



МІНІСТЕРСТВО
ОСВІТИ І НАУКИ
УКРАЇНИ



Національний
університет
Дніпровська
політехніка
1899



ПІВДЕННЕ
конструкторське бюро



I МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ

СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ МЕХАНІКИ У КОНСТРУКЦІЯХ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

**MODERN PROBLEMS OF MECHANICS IN
SPECIAL PURPOSE STRUCTURES**

(міжнародна науково-технічна конференція)

26-28 березня 2025

**ЗБІРНИК
МАТЕРІАЛІВ КОНФЕРЕНЦІЇ**



м. Дніпро
2025

Сметанкіна Н.В.¹, Місюра С.Ю.², Місюра Є.Ю.³

¹завідувач відділу вібраційних і термоміцнісних досліджень, д-р техн. наук,
проф., Інститут енергетичних машин і систем ім. А. М. Підгорного НАН України,
Харків, Україна, nsmetankina@ukr.net

²доцент кафедри математичного моделювання та інтелектуальних обчислень в
інженерії, канд. техн. наук, доцент, Національний технічний університет «ХПІ»,
Харків, Україна, serhii.misiura@khpri.edu.ua

³доцент кафедри економіко-математичного моделювання, канд. техн. наук,
доцент, Харківський національний економічний університет ім. С.
Кузнеця, Харків, Україна, misuraeu@gmail.com

АНАЛІЗ ТЕРМОНАПРУЖЕНОГО СТАНУ БАГАТОШАРОВОГО СКЛІННЯ ЛІТАКІВ

Анотація. Запропоновано підхід до розрахунку термонапруженого стану багатошарових склопакетів літальних апаратів. Елемент скління розглядається як незамкнена циліндрична багатошарова оболонка під впливом міжшарових плівкових джерел тепла. Досліджено температурні напруження в багатошаровому склінні літаків типу Ан. Результати підтверджено шляхом порівняння з експериментальними даними.

Ключові слова: багатошарове скління, нагрівальний елемент, температурні напруження.

Вступ. Однією з актуальних задач у сучасній техніці є задача достовірного визначення теплового стану елементів конструкцій. Від її успішного розв'язання залежить надійність і ефективність роботи елементів різних конструкцій, які часто мають неоднорідну структуру [1, 2]. Сучасне обігрівне скло літака є складною великогабаритною багатошаровою конструкцією, яка містить шари, властивості яких істотно відрізняються, та внутрішні джерела тепла [3]. Її працездатність залежить в першу чергу від міцності і довговічності скляних елементів, параметрів адгезійних шарів та конструкційних рішень, які б забезпечували необхідну термостійкість і міцність покрівельного шару при циклічному навантаженні та дії екстремальних експлуатаційних факторів [4].

Метою роботи є розробка методики розрахунку температурних полів і напружень у багатошарових конструкціях з плівковими джерелами тепла. Методика застосовується для встановлення причин розтріскування електрообігрівного скла літаків типу Ан та



розробки рекомендацій по підборі максимально можливої питомої потужності електрообігрівних елементів для цих виробів.

Матеріал і результати досліджень. Скло розглядається як багат шарова оболонка з неканонічною формою в плані, яка зібрана з шарів постійної товщини. На зовнішніх поверхнях відбувається конвективний теплообмін, а на границях контакту шарів розташовані розподілені плівкові джерела тепла. Температурні поля визначаються з розв'язку нестационарної задачі теплопровідності. Такий підхід дозволяє досліджувати термонапружений стан скління при впливі різних джерел тепла, у тому числі міжшарових, без додаткових гіпотез щодо розподілу температур. Деформації шарів оболонки описуються у рамках теорії першого порядку, що враховує деформації поперечного зсуву й обтиснення по товщині у кожному шарі. Рівняння термопружної рівноваги та граничні умови одержані з варіаційного принципу.

Якщо багат шаровий елемент конструкції має неканонічну форму в плані, то для розрахунку в більшості робіт застосовуються чисельні методи. Використання аналітичних методів пов'язане з подоланням математичних труднощів, які викликані описом геометричних параметрів багат шарових тіл складної конфігурації, умов сполучення шарів з урахуванням внутрішніх джерел тепла, наявністю шарів що істотно розрізняються теплофізичними властивостями. У цьому дослідженні пропонується аналітичний підхід до розв'язання задач теплопровідності і термопружності [5]. Вихідна багат шарова оболонка довільної форми в плані занурюється в допоміжну багат шарову оболонку з тією же композицією шарів. Форма цієї оболонки та граничні умов обираються таким чином, щоб можливо було одержати простий аналітичний розв'язок. Щоб забезпечити виконання реальних граничних умов, до допоміжної оболонки вздовж границі вихідної оболонки додаються додаткові компенсуючі джерела, потужність яких визначається з системи інтегральних рівнянь.

Аналіз інформації про стекла, що вийшли з ладу під час експлуатації, показав, що в більшості випадків руйнування починалося посередині сторін або у кутах поверхні, що обігрівається. Для встановлення причин розтріскування покривних стекел була проведена серія повірочних розрахунків стекел на міцність з урахуванням теплових навантажень, пов'язаних з налаштуванням температури відключення живлення нагрівальних елементів та їх підвищеною питомою потужністю. Результати розрахунку порівнювалися з даними, зареєстрованими в польоті при питомих потужностях 0,8 Вт/см² та 0,75 Вт/см². Розрахункові графіки при цьому практично збігалися між собою. Це показує, що зменшення номінальної потужності до 0,75 Вт/см² не погіршує обігрівної



властивості скла. Проведено розрахунок термонапруженого стану скління літаків типу Ан. Встановлено, що стекла мають завищену питому потужність джерела тепла, що призводить до швидкого зміння температури в шарах, і на певних режимах польоту викликає температурні напруження, які є близькими до допустимих. Як показав розрахунок, підвищені температурні напруження локалізуються у кутах та посередині джерела електрообігріву, що збігається з експериментальними даними.

Висновки. Розроблено методику дослідження термонапруженого стану елементів багатошарового електрообігрівного скління літаків зі складною формою плану, яка враховує геометрію області на аналітичному рівні, що підвищує точність отриманих результатів. Встановлено вплив концентрації напружень в кутах і по межі області джерела тепла. Запропонований метод може бути використаний для подальшого аналізу температурних напружень у багатошаровому склінні сучасних літальних апаратів під впливом плівкових джерел тепла. Також запропонована методика може бути використана при проєктуванні багатошарових елементів конструкцій аерокосмічної техніки під впливом навантажень різної природи [6].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ostrowski, P., & Jędrysiak, J. (2017). Heat conduction in periodic laminates with probabilistic distribution of material properties. *Heat Mass Transfer* 53(4), 1425–1437. <https://doi.org/10.1007/s00231-016-1908-0>
2. Smetankina, N., Semenets, O., Merkulova, A., Merkulov, D., & Misura, S. (2023). Twostage optimization of laminated composite elements with minimal mass. In *Smart Technologies in Urban Engineering. STUE-2022. Lecture Notes in Networks and Systems*, 536, Springer, Cham, (p. 456–465). https://doi.org/10.1007/978-3-031-20141-7_42
3. Hontarovskiy, P.P., Smetankina, N.V., Ugrimov, S.V., Garmash, N.H., & Melezhyk, I.I. (2022). Computational studies of the thermal stress state of multilayer glazing with electric heating. *Journal of Mechanical Engineering – Problemy mashynobuduvannia*, 25(1), 14–21. <https://doi.org/10.15407/pmach2022.02.014>
4. Сметанкіна, Н.В., Шупіков, О.М., & Угрімов, С.В. (2016). Математичне моделювання процесу нестационарного деформування багатошарового скління при розподілених та локалізованих силових навантаженнях. *Вісник Херсонського національного технічного університету*, 3(58). 408–413. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtu_2016_3_78



5. Smetankina, N.V., Postnyi, O.V., Misura, S.Yu., Merkulova, A.I., & Merkulov, D.O. (2021). Optimal design of layered cylindrical shells with minimum weight under impulse loading. In *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, IEEE (506–509). <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.956998>
6. Gontarovskiy, P., Smetankina, N., Garmash, N., & Melezhyk I. (2021). Numerical analysis of stress-strain state of fuel tanks of launch vehicles in 3D formulation. In: *Nechyporuk, M., Pavlikov, V., Kritskiy, D. (eds.) Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering-2020*, 188. Springer, Cham (p. 609-619). https://doi.org/10.1007/978-3-030-66717-7_52

