

МЕТОДОЛОГІЯ ВИЗНАЧЕННЯ РУЙНІВНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ВЕЛИКОГАБАРИТНІ ТОНКОСТІННІ КОНСТРУКЦІЇ З УРАХУВАННЯМ РЕЗУЛЬТАТІВ НЕРУЙНІВНИХ ВИПРОБУВАНЬ

Запропоновано основи методології визначення фактичних руйнівних навантажень на великогабаритні тонкостінні конструкції зі складною формою лицевих поверхонь за геометрично нелінійного пружно-пластичного деформування внаслідок дії внутрішнього тиску з урахуванням результатів неруйнівних експериментальних випробувань.

Ключові слова: руйнівні навантаження, великогабаритні тонкостінні конструкції, неруйнівні експериментальні випробування.

Вступ. Тонкостінні конструкції – одні з найпоширеніших складників багатьох відповідальних об'єктів різноманітного цільового призначення, зокрема ракетно-космічної техніки (РКТ) [1–3, 9]. Це зумовлено їхньою раціональною матеріаломісткістю та можливістю забезпечити необхідну жорсткість у певних напрямках, які залежать від умов експлуатації.

Особливе місце в РКТ займають великогабаритні оболонкові конструкції [8, 10]. Вони є основою паливних відсіків, які складають 80...90 % об'єму ракети-носія або ракетних блоків [1]. Паливний відсік призначений для розміщення рідкого ракетного палива, а також виконує функції силового елемента корпусу ракетного блока, тобто сприймає зовнішні силові та теплові впливи на ракетний блок. Як правило, корпус паливного відсіку є великогабаритною тонкостінною конструкцією, що складається з оболонок обертання, підкріплених поздовжніми і поперечними силовими ребрами: стрингерами і шпангоутами. Прикладом може бути бак окиснювача першого ступеня ракети-носія [2]. Оскільки експериментальні дослідження механічних властивостей конструкцій такого типу є доволі обмежені і надзвичайно коштовні, то суттєво зростає роль засобів математичного й комп'ютерного моделювання під час оцінки їхнього експлуатаційного ресурсу та руйнівного навантаження на них. Причому важливо врахувати експериментальні результати, отримані під час неруйнівних випробувань, внаслідок яких не виникають залишкові деформації [6].

1. Особливості розрахунку тонкостінних конструкцій РКТ. Важливим етапом проектування сучасних конструкцій РКТ є математичне і комп'ютерне моделювання процесів їхнього деформування за умов експлуатації. У віртуальному просторі знаходять раціональний чи оптимальний проект конструкції, досліджуючи шляхом комп'ютерного моделювання її механічну поведінку за різних параметрів. Виготовлений за кресленнями проекту фізичний прототип піддають всебічним експериментальним випробуванням. І лише за позитивних результатів переходять до серійного виробництва. Але, як відзначено вище, експериментальні дослідження механічної поведінки складних конструкцій доволі обмежені. Тому об'єм засобів математичного і комп'ютерного моделювання постійно зростає.

Оцінка експлуатаційного ресурсу конструкцій, їх руйнівного навантаження суттєво залежить від точності й достовірності даних про їхній напружено-деформований стан за умов експлуатації. Тому механічну поведінку конструкцій намагаються досліджувати, використовуючи уточнені математичні моделі, як правило, фізично і геометрично нелінійні.

✉ mv_marchuk@ukr.net

Багато аспектів поведінки складних механічних конструкцій виникає через взаємодію різних їх складників, які часто неможливо передбачити чи простежити в експериментах (обчислювальних чи натурних) з окремими ізольованими елементами. І фактичні напруження в реальних конструкціях часто істотно менші, ніж передбачувані на основі часткових експериментів з окремими елементами конструкцій (через структурну неперервність і забезпечення альтернативних шляхів навантаження для окремих елементів). Сказане стосується і ракетної техніки, яка здебільшого складається з тонкостінних конструкцій.

Підвищена напруженість тонкостінних та об'ємних елементів конструкцій сучасної РКТ зумовлює використання найбільш досконалих математичних і розрахункових моделей, в яких за можливістю необхідно достатньо повно відтворити реальні умови експлуатації конструкції та механічні властивості матеріалів, з яких виготовлені її елементи. Тому, крім традиційної властивості пружності матеріалу в розрахунках елементів конструкцій РКТ все більше значення набувають його пластичні властивості. Особливо це актуально під час проектування елементів конструкцій рідинних двигунів РКТ, де протиріччя між вимогами міцності та мінімальної матеріаломісткості проявляються найгостріше. Прикладом може бути проектування елементів конструкцій РКТ, коли необхідно визначити допустиме (руйнівне) навантаження, коли матеріал значної частини цих об'єктів перебуває в пружно-пластичному стані. Такий стан, що не порушує функціональне призначення конструкції та роботу її обладнання, допускається в деяких елементах одноразового використання, а також за тривалого експлуатаційного навантаження.

З огляду на сказане, для оцінювання міцності та визначення руйнівних навантажень тонкостінних конструкцій ракетної та ракетно-космічної техніки використано орієнтований на метод скінченних елементів варіант методики розв'язування геометрично нелінійних задач теорії пружно-пластичності в приростах на основі підходу Лагранжа із застосуванням принципу віртуальних переміщень [5, 7].

2. Великогабаритні тонкостінні конструкції. Під час розрахунку міцності таких конструкцій, зокрема бака окиснювача першого ступеня, необхідно враховувати такі характерні аспекти.

1. Значну малість параметра тонкостінності

$$\varepsilon = h / l \ll 1,$$

де h – мінімальна товщина, а l – так званий характерний лінійний розмір тонкостінної конструкції.

Для конструкції бака окиснювача першого ступеня

$$\varepsilon \approx 10^{-5},$$

а застосування теорій оболонок, в т. ч. узагальнених та уточнених [1, 7], за таких значень ε , як правило не гарантує достовірного результату під час використання числових методів, зокрема й методу скінченних елементів.

Значну складність геометрії будови лицевих поверхонь і наявність різного роду підкріплювальних шпангоутів та стрингерів, а також зварних швів [3].

Пружно-пластичне деформування та суто пластичне під час навантажень, близьких до руйнівних, що призводить до необхідності розв'язувати нелінійну задачу для систем диференціальних рівнянь у частинних похідних [5].

3. Характеристики математичних моделей конструкцій РКТ. Придатність математичної моделі для розв'язування задач дослідження міцності конструкцій характеризується тим, в якій мірі вона володіє так званими цільовими властивостями, основними з яких є адекватність, стійкість і чутливість.

4. **Комп'ютерне моделювання** – це процес відтворення поведінки об'єкта за допомогою комп'ютерної програми, що реалізує подання об'єкта у формі математичної моделі. Таку програму називають комп'ютерною моделлю.

Результат комп'ютерного моделювання полягає в отриманні кількісних і якісних висновків щодо використовуваної моделі. Кінцева його мета – ухвалення рішення, яке слід виробити на основі всебічного аналізу результатів моделювання. Основа вироблення рішення – порівняння результатів числового тестування й натурних експериментів.

Комп'ютерне моделювання є числовим методом і тому його істотний недолік – частковий характер результатів, що відповідають певним значенням параметрів об'єкта. Для детального аналізу поведінки об'єкта необхідно багаторазово моделювати процес його функціонування, варіюючи вхідні дані моделі.

5. **Числовий експеримент.** Його суть полягає в дослідженні математичних моделей числовими методами.

Обчислювальний експеримент охоплює такі етапи:

- фізичний опис процесу, тобто з'ясування закономірності явищ, що відбуваються;
- розроблення математичної моделі;
- алгоритм або метод розв'язання рівнянь;
- розроблення програм;
- виконання розрахунків, аналіз результатів і оптимізація.

Нижче на рисунку зображено схему числового експерименту.



6. **Аналіз сучасного стану розв'язання проблеми розрахунку конструкцій у пружно-пластичній та пластичній областях.** Дослідження конструкцій з урахуванням пластичних деформацій дає можливість використати додатковий ресурс матеріалу, а отже, збільшувати експлуатаційне навантаження під час проектних розрахунків.

Методи, що застосовують сьогодні для розв'язання пружно-пластичних задач, умовно поділяють на дві групи: аналітичні та числові. Аналітичні базуються, в основному, на методах теорії функцій комплексної змінної та методи малого параметра. Із числових найбільш застосовним є метод скінченних елементів.

Розрахунок на міцність тонкостінних конструкцій, що працюють за межею пружності, – окрема категорія пружно-пластичних задач. Аналітичні методи розв'язування тут можна застосовувати лише для найпростіших конструкцій, які вписуються в межі класичних розрахункових схем (гладкі пластини та оболонки з канонічними формами серединних поверхонь). Пружно-пластичний стан тонкостінних конструкцій довільної геометрії за довільних умов закріплення і навантаження, вочевидь, можна проаналізувати

лише методом скінченних елементів зі залученням алгоритмів наближеного розв'язання фізично нелінійних задач.

7. Вибір критерію міцності.

Критерії руйнування конструкцій [4] поділяють на два типи:

1. Локальні (класичні).
2. Нелокальні.

До локальних (класичних) належать такі:

- Максимального напруження за Мізесом.
- Максимального напруження зсуву Треска.
- Максимального напруження.
- Напруження Мора–Кулона.
- Градієнтний критерій руйнування.
- Інтегральний критерій Нейбера–Новожилова.
- Трипараметричний інтегральний критерій.
- Квадратичний критерій Цай-Ву.

Загальний вигляд критерію Цай-Ву описує поліном другого порядку

$$f = F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{33}\sigma_3^2 + F_{44}\tau_{23}^2 + F_{55}\tau_{13}^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + \\ + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + 2F_{23}\sigma_2\sigma_3 + 2F_{13}\sigma_1\sigma_3 + F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_3\sigma_3,$$

де коефіцієнти F_{ij} ($i, j = \overline{1,6}$) та F_i ($i = 1, 2, 3$) вираховують через границі міцності матеріалу, що визначають за одинісних випробувань.

Аналіз наведених критеріїв руйнування конструкцій та досвід їх використання численними дослідниками свідчить про можливість застосування кількох з них для віртуального визначення руйнівних навантажень під час неруйнівних випробувань оболонкових конструкцій за силових навантажень. Під час дослідження міцності бака окиснювача використані критерії міцності Мізеса, Цай-Ву та максимальних напружень. Найкраще узгоджуються з результатами експериментальних досліджень результати комп'ютерного моделювання, отримані за критерієм максимальних напружень. Це можна обґрунтувати досить малим значенням параметра тонкостінності конструкції. Тому для визначення руйнівного навантаження у цьому випадку вибрано критерій максимальних напружень.

8. Методологія визначення фактичних руйнівних навантажень на конструкцію бака окиснювача.





Висновки. Сформульовані основи методології визначення фактичних руйнівних навантажень на тонкостінні конструкції складної форми за геометрично нелінійного та пружно-пластичного деформування за дії внутрішнього тиску з урахуванням результатів неруйнівних експериментальних випробувань.

1. Гнездилов В. А., Сергеев В. Н., Фирсанов В. В. Прочность ракет-носителей. – Москва: Моск. авиац. ин-т., 2015. – 404 с.
2. Ігдалов Й. М., Кучма Л. Д., Поляков М. В., Шептун Ю. Д. Динамічне проектування ракет. Задачі динаміки ракет та їх космічних ступенів – Дніпропетровськ: Вид-во ДНУ, 2011. – 276 с.
3. Моссаковский В. И. Прочность ракетных конструкций. – Москва: Высш. шк., 1990. – 360 с.
4. Орешко Е. И., Ерасов В. С., Гриневич А. В., Шершак П. В. Обзор критериев прочности материалов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2019. – №9 (81). – С. 108–126, <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-9-108-126>.
5. Панасюк В. В. Механика квазихрупкого разрушения материалов. – Киев: Наук. думка, 1991. – 416 с.
6. Ткаченко С. И., Ткаченко О. А., Самсонов В. И. Методы экспериментальной обработки прочности конструкций летательных аппаратов. – Самара: Изд-во Самарск. гос. аэрокосм. ун-та (СГАУ), 2007. – 194 с.
7. Троценко В. Т. Прочность материалов и конструкций. – Киев: Академперіодика, 2005. – 1086 с.
8. Dinesh Kumar B., Shishira Nayana B., Shrivya Shree D. Design and structural analysis of solid rocket motor casing hardware used in aerospace applications // J. Aeronaut. Aerospace Eng. – 2016. – 5, No. 2. – P. 1–7, <https://doi.org/10.4172/2168-9792.1000166>
9. Lostoski Michael R. Mr., Szucs Jeff, and Schwenning Matt Structural design and fabrication of a rocket. honors research projects, 2016. – 54 p., http://ideaexchange.uakron.edu/honors_research_projects/387.
10. Zaharia S. M., Ștefăneanu R. I. Design and manufacturing process for a ballistic missile // Scientific Bull. – 2016. – XXI, No. 2(42). – P. 140–146.

METHODOLOGY FOR DETERMINATION OF DESTRUCTIVE LOADS ON LARGE-SCALE THIN-WALLED STRUCTURES TAKING INTO ACCOUNT THE RESULTS OF NON-DESTRUCTIVE TESTS

The basics of the methodology for determining the actual destructive loads on large-scale thin-walled structures with a complex shape of the front surfaces under geometrically nonlinear elastic-plastic deformation due to internal pressure taking into account the results of non-destructive experimental tests are proposed.

Key words: destructive loads, large-scale thin-walled structures, non-destructive experimental tests.

¹Ін-т прикл. проблем механіки і математики

ім. Я. С. Підтригача НАН України, Львів;

²Нац. ун-т «Львівська політехніка». Львів;

³Держ. підпр. «Констр. бюро «Південне»
ім. М. К. Янгеля», Дніпро