стійкості та формоутворення поверхні циліндричних оболонок в умовах поздовжнього навантаження.

1. Вибір матеріалу моделей та технологія випробувань.

При проведенні коректних експериментальних досліджень однією з перших виникає проблема виготовлення номінально однакових високоякісних моделей [3, 4, 8, 25]. Моделі оболонок повинні бути такими, щоб різниця критичних навантажень для різних номінально однакових зразків була меншою різниці, пов'язаної зі зміною досліджуваного параметра. В протилежному випадку недосконалості моделей можуть повністю нівелювати результати проведених досліджень.

Відома [4, 6, 8, 18, 25] досить висока чутливість величини критичної сили втрати стійкості гладкої циліндричної оболонки до початкових геометричних недосконалостей (форми поверхні, різнотовщинності), а також до нерівномірності навантаження, умов закріплення та інших факторів, що мають місце вже при виготовленні. У більшості випадків саме вони і ініціюють втрату несучої здатності оболонки. Ступінь впливу таких недосконалостей моделей (відхилень реальної оболонки від ідеалізованої моделі) в значній мірі визначається відносною товщиною оболонки δ / R. Очевидно, що зменшення параметру δ / R, зокрема, при зменшенні товщини стінки δ при заданому радіусі R кривизни оболонки, приводить до збільшення впливу початкових геометричних недосконалостей форми, що за даними відомих експериментальних досліджень може зменшувати значення критичних навантажень до 50 – 70% [4].

Прагнення зменшити вплив таких слабо контрольованих початкових геометричних недосконалостей на результати досліджень шляхом збільшення відносної товщини δ / R моделей приводить до виникнення впливу іншого фактору – появи пластичних деформацій, що виключає можливість проведення експерименту в пружній області. Початок прояву цього фактора для різних матеріалів визначається відношенням границі текучості до модуля пружності (σ_T / E), як певного граничного значення відносної товщини, що дає можливість уникнути пластичних деформацій. Чим вищим є значення цього відношення, тим більшим є діапазон випробовування оболонки в пружній області.

Для тонкої листової нагартованої нержавіючої сталі марки Х18Н9н, яка найбільш широко застосовується в експериментальних дослідженнях $\sigma_T / E \approx 4{,}0 - 4{,}5 \times 10^{-3}$, що дозволяє проводити в пружній області дослідження стійкості циліндричних обо-

лонок при навантаженні їх осьовою стискаючою силою до максимальних значень $\delta / R \approx 6{,}5 - 7{,}0 \times 10^{-3}$.

В даній роботі для масового виготовлення моделей циліндричних оболонок (радіусом $R = 0{,}0375$ м, робочою довжиною $L_p = 0{,}075$ м), які використовувались для проведення експериментальних досліджень та отримання демонстраційних картин форм втрати стійкості оболонок з випадковими пошкодженнями, було використано спеціальний (креслярський) папір.

Уперше можливість дослідження поведінки тонкостінних оболонок, виконаних з паперу, була показана в [23], а пізніше в [12]. Загальна методологія виготовлення моделей оболонок та обґрунтування можливостей ефективного застосування такого матеріалу для експериментального дослідження їх стійкості наведені в статтях [15 – 17].

Основні механічні характеристики, які були визначені за результатами експериментальних випробувань зразків цього матеріалу, приймалися наступними: модулі пружності $E_x = 6{,}9$ Гпа ; $E_y = 3{,}45$ Гпа ; $G_{xy} = 1{,}92$ Гпа ; коефіцієнти Пуассона $\mu_x = 0{,}3$; $\mu_y = 0{,}15$; межі міцності $\sigma_{x,b} = 45$ МПа ; $\sigma_{y,b} = 30$ МПа . Тут індекси x і y відповідають головним напрямкам ортотропії паперового аркуша. Товщина стінки моделі оболонки становила $\delta = 0{,}00023$ м .

У цілому, як показали експериментальні дослідження механічних властивостей матеріалу, який використовувався для виготовлення моделей, існує відношення умовної межі текучості σ_T до модуля пружності E_x у поздовжньому напрямку $\sigma_T / E_x \approx 3{,}6 \times 10^{-3}$, що дає можливість проводити експериментальні дослідження в пружній області на моделях з порівняно великою відносною товщиною (до $\delta / R \approx 6 \times 10^{-3}$).

Таким чином, незважаючи на низькі, у порівнянні з металами, абсолютні значення пружних характеристик вибраного матеріалу, відношення границі його текучості до модуля пружності досягає цих показників для високоміцної (високолегованої нержавіючої) сталі. Крім того, цей матеріал відрізняється досить високою стабільністю і однорідністю механічних властивостей та геометрії заготовок. Але головною перевагою цього матеріалу є його висока технологічність при виготовленні моделей. Це дозволяє виготовляти високоякісні практично ідентичні моделі оболонок та спрощує їх підготовку до випробувань без істотних матеріальних витрат, що дозволяє проводити експериментальні дослідження, які практично неможливо виконати на металевих оболонках.

Заготовка моделі оболонки мала форму прямокутної розгортки, що вирізалася зі стандартного аркуша паперу, з якого виготовлялися моделі таким чином, щоб її сторони були паралельними головним напрямкам ортотропії. При цьому головний напряок E_x (вісь x) збігався з утворюючою оболонки, а E_y (вісь y) з напрямною оболонки.

Координати розташування геометричного центру по осях x і y та кутів нахилу наскрізних розрізів визначались за допомогою програми генерації рівномірного розподілу випадкових величин. Розташування розрізів приймалося різними для кожної з випробуваних моделей. Розрізи могли бути розташовані в будь якій точці бокової поверхні оболонки, перетинатись, скупчуватись на окремих ділянках і т.п. Отримані таким чином розташування прямолінійних розрізів роздруковувались на звичайному папері в масштабі розгортки. Ці зображення накладались на заготовку для виготовлення моделі.

З метою забезпечення якості та ідентичності таких наскрізних розрізів кінцеві точки «наколювались» однаковою для всіх моделей голкою. Далі випадково розміщені наскрізні розрізи-тріщини вирізалися безпосередньо на заготовці за допомогою спеціальних добре загострених ножів.

Виготовлення моделей оболонок здійснювалось шляхом склеювання країв заготовок внаклад (ширина смуги клейового шва становила $a = 0{,}005$ м) на жорсткому металевому циліндрі діаметром 0,075 м. Модель оболонки утримувалась на циліндрі до повної полімеризації клею за допомогою еластичної гумової стрічки. Після склеюван-

ня оболонка знімалася з циліндра і до криволінійних крайок на ширину смуги $b = 0,02$ м з кожної сторони оболонки приклеювалися кругові металеві торці, що забезпечували на криволінійних краях оболонки граничні умови, близькі до жорсткого затиснення і можливість передачі на оболонку заданих силових факторів, зокрема, осьової сили. Така технологія виготовлення моделей забезпечувала відсутність на моделях, включаючи і ділянку в околі розрізів, залишкових деформацій.

Слід зазначити, що одним із основних критеріїв якості циліндричних оболонок, виготовлених для експериментальних досліджень стійкості, є відношення експериментальних значень критичних напружень до розрахункових, отриманих для оболонок ідеальної геометричної форми [5]. У більшості випадків при осьовому стиску це відношення не перевищує 50%, а якісним вважається експеримент, у якому відношення досягає 60 – 70% [4]. І лише в окремих часткових випадках, коли підвищення цього показника було основною метою експериментального дослідження, на оболонках, що виготовлялись за спеціальною технологією, експериментальні значення критичних напружень досягали 80 – 85% від теоретичних.

На рис. 1, у відповідності з даними, приведеними на рис. 7.17 монографії [4] с. 127, подані значення відносних зусиль $k_{\text{с}} = P^{\text{e}}_{\text{кр}} \big/ P^{m}_{\text{кр}}$ поздовжнього стиску гладких циліндричних оболонок та емпіричні криві, що узагальнюють результати відомих експериментальних досліджень.

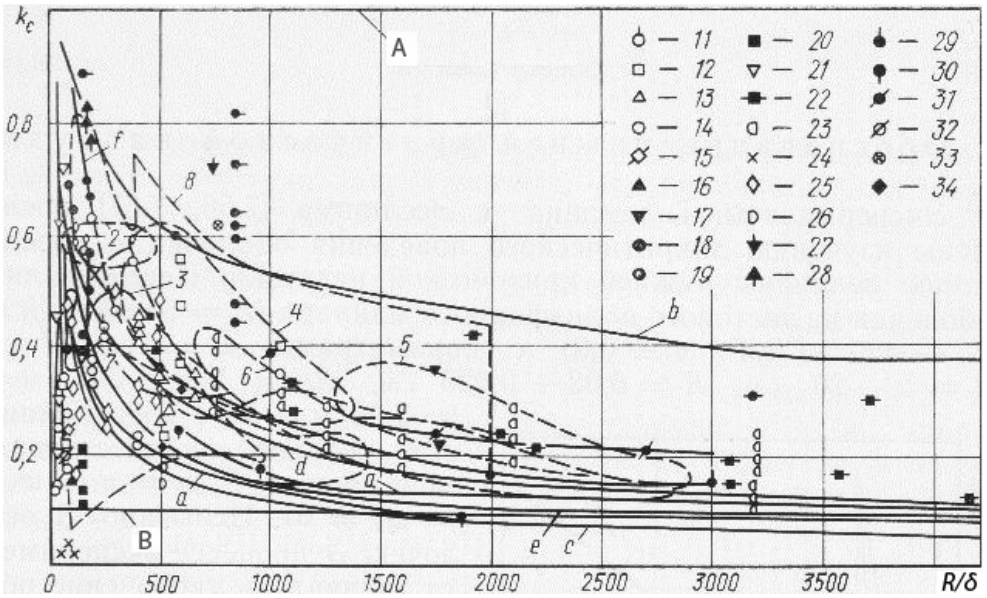


Рис. 1

Тут $P^{\text{e}}_{\text{кр}}$, $P^{m}_{\text{кр}}$ - експериментальні та теоретичні критичні зусилля втрати стійкості оболонок, відповідно; лінії *A* і *B* відповідають розрахункам за лінійною та нелінійною теоріями, відповідно; номери ліній *1* – *34* – іменам авторів проведених експериментів у відповідності з [4]: *1* – Flügg, *2* – Robertson, *3* – Bridget та ін., *4* – Lundquist, *5* і *6* – GALCIT, *7* – Donnell, *8* – Wilson, *9* – Божинський, Вольмир, *10* – Weingarten та ін., *11* – Karman, *12* – Fitzgibbon, *13* – Goree, Nash, *14* – Агамиров, *15* – Gerard, *16* – Burns, Crawford, *17* – Thielemann, *18* – Almroth та ін., *19* – Ісправников, *20* – Геммерлінг, *21* – Moore, Clark, *22* – Ballerstedt, Wagner, *23* – Kanemitsu, Nojima, *24* – Alexander, *25* – Буштирков, Родителев, *26* – Зубчаников, *27* – Babcock, Sechler, *28* – Peterson, Dow, *29* – Batdorf та ін., *30* – Fung, Sechler, *31* – Harris та ін., *32* – Pugsley, *33* – Fischer, *34* – Lo, Crate, Schwartz.

Для перевірки якості моделей оболонок, виготовлених за викладеною вище технологією, та обґрунтування достовірності одержуваних експериментальних результатів, додатково були проведені випробування на осьовий стиск 10-ти суцільних циліндричних оболонок з робочою довжиною $L=0,08$ м та радіусом $R=0,0375$ м, для яких $L/R=2,13$ та $\delta/R\approx 1/160$. Результати випробувань зазначених моделей оболонок мали практично ідентичну картину втрати стійкості оболонки та стабільний рівень величини критичних напружень. Осереднені критичні напруження випробуваних моделей при цьому виявилися в діапазоні $\sigma_э=(110\div 118)\times 10^5$ Па при розкиді даних до 6%. Розрахункові значення критичних напружень при осьовому стиску ортотропної циліндричної оболонки були одержані з використанням наведеної в [1] залежності:

$$\frac{\sigma_x}{E_x}=\frac{\alpha}{\sqrt{3\left(1-\mu_x\cdot\mu_y\right)}}\cdot\sqrt{E_x\cdot E_y}\left(\frac{\delta}{R}\right), \qquad (1)$$

де $\alpha=\sqrt{\dfrac{\left(2E_y+2\mu_y\sqrt{E_x\cdot E_y}+4G_{xy}\left(1-\mu_x\cdot\mu_y\right)\sqrt{E_y/E_x}\right)G_{xy}}{2E_y\cdot G_{xy}+\left(E_x\cdot E_y-2\mu_x\cdot G_{xy}\right)\sqrt{E_y/E_x}}}$.

Для вибраної геометрії досліджуваних оболонок і пружних характеристик їх матеріалу розрахункові значення критичних напружень виявились рівним $\sigma_x=$ $=17,25$ МПа. При цьому, відношення $k_c=P_{\text{кр}}^{\text{e}}\big/P_{\text{кр}}^{m}$ експериментальних значень критичних напружень до розрахункових становило біля 66% від теоретичних. Ці дані свідчать про досить високу якість моделей циліндричних оболонок, які використовувались в поданому дослідженні, оскільки тільки в 6-ох з відомих публікацій ([4]) отримане значення параметра k було більшим 0,66 (на рис. 1 показано знаком «*»).

Таким чином, вибраний матеріал та технологія підготовки моделей забезпечують можливість виготовлення значної кількості практично ідентичних високоякісних моделей оболонок для проведення широкомасштабних експериментальних досліджень при досить високій купності значень критичних навантажень втрати стійкості.

§2. Результати експериментальних випробувань.

Навантаження моделей оболонок проводилося за схемою «мертвого вантажу» через тягу, яка шарнірно кріпилася в центральній частині верхнього торця та проходила через отвір у нижньому торці і плиті. Така схема навантаження забезпечувала рівномірний розподіл осьового зусилля по периметру оболонки.

Усього було випробувано 160 моделей оболонок. Довжина розрізів на всіх оболонках була однаковою і становила 0,01 м. Кількість розрізів змінювалася у широкому діапазоні: від $n=0$ – суцільна оболонка і далі $n=$ 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 15; 20; 30; 40; 50; 60; 80; 100; 120 шт. Для кожної кількості розрізів було випробувано по 8 моделей з різним випадковим розташуванням розрізів.

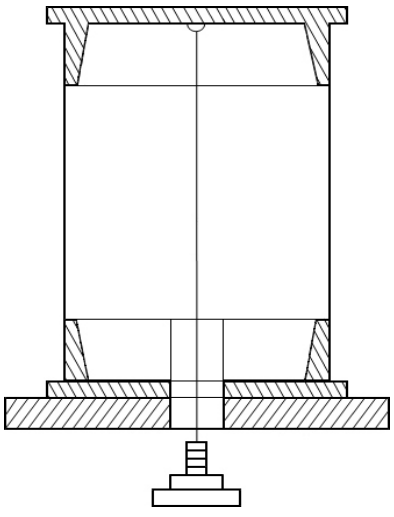


Рис. 2

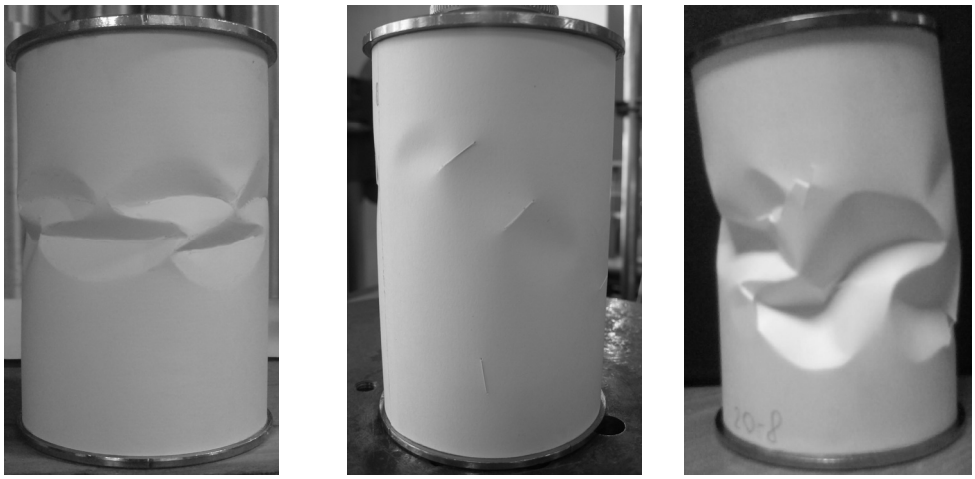
Схема установки для випробування оболонок з наскрізними розрізами бічної поверхні за поздовжнього стискання зображена на рис. 2.

В процесі проведення експерименту фіксувались величина критичної сили та картини форм втрати стійкості оболонок.

Суцільні оболонки втрачали стійкість хлопком з утворенням одного-двох поясів ум'ятин по 6 хвиль у кожному (рис. 3, *а*).

На оболонках з відносно невеликою кількістю розрізів (до 30-ти) спочатку, як правило, відбувалася локальна втрата стійкості. Докритичне деформування супроводжувалося появою біля берегів розрізів згинних деформацій, які можна було спо-

стерігати візуально. При цьому ум'ятини завжди утворювалися симетрично відносно берегів одного або декількох розрізів (рис. 3, *б*), що і визначало докритичні форми рівноваги. У закритичній стадії розрізи виявлялися на гребені, які розділяли дві сусідні ум'ятини. При збільшенні навантаження ці гребіні, як правило, «провалювались» всередину оболонки і утворювалася одна загальна більша за розмірами ум'ятина (рис. 3, *в*).



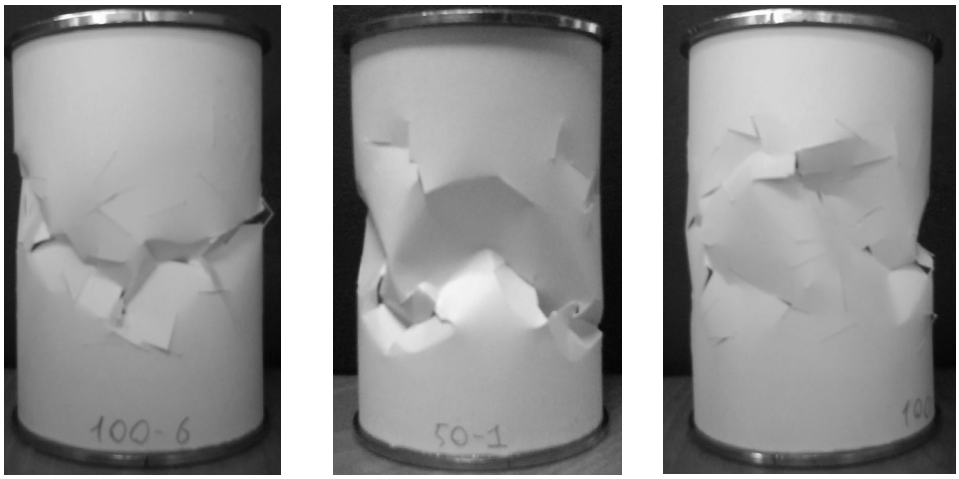
а *б* *в*

Рис. 3

Після локальної втрати стійкості для біля третини випробуваних оболонок спостерігався розвиток локальної ум'ятини при незмінному навантаженні, яке тривало не більше однієї хвилини і закінчувалося загальною втратою стійкості. Інші моделі після локальної втрати стійкості несли певне зростаюче (яке перевищувало критичне значення локальної втрати стійкості не більше, ніж на 6%) навантаження до загальної втрати стійкості. Загальна втрата стійкості завжди супроводжувалась втратою несучої здатності оболонки.

На оболонках з більшою кількістю розрізів (від 30-ти до 120-ти) локальна втрата стійкості не спостерігалася.

При подальшому збільшенні кількості випадково розташованих розрізів (до $n \approx 50$ – 60 шт) зазначена картина закритичного хвилеутворення порушувалася і ставала все менш регулярною. При цьому окремі розрізи (або їх сукупності) ініціювали утворення більших ум'ятин, які поєднували дві, а в деяких випадках і три ум'ятини звичайних, як для суцільної оболонки, розмірів (рис. 4).



а *б* *в*

Рис. 4

Можна було спостерігати також локальні втрати суцільності в околі вершин деяких розрізів. Оскільки хвилеутворення не захоплювало всю поверхню оболонки, деякі розрізи не «потрапляли» в область закритичних ум'ятин.

Результати експериментальних випробувань всіх 160-и моделей оболонок подані на рис. 5 у вигляді залежності приведеної критичної сили $\overline{P}_{\text{кр}} = P_{\text{кр}} \big/ P_{\text{кр}}^{\text{c}}$ від кількості n випадково розташованих розрізів, де $P_{\text{кр}}$ – значення критичної сили втрати стійкості кожної з випробуваних оболонок з пошкодженнями, а $P_{\text{кр}}^{\text{c}}$ – середньої критичної сили, обчисленої за результатами випробувань восьми суцільних оболонок.

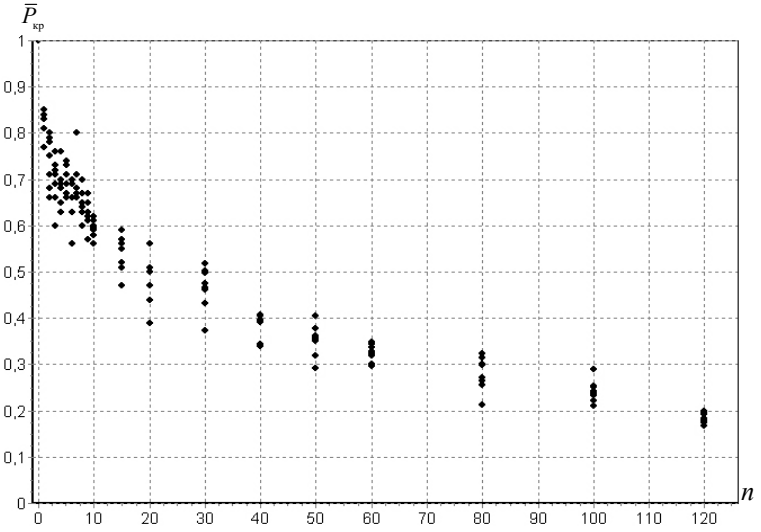


Рис. 5

За результатами випробувань було проведено статистичний аналіз отриманих даних з урахуванням того, що положення розрізів на оболонках, координати їх геометричних центрів і кутів нахилу до утворюючої оболонки визначалися випадковим чином для кожної з випробуваних моделей із заданою кількістю пошкоджень.

Для побудови гістограми були взяті результати випробувань усіх 20-ти серій для фіксованої кількості пошкоджень ($n = 0,\ 1;\ 2;\ 3;\ 4;\ 5;\ 6;\ 7;\ 8;\ 9;\ 10;\ 15;\ 20;\ 30;\ 40;\ 50;\ 60;\ 80;\ 100;\ 120$ шт), для кожного з яких випробовувалося по 8 оболонок з різним для кожної випадковим розташуванням n розрізів. Дані були зведені в одну вибірку та пронормовані за формулою

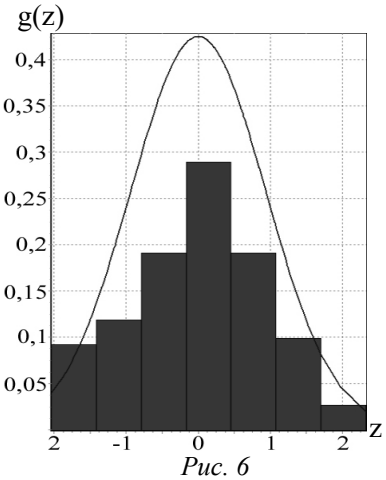


Рис. 6

$$z_i = (P_{\text{кр},i} - P_{\text{кр}}^{*}) \big/ S, \qquad (2)$$

де $S^2 = \dfrac{1}{k-1}\sum_{i=1}^{k}(P_{\text{кр},i} - P_{\text{кр}}^{*})^2$; $P_{\text{кр},i}$; $P_{\text{кр}}^{*}$ – критичні сили i-го випробування та їх середнє значення, відповідно; k – загальна кількість випробувань. Використовуючи критерії Колмогорова, Мізеса, Пірсона, було побудовано нормальний розподіл випадкової величини критичної сили [11]. Гістограма та теоретична функція щільності $g(z)$ відновленого розподілу наведені на рис. 6.

Для суцільних оболонок розкид критичних навантажень склав 2,5%, що підтверджує досить високу якість випробуваних моделей. Тому точ-

ки, що відповідають результатам випробувань кожної із суцільних оболонок, практично зливаються в одну і на рис. 5 подане їх середнє значення $\overline{P}_{\text{кр}} = 1$.

Для оболонок з розрізами розкид експериментальних даних виявився значно більшим. Це пояснюється тим, що для кожної з моделей, що мали однакову кількість розрізів, координати їх випадкового розміщення визначались індивідуально і виявлялися суттєво різними. Максимальний розкид (24,1%) від середнього значення критичного навантаження був отриманий при 80-ти розрізах. Слід зазначити, що якась певна залежність величини розкиду від кількості розрізів не спостерігалася.

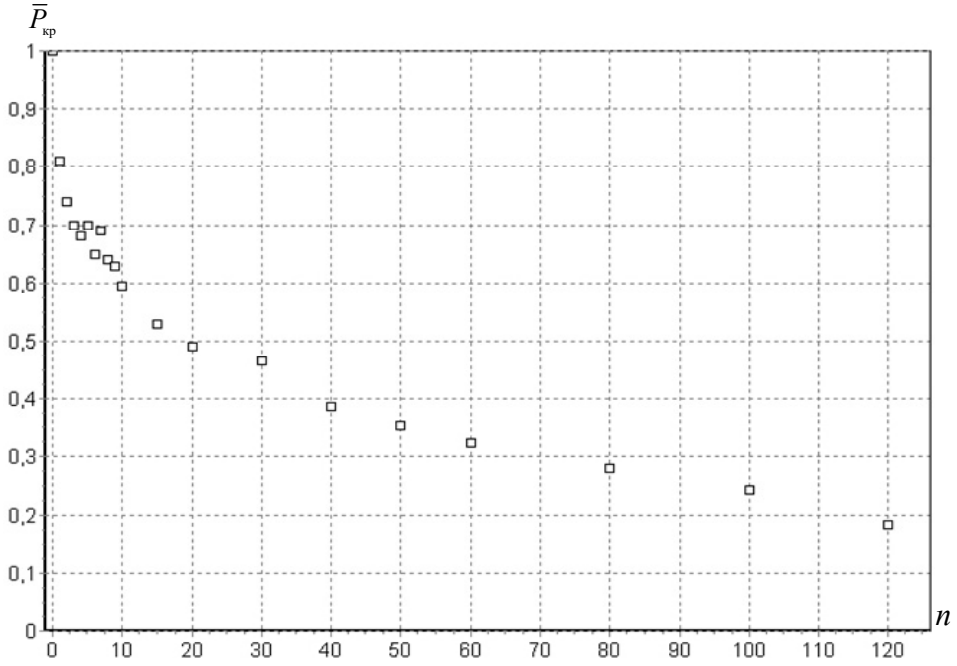


Рис. 7

На рис. 7 знаком «□» зображені осереднені (для випробуваних оболонок з однаковою кількістю різним чином випадково розташованих розрізів) значення приведеної критичної сили (рис. 5) втрати стійкості залежно від кількості n розрізів-пошкоджень їх бічної поверхні.

Якісний аналіз усієї сукупності (160 моделей) отриманих експериментальних даних показав, що залежність критичної сили від кількості пошкоджень є неоднорідною.

На першій ділянці ($n = 0 \div 10$ шт) спостерігається найбільша швидкість падіння навантаження, де вже наявність одного розрізу приводить до зниження критичного навантаження на 19%. При збільшенні кількості розрізів від нуля до 10-ти критична сила зменшується на 39%.

На другій ділянці ($n = 10 \div 30$ шт) швидкість падіння навантаження помітно зменшується, а збільшення кількості розрізів від $n = 10$ шт до $n = 30$ шт приводить до зниження $\overline{P}_{\text{кр}}$ на 14%.

На третій ділянці спостерігається найменша швидкість падіння критичної сили. При зміні кількості розрізів від $n = 30$ шт до $n = 120$ шт навантаження падає на 28%.

У цілому ж, наявність на поверхні оболонки 120-ти розрізів, кожний з яких має довжину 0,01 м, приводить до зниження критичної осьової сили на 81%.

Слід зазначити також досить цікавий факт: оболонка з випадково розташованими розрізами, сумарна довжина яких становить 1,2 м, що більше, ніж в 5 разів перевищує довжину її кругового поперечного перерізу, витримує осьову стискаючу силу, що складає більше 20% від критичного навантаження для суцільної оболонки.

Таким чином, в даній статті запропонована методологія експериментального дослідження впливу накопичення випадково розташованих пошкоджень суцільності у вигляді прямолінійних розрізів-тріщин бічної поверхні на живучість (що визначається втратою стійкості) навантаженої осьовою стискаючою силою циліндричної оболонки. Підхід є досить ефективним і достовірним, що обумовлено вдалим вибором матеріалу, технології виготовлення моделей та можливістю проведення широкомасштабних випробувань.

Результати проведених експериментальних досліджень можуть бути корисними для розробки методів прогнозування несучої здатності реальних оболонкових конструкцій в умовах випадкового накопичення пошкоджень їх поверхні.

Висновки.

Побудовано методику та наведено результати широкомасштабних експериментальних досліджень стійкості поздовжньо стиснутих циліндричних оболонок, ослаблених випадковими пошкодженнями, що дозволяє створити досить повну картину уявлень про процес, форми хвилеутворення та величину критичного навантаження втрати несучої здатності оболонок з різною кількістю випадково розташованих наскрізних розрізів.

Отримано нові знання про характер докритичного деформування та закритичних форм рівноваги для широкого діапазону накопичення різної кількості n (від $n=0$ до $n=120$ шт) випадково розташованих та орієнтованих на бічній поверхні циліндричної оболонки прямолінійних розрізів-тріщин.

Досліджено та проаналізовано особливості форм хвилеутворення та експериментально встановлено корисні у прикладному відношенні взаємозв'язки величини критичних навантажень поздовжньо стиснутих циліндричних оболонок від кількості випадкових розрізів-тріщин бокової поверхні.

Отримані дані, які подано у вигляді графіків залежностей критичної сили від кількості випадкових розрізів та картин формозмінювання втрати стійкості, можуть бути корисними для прогнозування залишкової несучої здатності пошкоджених оболонкових конструкцій, а також служити науково-методичним підґрунтям для побудови достовірних математичних моделей, верифікації числових алгоритмів розрахунку та створення методики прогнозування величини залишкової несучої здатності поздовжньо-стиснутих циліндричних оболонок в умовах накопичення пошкоджень у вигляді наскрізних розрізів бокової поверхні оболонки.

РЕЗЮМЕ. Описано результати системних експериментальних досліджень впливу різної кількості випадково розташованих та орієнтованих на бічній поверхні циліндричних оболонок прямолінійних наскрізних розрізів, що моделюють процес накопичення тріщин матеріалу, на критичну силу втрати їх стійкості при поздовжньому стиску. Проаналізовано процеси докритичної поведінки, втрати стійкості, форм хвилеутворення та залежності величини критичного навантаження від кількості випадкових наскрізних розрізів-тріщин. Результати можуть бути корисними для прогнозування живучості оболонкових конструкцій при накопиченні пошкоджень різної природи.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: циліндрична оболонка, випадкове пошкодження, розріз-тріщина, експериментальне дослідження, стійкість, поздовжній стиск.

1. *Бажанов В.Л., Гольденблат Н.Н., Копнов В.А. и др.* Сопротивление стеклопластиков. – Москва: Машиностроение, 1968. – 304 с.
2. *Баженов В.А.* Нелінійне деформування та стійкість пружних оболонок неоднорідної структури. – Київ: ЗАТ «Віпол», 2010. – 218 с.
3. *Бэбкок У.Д. мл.* Эксперименты по устойчивости оболочек. В кн.: Тонкостенные оболочечные конструкции. – Москва: Мир, 1980. – С. 355 – 379.
4. *Григолюк Э.И., Кабанов В.В.* Устойчивость оболочек. – Москва: Наука, 1987. – 360 с.

5. *Гузь А.Н., Дышель М.Ш., Кулиев Г.Г., Милованова О.Б.* Разрушение и устойчивость тонких тел с трещинами. – Киев: Наук. думка, 1981. –184 с.
6. *Доннелл Л.Х., Уан К.* Влияние неправильностей в форме на устойчивость стержней и тонкостенных цилиндров при осевом сжатии // Механика. Сб. перев. и обзоров иностр. период. лит-ры. – 1951. – **8**, № 4. – С. 91 – 107.
7. *Методы расчёта оболочек*: в 5-ти томах. Т.1. *Гузь А.Н., Чернышенко И.С., Чехов В.Н. и др.* Теория оболочек, ослабленных отверстиями. – Киев: Наук. думка, 1980. – 692 с.
8. *Моссаковский В.И., Маневич Л.И., Мильцин А.М.* Моделирование несущей способности цилиндрических оболочек. – Киев: Наук. думка, 1977. – 136 с.
9. *Ободан Н.И., Адлуцкий В.Я.* Потеря устойчивости цилиндрической оболочки с трещиной как причина разрушения // Вестник Днепровского ун-та. Серия: Механика. – 2005. – **10**, № 2. – С. 116 – 122.
10. *Осадчук В.А.* Напряженно-деформированное состояние и предельное равновесие оболочек с разрезами. – Киев: Наук. думка, 1985. – 224 с.
11. *Переверзев Е.С., Даниев О.Ф.* Вероятностные распределения и их применение. – Днепропетровск: Ин-т техн. механики, 2004. – 416 с.
12. *Чебанов В.М.* Исследование устойчивости тонкостенных оболочек при помощи моделей из бумаги // Инж. сборник. – 1955. – **22**. – С. 68 – 73.
13. *Чернишенко І.С., Комарчук С.М., Максимюк В.А., Сторожук Є.А.* Моделювання нелінійного деформування ортотропних циліндричних оболонок з отвором при врахуванні ексцентриситету його підкріплення // Доповіді НАН України. – 2016. – №1. – С. 34-40.
14. *Шевченко В.П., Довбня К.М.* Метод граничних інтегральних рівнянь у задачах статики пологих ортотропних оболонок з розрізами і отворами // Мат. методи та фіз-мех. поля. –2003. – **46**. – Вип. 1. – С. 47 – 59.
15. *Dzyuba A.P., Dzyuba P.A.* Experimental Studies of the Stability of Cylindrical Shells Damaged by Randomly Located Circular Holes // Int. Appl. Mech. – 2023. – **59**, N 2. – P. 218 – 224.
16. *Dzyuba A.P., Dzyuba P.A., Iskanderov R.A.* Numerical and experimental simulation of destruction of stretched cylindrical shell damaged by random cuts-cracks // Int. J. Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE) IJTPE. **53**. – 2022. – **14**, N. 4. – P. 175 – 181.
17. *Dzyuba A., Prokopalo E., Dzyuba P.* Experimental investigation on the torsional stability of cylindrical shells weakened be circular holes. // J. Strength of Materials. – 2017. – **49**, N 6. – P. 829 – 837.
18. *Evkin A.Yu., Krasovsky V.L.* A new model for calculation of critical pressure of cylindrical shells with initial imperfections // Proc. 28-th Polish Solid Mechanics Conf. – Kozubnik, 1990. – P. 65 – 68.
19. *Kamalarajah R., Stoffberg W., Bull W., Chizari M.* Stress analysis of uniform circular cylindrical shells with large circular holes. // Proc. World Congress on Engineering. London: U.K. July 1 – 3, 2015. – P. 1169 – 1172.
20. *Lugovyi P.Z., Gaidaichuk V.V., Skosarenko Yy.V., Kotenko K.E.* Stress-Strain State of Three-Layer Cylindrical Shells with Reinforced Light Core Under Nonstationary Loading // Int. Appl. Mech. – 2021. – **57**, N 4. – P. 395 – 404.
21. *Lykhachova O., Krasovsky V.* Numerical simulation of buckling tests of axially compressed cylindrical shells with one circular cutout (R. Tennyson's experiments) // Theoretical Foundations of Civil Engng. – 2014. – N 22 – P. 133 – 136.
22. *Maksimyuk V., Storozhuk A., Chernyshenko I.* Nonlinear Deformation of Thin Isotropic and Orthotropic Shells of Revolution with Reinforced Holes and Rigid Inclusions. // Int. Appl. Mech. – 2013. – **49**, N 6. – P. 685 – 692.
23. *Rhode R.V., Lundquist E.E.* Strength tests on paper cylinders in compression bending and shear // NASA. Techn. Notc. – 1931. – N 370.
24. *Stasiewics P.* Analytical and experimental studies of stability of cylindrical shells with a Cut – Out. // Mechanics and Mechanical Engng. – 2013. – **17**, N 2. – P. 167 – 176.
25. *Tennyson R.* The effects of unreinforced circular cutouts on the buckling of circular shells under axial compression // Trans. ASME. Structural Mechanics. – 1968. – **90**, N 4. – P. 541 – 546.

Надійшла 11.12.2023 Затверджена до друку 11.06.2024