УДК 539.3 https://doi.org/10.15407/itm2021.01.003

В. С. ГУДРАМОВИЧ[1], В. Н. СІРЕНКО[2], Е. Л. ГАРТ[3], Д. В. КЛИМЕНКО[4]

ПИТАННЯ МІЦНОСТІ І СТІЙКОСТІ НЕОДНОРІДНИХ КОНСТРУКЦІЙ РАКЕТНО-КОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ ПРИ УРАХУВАННІ ПЛАСТИЧНОСТІ І ПОВЗУЧОСТІ

[1]Інститут технічної механіки
Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,
вул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: hudramovich@i.ua
[2,4]Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля,
вул. Криворізька, 3, 49008, Дніпро, Україна; e-mail: v.n.sirenko@ukr.net
[3]Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара,
пр. Гагаріна, 72, 49010, Дніпро, Україна; e-mail: hart@ua.fm

Оболонкові конструкції оптимальним чином поєднують міцність і вагу, що визначає їх використання для ракетно-космічної техніки (РКТ). Високий рівень навантажень, тривалість навантаження призводять до появи деформацій пластичності і повзучості в елементах конструкцій. Особливістю конструкцій РКТ є їх неоднорідність: конструктивна (різнотовщинність, наявність підкріплень, вирізів-отворів і ін.), технологічна (наявність дефектів, що виникають в процесі виготовлення або в процесі експлуатації: зберігання, транспортування, непередбачені термомеханічні впливи). Зазначені фактори, що характеризують неоднорідність конструкцій, є концентраторами напружено-деформованого стану (НДС) і можуть призвести до передчасного руйнування елементів конструкцій або появі неприпустимих недосконалостей форми. При визначенні НДС неоднорідних конструкцій різні їх частини деформуються за своєю програмою і характеризуються різним рівнем НДС. При урахуванні фізичної нелінійності, яка визначається деформаціями пластичності і повзучості матеріалу, для визначення НДС ефективним є підхід, коли розрахунок розбивається на етапи, в кожному з яких вводяться параметри, що характеризують виниклі деформації пластичності і повзучості: додаткові навантаження в рівняннях рівноваги або крайових умовах, додаткові деформації або змінні параметри пружності (модуль пружності і коефіцієнт Пуассона). Будуються схеми послідовних наближень: на кожному етапі вирішується задача теорії пружності з введенням вищевказаних параметрів. Особливими є завдання визначення ресурсу космічних ракет-носіїв і стартових комплексів. Ресурс пов'язаний з виникненням ушкоджень при знакозмінних термомеханічних навантаженнях високої інтенсивності. Основним при визначенні ресурсу є підхід на основі теорії малоциклової і багатоциклової втоми. Пластичність і повзучість матеріалу – найважливіші фактори при розгляданні вказаних вище задач. Розглянуто різні аспекти вирішення задач міцності і стійкості об'єктів РКТ з урахуванням впливу деформацій пластичності і повзучості.

Ключові слова: *напружено-деформований стан, міцність, стійкість, пластичність, повзучість.*

Shell structures provide a compromise between strength and mass, which motivates their use in rocket and space hardware (RSH). High and long-term loads cause plastic and creep deformations in structural elements. RSH structures feature inhomogeneity: design inhomogeneity (polythickness, the presence of reinforcements, openings, etc.) and technological inhomogeneity (defects produced in manufacturing, operation, storage. and transportation, defects produced by unforeseen thermomechanical effects, etc.). These factors, which characterize structural inhomogeneity, are stress and strain concentrators and may be responsible for an early failure of structural elements and inadmissible shape imperfections. In inhomogeneous structures, different parts thereof are deformed by a program of their own and exhibit a different stress and strain level. In accounting for a physical nonlinearity, which is governed by plastic and creep deformations, the following approach to the determination of the stress and strain field is efficient: the calculation is divided into stages, and at each stage parameters that characterize the plastic and creep deformations developed are introduced: additional loads in the equilibrium equations or boundary conditions, additional deformations, or variable elasticity parameters (the modulus of elasticity and Poisson's ratio). Successive approximation schemes are constructed: at each stage, an elasticity problem is solved with the introduction of the above parameters. Special consideration is given to the determination of the launch vehicle and launch complex life. This is due to damages caused by alternate high-intensity thermomechanical loads. The basic approach relies on the theory of low- and high-cycle fatigue. The plasticity and the creep of a material are the basic factors in the consideration of the above problems. This paper considers various aspects of the solution of RSH strength and stability problems with account for the effect of plastic and creep deformations.

Keywords: *stress and strain field, strength, stability, plasticity, creep.*

Введення. Дослідження впливу пластичних деформацій та деформацій повзучості є актуальним для задач міцності і стійкості неоднорідних конструкцій ракетно-космічної техніки (РКТ). Оболонкові конструкції оптимальним чином поєднують міцність і вагу, що визначає їх пріоритетне застосування в РКТ. Особливістю конструкцій РКТ є їх неоднорідність: конструктивна (наявність підкріплень, різнотовщинність, вирізи-отвори, композиційна структура та ін.), технологічна (наявність пошкоджень: геометричні недосконалості, тріщини та ін.), що виникають в процесі виготовлення або в процесі експлуатації: зберігання, транспортування, непередбачені термомеханічні впливи), неоднорідності властивостей матеріалу (найбільш істотне її проявлення – поля залишкових напружень). При високих рівнях навантаження і тривалих термінах експлуатації виникають пластичні деформації і деформації повзучості (повзучість може бути і короткочасною – при високих температурах). Урахування цих факторів, що характеризують фізичну нелінійність, дає реальну оцінку міцності і працездатності конструкцій РКТ і дозволяють виявити додаткові резерви ваги.

При високих рівнях навантаження і тривалих термінах експлуатації виникають пластичні деформації і деформації повзучості (повзучість може бути і короткочасною – при високих температурах). Урахування цих факторів, що характеризують фізичну нелінійність, дає реальну оцінку міцності і працездатності конструкцій РКТ і дозволяють виявити додаткові резерви ваги.

Під пластичністю мається на увазі здатність тіла зазнавати деформацій, які не в повному обсязі зникають при видаленні причин, що їх викликали (зазвичай вкладається більш вузький зміст, пов'язаний з виникненням залишкових деформацій). Основне застосування механіки пластичних деформацій: оцінка напружено-деформованого стану (НДС) та несучої здатності конструктивних систем і технологічні задачі теорії пластичності [1 – 6]. Такі деформації в першу чергу виникають при локальних навантаженнях і контактних взаємодіях [7, 8]. Особливими є дослідження з урахуванням пластичних деформацій в задачах динаміки для тонкостінних конструкцій [9 – 11]. Принципове питання – вибір теорії пластичності (ТП) для опису процесів деформування [1, 2]. Поширення отримали деформаційна теорія і теорія пластичної течії, які дозволяють розглянути основні завдання ТП. Важливі аспекти ТП пов'язані з використанням мікронапруг і мікродеформацій, які враховують структурні зміни матеріалу. Такі поняття основні в теоріях трансляційно-кінематичного типу [2, 12]. При лінеаризації співвідношень ТП є ефективним використання методів пружних рішень; задачі ТП наводяться для побудови крокових процесів послідовних наближень, в кожному вирішується завдання теорії пружності з введенням параметрів, що характеризують особливості пластичного деформування (додаткові навантаження і деформації, змінні параметри пружності) [1, 4].

Термін "повзучість" характеризує вплив на процеси деформування такого найважливішого чинника як час [13, 14]. Необхідність обліку часу визначає відмінність теорії повзучості від теорій пружності та пластичності. Введення часу в розрахунки конструкцій не якийсь новий акт, час завжди враховувався, наприклад, в задачах динаміки конструкцій різних галузей техніки, де визначена залежність параметрів завдань від швидкостей і прискорень (сили внутрішнього тертя пропорційні швидкостям деформацій, а сили інерції пропорційні прискоренням мас). Особливістю теорії повзучості є те, що вона враховує час в повільних процесах, де сили інерції малі. У широкому сенсі повзучість – це зміна в часі деформацій і напружень, які виникли при початковому навантаженні. Зміна деформацій при постійній напрузі (повзучість) або зміна напружень при постійній деформації (релаксація) з плином часу може призвести до порушення працездатності елементів конструкцій. Пластичність і повзучість здійснюються більш інтенсивно при підвищених температурах. Суттєвою особливістю цих явищ є залежність НДС від історії навантаження (системи, де виявляються ці явища – неконсервативні).

Для різних видів неоднорідних конструкцій особливості цих явищ проявляються по-різному. Розрахункові моделі залежать від типу конструкції, матеріалу, виду термомеханічного навантаження, вимог до точності розрахунку.

Відзначимо, що використання аналітичних методів обмежено канонічними формами елементів конструкцій, типом навантаження, класичними граничними умовами і т. д. Застосування числових вариаційно-сіткових методів (кінцевих елементів, кінцевих різниць, локальних варіацій) і методу граничних елементів доцільні при складній будові тонкостінних систем (змінність жорсткості, порушення цілісності різного виду). При цьому навіть при використанні цих методів актуальним є створення оперативних обчислювальних схем на основі проєкційно-ітераційних схем числових методів, що дозволяють істотно зменшити комп᾽ютерний час розрахунку, що важливо при проведенні великого об’єму обчислень, коли в процесі відпрацювання конструкцій із застосуванням експериментальних даних необхідно багаторазово змінювати параметри і умови навантаження конструкцій [15 – 18]. Відзначимо, що застосування зазначених числових методів припускає використання швидкодіючих комп᾽ютерних систем [19, 20].

Нижче наведено результати досліджень щодо впливу деформацій пластичності і повзучості на міцність і стійкість оболонкових конструкцій РКТ при типових для них випадках навантаження. Ряд з них відображає результати спільної багаторічної роботи Інституту технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України (ІТМ НАНУ і ДКАУ), Державного підприємства "Конструкторське бюро "Південне" ім. М. К. Янгеля" (ДП "КБ" Південне") та Дніпровського національного університету ім. О. Гончара (ДНУ).

Типи конструкцій РКТ, види їх навантажень і руйнувань при експлуатації, в тому числі, пов’язані з виникненням пластичних деформацій і повзучості матеріалу, відображені в численних публікаціях. Виділимо з них [21 – 24].

Моделювання пружно пластичного деформування і критичних станів. Особливості пружнопластичної поведінки зазначених оболонкових систем визначають важливість вибору методологічних підходів до вивчення їх деформування і критичних станів. Ефективним для вирішення нелінійних (геометрично і фізично) задач для неоднорідних оболонкових систем є метод продовження по параметру і його різновид – метод послідовних навантажень [25]. Згідно з методом аналізується зміна рішень відповідних нелінійних рівнянь по мірі зміни параметра, зокрема навантаження, і досліджується реакція даної системи на малі його збільшення. Для пружнопластичних оболонок на кожному кроці навантаження необхідно здійснити також лінеаризацію співвідношень ТП з використанням методів пружних рішень. Це дає можливість досліджувати процес нелінійного деформування і досягнення параметрів критичного стану неоднорідних оболонкових систем.

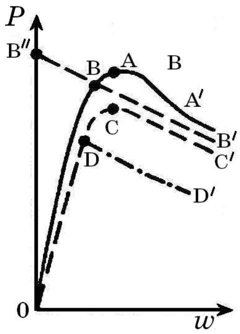


Рис. 1 – Схема процесу нелінійного деформування циліндричної оболонки

Різні аспекти стійкості і граничних станів непружних оболонкових систем розглянуті в [3, 4, 25 – 33].

Рис. 1 визначає залежність «граничне навантаження – прогин», що характеризує процес нелінійного деформування оболонки [3, 4, 22, 25, 28].

Крива ОАА′ характеризує деформування оболонки ідеальної форми, а крива ОСС′ – оболонки з недосконалостями.

Точки А і С визначають граничне навантаження, а В і D – біфуркаційне. Гілки АА′ і СС′ характеризують падіння навантаження для оболонок після досягнення його граничного значення, а ВВ′ і DD′ – післякритична поведінка системи. Точка В″ відповідає біфуркаційному навантаженню втрати стійкості геометрично лінійної системи. Схема показує, що граничне навантаження неідеальної системи може бути нижче, ніж для ідеальної. Взаємне розташування точок, що характеризують граничні і біфуркаційні навантаження, може бути різним для різних типів недосконалостей.

На рис. 2 показана схема досягнення граничних навантажень P для оболонок, з використанням теорії граничної рівноваги при моделі ідеально пластичного матеріалу [28, 34 – 36].

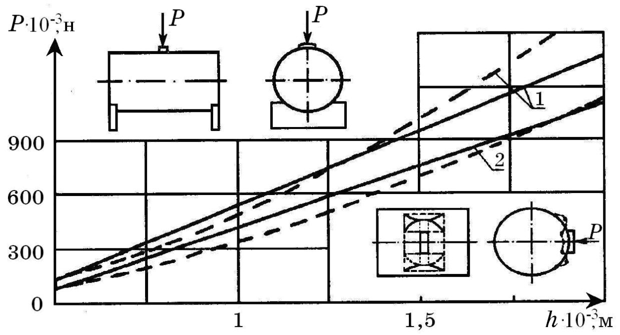


Рис. 2 – Залежність граничного навантаження оболонки від товщини

Механізм руйнування визначається певною схемою розташування локальних і лінійних зон пластичності – пластичних шарнірів. Такий аналіз заснований на варіанті теорії пластичності – теорії граничної рівноваги. Основні положення теорії характеризують дві теореми для нижньої і верхньої межі граничного навантаження (статичне і кінематичне рішення). Відзначимо, що близькою до ідеальнопластичної є діаграма деформування тільки ряду матеріалів (деякі сталі, титанові сплави). Однак, «поняття про граничне навантаження, що має точний сенс для ідеальнопластичних матеріалів, зберігає якісний зміст і для реальних матеріалів» [37].

Рисунок відображає результати вирішення задачі граничного аналізу для циліндричної оболонки, навантаженої жорстким штампом. Радіус оболонки 10^{-2} м, матеріал – алюмінієвомагнієвий сплав 7005 (АМГ6М). Верхня частина рисунка показує схему навантаження, права – схему розташування лінійних пластичних шарнірів, що визначають механізм руйнування.

Криві 1, 2 побудовані для кутів обхвату штампа 25° і 5°.

Пунктирні криві характеризують теоретичне рішення задачі теорії граничної рівноваги. Розміри областей руйнування визначені при вирішенні варіаційної задачі, що мінімізує функціонал: $A - D = 0$ (A – швидкість зміни роботи сили, D – сумарна швидкість дисипації енергії для всіх лінійних шарнірів, що визначають механізм руйнування оболонки). Суцільні криві показують результати експерименту по дослідженню несучої здатності для 37 оболонок, виточених з труб, при локальному навантаженні штампом (картина руйнування, що отримана при експерименті, відповідає наведеній на рисунку схемі з шарнірами).

В [36] досліджена важлива практична задача граничного аналізу – визначення руйнівного навантаження для складової конічної оболонки реального елемента конструкції РКТ. Механізм руйнування при осьовому стисканні пов'язаний з утворенням кільцевих пластичних шарнірів. Порівняння теоретичних досліджень з результатами експерименту показало хороший збіг. В [35] наведено результати по визначенню граничних навантажень шпангоутів, вирізаних з паливних баків ракет (матеріал АМГ-6М) при 4-х і 6-ти зосереджених силах. Реалізована розрахункова схема з введенням локальних пластичних шарнірів дала хороший збіг з результатами експерименту (1972 р.).

Зазначимо якісний зв'язок теорії граничної рівноваги з теорією крихкого руйнування. «Більшість випадків руйнування, які зовні виглядають і описуються як крихке, насправді являють собою руйнування при граничних навантаженнях або розвиненій пластичності». Цей факт визначено в [37] як «відомий, але такий, що часто забувається».

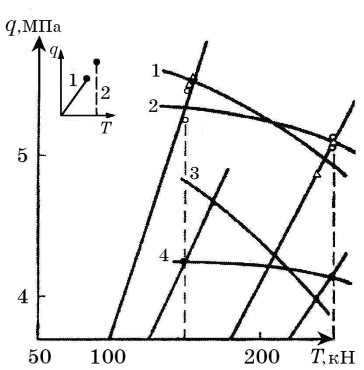


Рис. 3 – Граничні навантаження циліндричної оболонки

На рис. 3 наведені результати теоретичного дослідження впливу історії навантаження на граничні навантаження циліндричної оболонки при осьовій силі T і зовнішньому тиску q (програми зміни T і q показані у верхній лівій частині рисунка: пропорційна зміна T і q (1), навантаження силою T з виходом в область непружних деформацій, а потім тиском q до досягнення граничного навантаження (2) [4, 28, 30]).

Розрахунки проведені для оболонки зі сплаву 7005; параметри: R/h=31,5; L/R=1,5; (R,h,L – радіус, товщина, довжина) з використанням ТП, що враховує мікронапруги [12, 28]. Криві 3, 4 визначають межі граничних областей для різних програм навантаження (у верхній лівій частині) рисунка. Їх взаємне розташування є різним (в одній частині площині $T - q$ програма 1 дає більш низький рівень граничних навантажень, в іншій – програма 2).

На рисунку наведено також результати експериментального дослідження граничних навантажень 8 циліндричних оболонок, які виточені з труб (сплав 7005). Трикутником і кружком визначені критичні навантаження для програми 1, 2. Криві 1, 2 визначають граничні області, побудовані за результатами експерименту. Якісно вони підтверджують результати розрахунку (криві 3, 4). Різниця пояснюється розкидом механічних характеристик, неточним дотриманням граничних умов шарнірного обпирання, які прийняті при розрахунку, в експерименті.

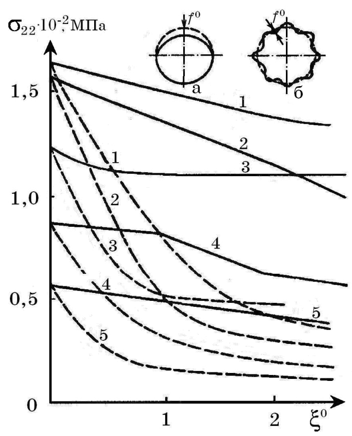


Рис. 4 – Вплив нерегулярних (а) і регулярних (б) недосконалостей на граничний зовнішній тиск

На рис. 4 показані результати дослідження впливу виду геометричних недосконалостей форми на граничне значення зовнішнього тиску для циліндричної оболонки $\left(\sigma_{22}=\dfrac{qR}{h}\right)$. Суцільні лінії характеризують нерегулярні недосконалості (які не збігаються з формою руйнування оболонки без недосконалостей).

Штрихові лінії відповідають регулярним геометричним недосконалостям форми виду $w^0=\sin\lambda x\sin\eta\nu$ $(\lambda=\pi/L$, $\eta=n/R)$. Криві 1 – 5 побудовані для параметрів R/h и L/R: 30 і 1; 30 і 1,5; 50 і 1; 50 і 1,5; 100 і 1; 100 и 1,5 відповідно (для сплаву 7005). Значення n, які мінімізують для штрихових кривих 1 – 5 рівні 6, 5, 7, 8, 7. По осі абсцис відкладено відношення $\xi^0=f^0/h$ (f^0 – максимальне значення прогину w^0). Видно, що регулярні недосконалості форми сильніше впливають на зниження граничного навантаження, тобто нерегулярні зміцнюють конструкцію.

Вплив особливостей пластичного деформування матеріалу на критичні навантаження оболонкових систем. Різні типи геометричних недосконалостей характеризують різні механізми деформування і несучої здатності оболонкових систем. Експериментальні дослідження дозволяють досліджувати параметри процесів нелінійного деформування і величини критичних навантажень для різних типів недосконалостей. Раніше було відзначено, що в експерименті визначається граничне навантаження. Біфуркаційні навантаження для неоднорідних систем (до них відносяться оболонки з геометричними недосконалостями) дещо менше граничних. Це характерно для оболонкових систем при пластичних деформаціях. Різні особливості експериментальних досліджень при аналізі непружного деформування оболонок вивчені в [4, 26 – 28, 34 – 36, 38 – 41].

Наведемо результати дослідження стійкості циліндричних оболонок з різного матеріалу при осьовому стисканні, які дозволяють зробити висновки про вплив початкових недосконалостей [38].

Виявлено, що оболонки, які виготовлені з матеріалу з одним і тим же модулем пружності, але різними межами плинності σ_s, мають різні критичні навантаження, незважаючи на те, що втрата стійкості відбувалася в пружній області деформування (критичні напруги $\sigma_{кр}$ для ідеальної оболонки визначаються тут модулем пружності E і геометричними параметрами оболонки: $\sigma_{кр}=KEh/R$). При цьому оболонки з матеріалу з більш низькими σ_s (мягка сталь Х18Н9) втрачали стійкість при більш низьких $\sigma_{кр}$. Рис. 5 показує деякі особливості досліджень.

Випробувано 170 оболонок з $L/R = 3$, виготовлених із застосуванням точкового зварювання з листового матеріалу (м'яка і нагартована сталі Х18Н9, алюмінієвий сплав 7005). По осі ординат відкладено значення коефіцієнта у формулі для критичного напруження, по осі абсцис відношення R/h . Крива 1 дає нижню межу K по формулі: $K = 2{,}35\sqrt{h/R}$.

Криві 2, 3 побудовані за відомою формулою Доннела: $K = \left[1 + 1{,}65 \cdot 10^{-7} (R/h)^2\right] \left(1 + 0{,}004\, E/\sigma_s\right)^{-1}$ для матеріалу Х18Н9 і 7005.

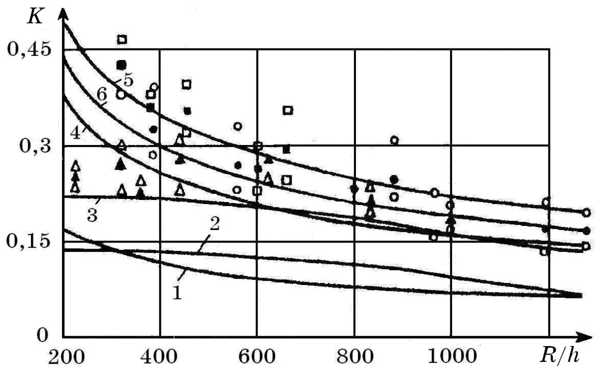


Рис. 5 – Вплив пластичних властивостей матеріалу на стійкість оболонок при осьовому стисненні

Криві 4 – 6, які побудовані за результатами експерименту, визначають емпіричні значення коефіцієнта $K = \alpha(\sigma_s/E)^{\beta}\sqrt{h/R}$ для двох класів сталі Х18Н9 і сплаву 7005. Трикутники і квадрати відповідають м'якій і нагартованій сталі Х18Н9, кружки – сплаву 7005 (зачернені значки – усереднені значення K , світлі – нижні і верхні значення).

Внаслідкок статистичної обробки експериментальних даних отримано: $\alpha = 2{,}62$, $\beta = 0{,}241$. Зниження критичних напружень для оболонок з матеріалу з більш низьким σ_s пояснюється впливом неминучих геометричних недосконалостей і неоднорідності напруженого стану. Для оболонок з більш низьким σ_s швидше утворюються пластичні зони, що ведуть до зменшення жорсткості і зниження критичного навантаження.

Рис. 6 показує результати розрахунку та експериментальні дані граничного навантаження q^* для циліндричних оболонок з алюмінієвого сплаву 7005 з нерегулярними геометричними недосконалостями, отриманими при попередньому імпульсному навантаженні зовнішнім тиском [4].

У верхній частині рисунка показано вид характерних початкових недосконалостей. Суцільні лінії 1 – 3 відображують результати розрахунку для R/h =75, 100, 150 та L/R =1. Штриховими лініями відзначені криві, що апроксимують експериментальні дані, кружки, хрестики та трикутники відповідають оболонкам з R/h =75, 100, 150.

Для оболонок з R/h =150 пластичні деформації не виникали.

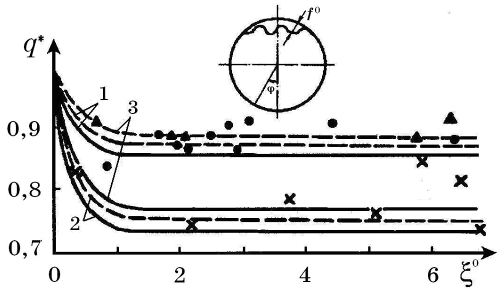


Рис. 6 – Теоретичний аналіз і експериментальні дані для оболонок після попереднього імпульсного навантаження

При навантаженні оболонки, розвантаженні і подальшому повторному навантаженні змінюється межа плинності матеріалу (відбувається зміцнення).

Рис. 7 показує результати розрахунку граничного навантаження циліндричної оболонки зі сплаву 7005 з параметрами R/h =90, L/R =0,4 з урахуванням і без урахування зміцнення матеріалу. Суцільні і пунктирні лінії характеризують результати розрахунку з урахуванням і без урахування цього чинника.

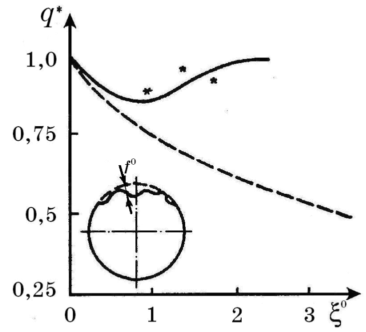
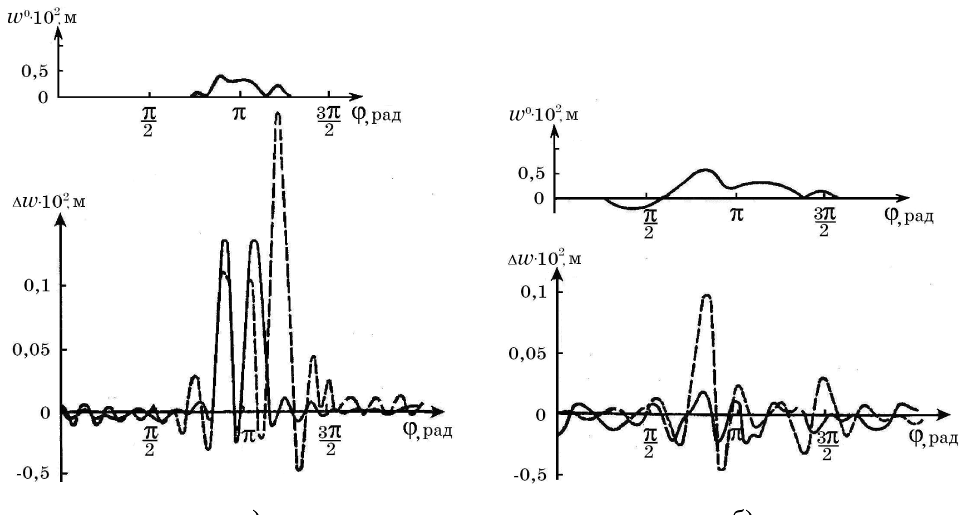


Рис. 7 – Граничне навантаження для оболонки з урахуванням і

Зміцнення якісно змінює залежність q^* від ξ^0, істотно збільшуючи граничне навантаження оболонки. Показані експериментальні точки наочно демонструють необхідність врахування зміцнення матеріалу.

Рис. 8 характеризує розвиток прогинів циліндричних оболонок, які мають геометричні недосконалості форми, зображені у верхній частині рис. 8, а), б), при зовнішньому тиску.



а) б)

Рис. 8 – Розвиток прогинів оболонок з урахуванням (а) і без урахування (б) зміцнення матеріалу

Представлені результати розрахунку для оболонок зі сплаву 7005 з параметрами R/h, L/R, що дорівнюють (90; 0,4), (76; 0,65).

На рисунку показана зміна прирощень прогинів Δw в середньому перерізі оболонки ($x = L/2$) при навантаженнях, які безпосередньо передують граничним.

Суцільні і пунктирні лінії визначають результати рішення з урахуванням і без урахування зміцнення матеріалу. У першому випадку зростання прогинів при навантаженні є менш інтенсивним [4, 26, 30].

Особливий вплив на поведінку оболонкових конструкцій здійснюють основні прояви неоднорідності: отвори-вирізи і дефекти в матеріалі у вигляді порушень суцільності (зокрема, тріщини), які визначають процеси руйнування матеріалу.

Отвори-вирізи є локальними концентраторами НДС, зазначені мікродефекти у вигляді порушень суцільності (тріщини, пори) також є локальними концентраторами НДС [18, 25].

Відзначимо цікаву особливість впливу концентрації напружень в тонкостінних конструкціях. При їх деформуванні в околицях отворів-вирізів виникають стискаючі напруги, що призводить до локальної втрати стійкості.

Це явище досліджено в ряді робіт теоретично і експериментально [25, 42, 43].

При дослідженні впливу проявів конструктивної неоднорідності у вигляді отворів-вирізів і дефектів – порушень суцільності велика роль числових методів, які найчастіше є єдиним інструментом для аналізу. Застосування аналітичних методів обмежене, зокрема, канонічними формами отворів-вирізів і мікродефектів. У вступній частині статті говорилося про ефективність використання при цьому варіаційно-сіткових методів і проєкційно-ітераційних схем їх реалізації. Ці схеми для методу скінчених елементів (МСЕ) використані в дослідженнях впливу отворів-вирізів і включень при урахуванні пластичного деформування матеріалу. У разі декількох отворів досліджується взаємний вплив отворів-вирізів. Розглядається процес утворення і трансформації пластичних зон. Їх виникнення і збільшення при зростанні навантаження і подальше злиття призводить до зменшення жорсткості конструктивних елементів (в цьому випадку в вирази для жорсткостей замість модуля пружності *E* входить дотичний або січний модулі, які менші ніж *E*, або їх комбінації) і, внаслідок цього, до зменшення їх несучої здатності [44, 45]. Проєкційно-ітераційні схеми МСЕ призводять до зменшення комп'ютерного часу розрахунку в десятки разів (у порівнянні з розрахунком на основі традиційного МСЕ – на одній сітці)) [15 – 17, 45].

Вплив повзучості при дослідженні стійкості оболонок. Для РКТ дослідження в області теорії повзучості важливі в першу чергу, коли температура висока і повзучість може призвести до передчасного руйнування [13, 14]. Особливий клас задач пов'язаний з явищами так званої "холодної" повзучості при звичайних температурах, коли напруги близькі до межі текучості матеріалу. Накопичення деформацій повзучості може призвести до втрати стійкості оболонкових конструкцій РКТ. Можливість такого сценарію руйнування викликала увагу при одній з схем експлуатації рідинних ракет, коли вони знаходяться в заправленому стані багато років. Це звернуло серйозну увагу на дослідження теорії стійкості при повзучості тонкостінних конструкцій в 80-х роках минулого століття в науково-дослідних інститутах, пов’язаних з розробкою проблем РКТ (Центральний науково-дослідний інститут машинобудування (ЦНДІМаш), Сибірський науково-дослідний інститут авіації (СибНІА), "ДП "КБ "Південне", ІТМ НАНУ і ДКАУ та ін.) [14, 21, 49, 50].

Існують так звані умовні критерії стійкості при повзучості. Вони, як правило, дають критичний час значно нижчий від отриманого в експерименті [13, 14, 22]. Реальним є підхід, пов’язаний з критерієм "початкових недосконалостей", коли розглядається розвиток початкових прогинів аж до втрати стійкості (випинання) оболонкових конструкцій [13, 14, 51].

На рис. 9 наведено вид поверхні, що визначає граничне навантаження циліндричної оболонки зі сплаву 7005 при пропорційній зміні осьової сили і внутрішнього тиску q ($\xi^* = \frac{Ep_i}{\sigma_i}$ – безрозмірний параметр критичного часу, E – модуль пружності, p_i, σ_i – інтенсивності деформацій повзучості і напруг, $R/h = 176$, $L/R = 4{,}83$, p^* – гранична погонна осьова сила). Суцільні і штрихові лінії відповідають деформуванню при пружних деформаціях і з урахуванням миттєвих пластичних деформацій. Начальний прогин $w_0 = 0{,}4h$; граничний стан визначається часом, що характеризує різке зростання прогину [14]. Видно, що вплив миттєвих пластичних деформацій є несуттєвим. Аналогічний результат отримано С. А. Шестеріковим для стрижня при стисканні [52].

Чисельний аналіз показує, що будь-яка складна програма зміни навантажень дає більші значення критичного часу, ніж їх пропорційна зміна.

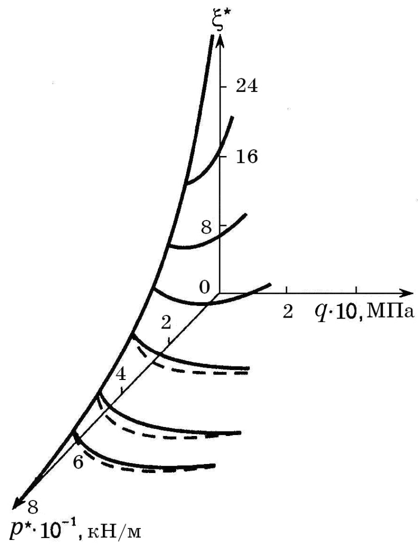


Рис. 9 – Поверхня, що визначає граничне навантаження оболонки при випинанні в умовах повзучості при пружних і миттєвих пластичних деформаціях

Розробка методології нормативних основ розрахунку ресурсу конструкцій стартових комплексів космічних ракет-носіїв. Застосування методів, що враховують деформації пластичності і повзучості, являється принциповим при дослідженнях зі створення нормативних основ розрахунку ресурсу конструкцій стартових споруд космічних ракет-носіїв, що застосовуються для виведення на навколоземну орбіту космічних апаратів різного призначення. Відповідні стартові комплекси (СК) створені й успішно функціонують у багатьох країнах світу [24, 53].

При проєктуванні СК необхідна розробка моделей і методів обґрунтування тактико-технічних вимог до них, розробка і реалізація методів розрахунку НДС, моделювання газодинамічних, масотеплообмінних процесів при функціонуванні пускових установок.

Основні методологічні етапи розрахунку ресурсу включають: класифікацію видів навантажень, визначення видів ушкоджень, вибір критеріїв виникнення граничного стану і підходів до підсумовування пошкоджень. Під критичним ресурсом мається на увазі критичний (граничний) час роботи або число пусків за цей час, коли в небезпечних зонах несучих елементів досягаються граничні стани: виникнення неприпустимих деформацій пластичності і повзучості, критичних тріщин різної фізичної природи, розвиток корозійних пошкоджень і ін. [22, 24, 53].

Класифікація основних факторів, що визначають ресурс, здійснюється за різними ознаками. Стартові споруди різного типу відносяться до категорії систем високого ступеня складності, особливістю яких є ієрархічна структура їх елементів [24].

Навантаження і механічні характеристики є випадковими величинами, що призводить до необхідності розробки імовірнісних моделей чинників, що характеризують відповідні процеси деформування і руйнування [24, 28].

Пошкодження можна розглядати як недосконалості форми або порушення структури матеріалу, що виникають в процесі експлуатації. Осередками їх розвитку є зазвичай дефекти виготовлення і монтажу. Пошкодження можна розділити на силові (механічні), пошкодження захисних покриттів, хімічні і електрохімічні, корозію металу. При виборі підходів до підсумовування пошкоджень і критеріїв настання граничного стану визначаються схеми появи втомних тріщин в елементах конструкцій. При цьому, зокрема, використовуються згадані вище поняття перетворення елемента конструкції в механізм, загальна або локальна втрата стійкості, руйнування від втоми матеріалу при багаторазовому навантаженні. Розглядаються різні механізми, пов’язані з деформацією і руйнуванням з урахуванням пластичних деформацій і деформацій повзучості [1, 4, 5, 12, 22, 24 – 28, 35, 53 – 56].

Ресурс стартових споруд пов’язаний з визначенням кількості пусків. При вирішенні цієї задачі слід враховувати підходи для екстремальних термоциклічних впливів з використанням механізмів втоми, що також враховує особливості деформування з урахуванням пластичності і повзучості. Різні аспекти проблеми визначення ресурсу розглянуті у багатьох роботах, з яких виділимо [24, 53 – 56], де наведена велика бібліографія.

Висновки. Розглянуто різні аспекти впливу деформацій пластичності і повзучості, що визначають екстремальні процеси деформування неоднорідних оболонкових систем, які моделюють поведінку елементів конструкцій РКТ.

Відображено сучасні методологічні підходи до дослідження процесів деформування і досягнення критичних станів, які характеризують руйнування конструктивних елементів або появу неприпустимих для їх подальшої експлуатації факторів (викривлення форми, порушення суцільності: тріщини, пори, поява дефектів будови матеріалу, залишкові деформації та ін.). Обговорено деякі особливості розрахунків НДС і критичних навантажень елементів конструкцій РКТ, відповідних експериментальних досліджень при урахуванні зазначених видів деформацій, і наведені результати досліджень ряду актуальних задач міцності і стійкості РКТ.

1. *Ильюшин А. А.* Труды в 4 т. Т. 2. Пластичность. М., 2004. 408 с.
2. *Ишлинский А. Ю., Ивлев Д. Д.* Математическая теория пластичности. М., 2001. 700 с.
3. *Hutchinson J. W.* Plastic buckling. Advances in Appl. Mech. 1974. V. 14. P. 67–144. https://doi.org/10.1016/S0065-2156(08)70031-0
4. *Гудрамович В. С.* Устойчивость упругопластических оболочек. К., 1987. 216 с.

5. *Партон В. З., Морозов Е. М.* Механика упругопластического разрушения. М., 1985. 504 с.
6. *Томсен Э., Янг Ч., Кобаяши Ш.* Механика пластических деформаций при обработке металлов. М., 1968. 504 с.
7. *Моссаковский В. И., Гудрамович В. С., Макеев Е. М.* Контактные взаимодействия элементов оболочечных конструкций. К., 1988. 288 с.
8. *Hudramovych V. S.* Contact mechanics of shell structures under local loading. Int. Appl. Mech. 2009. V. 45, № 7. P. 708–729. https://doi.org/10.1007/s10778-009-0224-5
9. *Ильюшин А. А.* Труды в 4 т. Т. 4. Моделирование динамических процессов в твердых телах и инженерные приложения. М., 2009. 526 с.
10. *Гудрамович В. С.* Пластическое выпучивание цилиндрической оболочки конечной длины при импульсном локальном нагружении. Теория оболочек и пластин. Тр. 8 Всесоюзн. конф. по теории оболочек и пластин (Ростов-на-Дону, 1971). М., 1973. С. 125–130.
11. *Величкин В. А., Гудрамович В. С., Пилипенко В. В. и др.* Колебания системы с физически нелинейными характеристиками. Надежность технических систем при импульсном нагружении: сб. науч. тр. К., 1981. С. 4–10.
12. Нелинейные модели и задачи механики деформируемого твердого тела. Сб. научн. тр., посв. 70-летию со дня рожд. Ю. Н. Работнова. М., 1984. 210 с.
13. *Работнов Ю. Н.* Проблемы механики деформируемого твердого тела. Избранные труды. М., 1991. 196 с.
14. *Гудрамович В. С.* Теория ползучести и её приложения к расчёту элементов тонкостенных конструкций. К., 2005. 224 с.
15. *Hudramovych V. S., Hart E. L., Ryabokon' S. A.* Plastic deformation of nonhomogeneous plates. J. Math. Eng. 2013. V. 78, Iss. 1. P. 181–197. https://doi.org/10.1007/s10665-010-9409-5
16. *Hart E. L., Hudramovych V. S.* Applications of the projective-iterative versions of FEM in damage problems for engineering structures. Maintenance 2012. Proceedings of 2th Int. Conf. (Zenica, Bosnia and Herzegovina, 2012). Zenica, 2012. P. 157–164.
17. *Hart E. L., Hudramovych V. S.* Projection-iterative modification of the method of local variations for problems with a quadratic functional. J. Appl. Math. and Mechanics. 2016. V. 80, Iss. 2. P. 158–163. https://doi.org/10.1016/j.jappmathmech.2016.06.005
18. *Гудрамович В. С., Гарт Э. Л.* Конечно-элементный анализ процесса рассеянного разрушения плоско-деформируемых упругопластических сред с локальными концентраторами напряжений. Упругость и неупругость. Материалы Междунар. симп. по проблемам механики деформ. тел, посв. 105-летию со дня рождения А. А. Ильюшина. (Москва, янв. 2016 г.). М., 2016. С. 158–161.
19. *Лазарев Т. В., Сиренко В. Н., Дегтярев М. А. и др.* Высокопроизводительная вычислительная система для расчетных задач ГП КБ «Южное». Ракетная техника. Новые возможности. Науч.-техн. сб. Днепр, 2019. С. 407 – 419.
20. *Сиренко В. О* возможности проведения виртуальных испытаний при разработке ракетно-космической техники с целью определения предельных несущих свойств. Актуальні проблеми механіки суцільного середовища і міцності конструкцій. Тези доп. 2-ої Міжн. наук.-техн. конф. пам'яті акад. НАНУ В. І. Моссаковського (до сторіччя від дня народження). Дніпро, 2019. С. 43–44.
21. *Дегтярев А. В.* (ред.) Шестьдесят лет в ракетостроении и космонавтике. Днепропетровск, 2014. 540 с.
22. *Мак-Ивили А. Дж.* Анализ аварийных разрушений. М., 2010. 416 с.
23. *Song Z.* Test and launch control technology for launch vehicles. Singapore: Springer, 2018. 256 p. https://doi.org/10.1007/978-981-10-8712-7
24. *Hudramovich V. S., Sirenko V. N., Klimenko D. V., Daniev Ju. F., Hart E. L.* Development of the normative framework methodology for justifying the launcher structures resource of launch vehicles. Strength of Materials. 2019. V. 51, No. 3. P. 333–340. https://doi.org/10.1007/s11223-019-00079-4
25. *Hudramovych V. S.* Features of nonlinear deformation of shell systems with geometrical imperfections. Int. Appl. Mech. 2006. V. 42, N 7. P. 3–37. https://doi.org/10.1007/s10778-006-0204-y
26. *Гудрамович В. С.* Критические состояния неупругих оболочек при сложном нагружении. Устойчивость в МДТТ. Матер. Всесоюзн. симп. Калинин, 1981. С. 61–87.
27. *Гудрамович В. С.* Устойчивость и несущая способность пластических оболочек. Прочность и долговечность конструкций: сб. науч. тр. К., 1980. С. 15–32.
28. *Гудрамович В. С., Переверзев Е. С.* Несущая способность и долговечность элементов конструкций. К., 1981. 284 с.
29. *Гудрамович В. С., Деменков А. Ф., Конюхов С. Н.* Несущая способность неидеальных цилиндрических оболочек с учетом пластических деформаций. Прочность и надежность конструкций: сб. науч. тр. К., 1982. С. 45–48.
30. *Гудрамович В. С., Коноваленков В. С.* Деформирование и предельное состояние неупругих оболочек с учётом истории нагружения. Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1987. № 3. С 157–163.
31. *Hudramovich V. S.* Plastic and creep instability of shells with initial imperfections. Solid mechanics and its applications. V. 64 / Ed. G. M. L. Gladwell. Dordrecht, Boston, London, 1997. P. 277–289. https://doi.org/10.1007/0-306-46937-5_23
32. *Hudramovich V. S., Lebedev A. A., Mossakovsky V. I.* Plastic deformation and limit states of metal shell structures with initial shape imperfections. Light – weight steel and aluminium structures: Proceedings Jnt. Conf. (Helsinki, Finland, 1999) / Ed. P. Makelainen. Amsterdam, Lousanne, New York, Tokyo, 1999. P. 257–263. https://doi.org/10.1016/B978-008043014-0/50133-5

33. *Кушнір Р. М., Николишин М. М., Осадчук В. А.,* Пружний та пружнопластичний граничний стан оболонок з дефектами. Львів, 2003. 320 с.
34. *Гудрамович В. С.* Предельный анализ – эффективный способ оценки конструкционной прочности оболочечных систем. Тр. Міжнар. конф.: Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій. Львів, 2003. С. 583–588.
35. *Гудрамович В. С. Герасимов В. П., Деменков А. Ф.* Предельный анализ элементов конструкции. К., 1990, 136 с.
36. *Герасимов В. П., Гудрамович В. С., Ларионов И. Ф. и др.* Пластическое разрушение составных оболочечных конструкций при осевом сжатии. Пробл. прочности. 1979. № 11. С. 58–61. https://doi.org/10.1007/BF00767054
37. *Друкер Д.* Макроскопические основы теории хрупкого разрушения. Разрушение. Т. 1. М., 1973. С. 505–569.
38. *Галкин В. Ф., Гудрамович В. С., Моссаковский В. И., Спиридонов И. Н.* О влиянии предела текучести на устойчивость цилиндрических оболочек при осевом сжатии. Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1973. № 3. С 180–182.
39. *Гудрамович В. С., Дзюба А. П., Селиванов Ю. М.* Методы голографической интерферометрии в механике неоднородных тонкостенных конструкций. Днепр, 2017. 288 с.
40. *Гудрамович В. С., Скальський В. Р., Селіванов Ю. М.* Голографічне та акустико-емісійне діагностування неоднорідних конструкцій і матеріалів. Львів, 2017. 488 с.
41. *Писаренко Г. С., Стрижало В. А.* Экспериментальные методы в механике деформируемого твердого тела. К., 2018. 242 с.
42. *Гузь А. Н., Дышель М. Ш., Кулиев Г. Г., Милованова О. Б.* Разрушение и локальная потеря устойчивости тонкостенных тел с вырезами. К., 1981. 184 с. https://doi.org/10.1007/BF00884086
43. *Гудрамович В. С., Дисковский И. А., Макеев Е. М.* Тонкостенные элементы зеркальных антенн. К., 1986. 152 с.
44. *Hudramovich V. S., Hart E. L., Klimenko D. V., Ryabokon' S. A.* Mutual influence of openings on strength of shell-type structures under plastic deformation. Strength of Materials. 2013. V. 45, Iss 1. P. 1–9. https://doi.org/10.1007/s11223-013-9426-5
45. *Гудрамович В. С.* Влияние отверстий на предельное состояние элементов тонкостенных металлических оболочечно-пластинчатых конструкций. Вісник ДНУ. Сер. Механіка. 2014. Т. 2. Вип. 18, С. 47–65.
46. *Дзюба А. П., Прокопало Є. Ф., Дзюба П. А.* Несуча здатність циліндричних оболонок з отворами. Дніпро, 2014. 224 с.
47. *Гудрамович В. С., Клименко Д. В., Гарт Э. Л.* Влияние вырезов на прочность цилиндрических отсеков ракет-носителей при неупругом деформировании материала. Космічна наука і технологія. 2017. Т. 23, № 6. С. 12–20. https://doi.org/10.15407/knit2017.06.012
48. *Гарт Э. Л., Гудрамович В. С.* Проекційно-ітераційні схеми реалізації варіаційно-сіткових методів у задачах пружно-пластичного деформування неоднорідних тонкостінних конструкцій. Математичні методи і фізико-механічні поля. 2019. Т. 51, № 3. С. 24–39.
49. *Никитин П. И., Гудрамович В. С., Ларионов И. Ф.* Устойчивость оболочек в условиях ползучести. *Ползучесть в конструкциях*. Тез. докл. Всесоюзн. симпозиума (Днепропетровск, 1982 г.). Д., 1982. С. 3–5.
50. *Гудрамович В. С.* Об исследованиях в области теории ползучести в Институте технической механике НАНУ и ГКАУ. Техн. механика. 2015. № 4. С. 85–91.
51. *Hoff N. J., Jahsman W. E., Nachbar W. A.* A study of creep collapse of a long circular shells under uniform external pressure. J. Aerospace Sci. 1959. V. 26, No. 10. P. 663–669. https://doi.org/10.2514/8.8243
52. *Локошенко А. М.* Ползучесть и длительная прочность металлов. М.: Физматлит, 2016. 504 с.
53. *Бармин И. В.* (ред.) Технологические объекты наземной инфраструктуры ракетно-космической техники, в 2 кн. М., кн. 1. 2005. 412 с., кн. 2. 2006. 376 с.
54. *Махутов Н. А., Матвиенко Д. Г., Романов А. Н.* Проблемы прочности, техногенной безопасности и конструкционного материаловедения. М., 2018. 720 с.
55. *Трощенко В. Т., Сосновский Л. А.* Сопротивление усталости металлов и сплавов. Справочник в 2 т. К., 1987. Т. 1. 510 с., Т. 2. 825 с.
56. *Manson S. S., Halford G. R.* Fatigue and durability of structural materials. ASM Int. Material Park. Ohio, USA, 2006. 456 p.

Отримано 22.02.2021,
в остаточному варіанті 24.03.2021