

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ДЕФОРМУВАННЯ ОРТОТРОПНИХ ПЛАСТИН СКЛАДНОЇ ФОРМИ ПРИ УДАРНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

А.І. Меркулова¹, Н.В. Сметанкіна²

¹ аспірант відділу вібраційних і термоміцнісних досліджень, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, Харків, Україна

*² завідувач відділу вібраційних і термоміцнісних досліджень, д-р техн. наук, проф., Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, Харків, Україна
hm2021@ukr.net*

Широке застосування конструкцій з композиційних матеріалів пов'язані з їх поліпшеними, порівняно однорідними, характеристиками. Завдяки високим міцнісним якостям у поєднанні з малою вагою композиційні матеріали широко використовуються в космічному, авіа- і суднобудуванні, транспортному машинобудуванні [1, 2]. Питання статичного деформування композитних елементів конструкцій та їх вільні коливання є найбільш дослідженими [3, 4]. Перехідні процеси у таких конструкціях менш вивчені [5, 6]. Нестационарні процеси у шаруватих елементах конструкцій можуть бути викликані короткочасними інтенсивними навантаженнями різної природи [7, 8]. Ускладнення умов роботи сучасних композитних конструкцій, пов'язане з імпульсними та ударними навантаженнями, різноманітність форм конструктивних елементів, застосування нових матеріалів, призводять до того, що розробка методів розв'язання задач про напружено-деформований стан композитних елементів довільної форми є актуальною задачею динаміки конструкцій.

Пропонується методика дослідження процесів нестационарного деформування шаруватих композитних елементів конструкцій аерокосмічної техніки при імпульсному навантаженні та ударі твердим тілом. Розглядаються елементи, які виконані у вигляді пластин зі складною формою плану. Пластина складається з ортотропних шарів сталюї товщини та займає на координатній площині однозв'язну область, яка обмежена криволінійним контуром. Передбачається, що для пакету шарів у виконується гіпотеза типу С.П. Тимошенка. Напруження в шарах визначаються за законом Гука для ортотропного тіла. Зусилля та моменти визначаються шляхом інтегрування відповідних компонентів тензора напружень вздовж товщини пластини або оболонки.

Рівняння руху елемента конструкції та граничні умови отримано з варіаційного принципу. При розв'язанні задачі про ударну взаємодію індентора з конструкцією система рівнянь руху доповнюється рівнянням руху індентора, а також умовою спільності переміщення індентора та конструкції. Контактна взаємодія враховується з урахуванням модифікованого закону Герца. Задача динаміки шаруватої пластини довільної форми розв'язується методом занурення [9]. Згідно с цим методом замість вихідної пластини розглядається допоміжна шарнірно оперта прямокутна пластина з тією ж композицією шарів. Це дозволяє отримати розв'язок вихідної крайової задачі у вигляді розвинень за тригонометричними функціями. В області, яка обмежена довільним контуром, допоміжна пластина навантажена так само, як і вихідна пластина. Тотожність напружено-деформованого стану допоміжної пластини стану вихідної пластини забезпечується шляхом додавання компенсуючих навантажень, які неперервно розподілені вздовж контуру вихідної пластини. З умови задоволення вихідним граничним умовам на контурі формується система інтегральних рівнянь, яка дозволяє визначити компенсуючі навантаження. Компенсуючі навантаження входять у

систему руху допоміжної пластини як інтегральні співвідношення. Функції переміщень, заданих та компенсуючих навантажень розвиваються в тригонометричні ряди за функціями, що задовольняють граничні умови на контурі допоміжної пластини. Крім того, функції компенсуючих навантажень розвиваються в ряд вздовж контуру вихідної пластини. В результаті задача зводиться до розв'язання системи звичайних диференціальних рівнянь другого порядку щодо коефіцієнтів розвинення функцій переміщень у ряди Фур'є. Отримана система інтегрується шляхом розвинення розв'язку у ряд Тейлора. Після знаходження компенсуючих навантажень обчислюються переміщення, деформації та напруження у шарах пластини.

Як репрезентативний приклад досліджено коливання шарнірно опертої тришарової пластини з ортотропних шарів при ударі індентором у вигляді сталеві кулі. Форма плану пластини задається рівняннями Ламе. Удар наноситься із зовнішньої поверхні першого шару пластини. Порівняння результатів розрахунку прогинів та нормальних напружень з результатами, які отримані методом скінченних елементів, показало їх добре узгодження, що підтверджує достовірність результатів. Незважаючи на високий рівень інтенсивності ударного навантаження, напруження не перевищили своїх допустимих значень, що дозволяє прогнозувати працездатність та надійність такого елемента за його експлуатації в умовах реального навантаження.

Таким чином, розроблено методика дослідження перехідних процесів у шаруватих композитних пластинах зі складною формою плану, яка враховує геометрію області на аналітичному рівні, що підвищує точність отриманих результатів. Запропонована методика може бути використана при проектуванні шаруватих композитних елементів конструкцій аерокосмічної та наземної техніки під впливом нестационарних навантажень.

Список літератури:

1. *Elfaki, I.* Composite sandwich structures in advanced civil engineering applications – a review / *I. Elfaki, S. Abdalgadir* // Computational Research Progress in Applied Science & Engineering. – 2020. – Vol. 7 – P. 259 – 262.
2. *Сметанкіна, Н.В.* Математичне моделювання процесу нестационарного деформування багат шарового оскління при розподілених та локалізованих силових навантаженнях / *Н. В. Сметанкіна, О. М. Шупіков, С. В. Угримов* // Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2016. – № 3(58). – P. 408 – 413.
3. *Hontarovskyi, P. P.* Computational studies of the thermal stress state of multilayer glazing with electric heating / *P. P. Hontarovskyi, N. V. Smetankina, S. V. Ugrimov, N. H. Garmash, I.I. Melezhyk* // Journal of Mechanical Engineering. – 2022. – Vol. 25, No 1. – P. 14 – 21.
4. *Birman, V.* Review of current trends in research and applications of sandwich structures / *V. Birman, G. A. Kardomateas* // Composites Part B: Engineering. – 2018. – Vol. 142 – P. 221 – 240.
5. *Smetankina, N.* Two-stage optimization of laminated composite elements with minimal mass / *N. Smetankina, O. Semenets, A. Merkulova, D. Merkulov, S. Misura* // Smart Technologies in Urban Engineering. STUE-2022. Lecture Notes in Networks and Systems. – 2023. – Vol. 536. – P. 456 – 465.
6. *Smetankina, N. V.* Optimal design of layered cylindrical shells with minimum weight under impulse loading / *N. V. Smetankina, O. V. Postnyi, S. Yu. Misura, A. I. Merkulova, D. O. Merkulov* // 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). – 2021. – P. 506 – 509.
7. *Smetankina, N.* Simulating of bird strike on aircraft laminated glazing/ *N. Smetankina, A. Malykhina, D. Merkulov* // MATEC Web of Conferences. – 2019. – Vol. 304. – P. 01010 – 01016.
8. *Merculov, V.* Force simulation of bird strike issues of aircraft turbojet engine fan blades / *V. Merkulov, M. Kostin, G. Martynenko, N. Smetankina, V. Martynenko* // International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) - 2021. ICoRSE 2021. Lecture Notes in Networks and Systems. – 2022. – Vol. 305. – P. 129 – 141.
9. *Smetankina N.* Nonstationary heat conduction in multilayer glazing subjected to distributed sources / *N. Smetankina, O. Postnyi* // Informatyka, Automatyka, Pomiarzy w Gospodarce i Ochronie Środowiska. – 2020. – Vol. 10, No 2. – P. 28–31.