



ДЕРКАЧ

Олег Леонідович –

кандидат технічних наук,
завідувач відділу коливань
і вібраційної надійності
Інституту проблем міцності
імені Г.С. Писаренка НАН
України

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВІБРАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ СТРУКТУРНО- НЕОДНОРІДНИХ МЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

**За матеріалами наукового повідомлення
на засіданні Президії НАН України
3 травня 2023 року**

Доповідь присвячено результатам досліджень, проведених в Інституті проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, щодо розроблення методів та засобів визначення і підвищення демпфівальної здатності композитних елементів конструкцій, вібродіагностики локальних пошкоджень різного типу, а також дослідження впливу порушення циклічної симетрії на вібронапруженість робочих коліс турбомашин.

Ключові слова: демпфірування коливань, вібродіагностика, композитні матеріали, робочі колеса турбомашин, вібраційна міцність.

Застосування нових матеріалів, зокрема полімерних композитів, армованих вуглецевими волокнами, є пріоритетним напрямом у створенні літальних апаратів та підвищенні техніко-економічних показників газотурбінних двигунів [1]. Дослідження вібраційної міцності композитних матеріалів та відповідальних конструктивних елементів, що працюють в умовах динамічних навантажень, є необхідними для обґрунтування їх безпечної експлуатації. Крім того, для підвищення надійності конструкцій та вдосконалення технології виробництва деталей важливою є своєчасна діагностика дефектів.

Для вирішення цих завдань у відділі коливань і вібраційної надійності Інституту проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України проводять фундаментальні та прикладні дослідження, спрямовані на розроблення методів зниження динамічної напруженості структурно-неоднорідних елементів. Основна мета цих досліджень полягає у підвищенні вібраційної надійності елементів конструкцій завдяки збільшенню їх демпфівальної здатності, розробленні наукових основ вібраційної діагностики

різного типу, а також в аналізі вібронпруженості пошкоджень лопаткових вінців турбомашин і прогнозуванні границі їх стійкості під впливом потоку рідини або газу.

Ці дослідження мають велике практичне значення для підвищення надійності перспективних конструктивних елементів з композитних матеріалів, а також для розроблення методів забезпечення віброміцності та ресурсу турбомашин.

Розроблення методів пасивного та активного демпфірування коливань. Дисипація енергії відіграє визначальну роль у здатності матеріалів та елементів конструкцій опиратися вібраційним навантаженням. Для визначення вібропоглинальних властивостей сучасних композитних матеріалів було модернізовано оригінальні експериментальні установки, відмінною особливістю яких є мінімізація сторонніх втрат енергії, а також безконтактна реєстрація коливань. Дослідження дисипативних властивостей матеріалів здійснено на призматичних зразках за умови їх чистого згину. Це дозволяє одержати рівномірний напружений стан уздовж робочої частини зразка, що забезпечує достовірність отримуваних даних. В основу експериментального методу дослідження покладено концепцію амплітудно залежного розсіювання енергії коливань у матеріалі. Так, у статті [2] було визначено дисипативну здатність плетених вуглепластиків у широкому діапазоні температур. Отримані дані можна використовувати як довідкові для проєктування.

Було також розроблено математичні моделі для прогнозування пружних і дисипативних властивостей композитних матеріалів. На їх основі побудовано моделі п'єзоелектричних композитів, які застосовують у так званих смарт-конструкціях для активного керування коливаннями. П'єзоелектричні композитні елементи у вигляді шарів матеріалу або накладок використовують як актуатори і сенсори. Активне керування здійснюється завдяки з'єднанню цих елементів у ланцюг із від'ємним зворотним зв'язком. Тому для реалізації активного демпфірування необхідно визначити

різницю електричних потенціалів, яку потрібно застосувати до п'єзоелектричного актуатора для зменшення амплітуд коливань. З метою вирішення цього завдання розроблено нові, уточнені моделі пластин з активними та пасивними п'єзошарами на основі змішаної варіаційної постановки зв'язаної задачі електров'язкопружності та дискретно-структурного підходу до побудови напіваналітичних скінченноелементних моделей. За допомогою цих моделей встановлено взаємозв'язок між параметрами зворотного зв'язку та композитної структури пластини й ефективністю активного демпфірування нестационарних коливань від дії імпульсних силових навантажень [3].

Для проведення експериментальних досліджень активного демпфірування розроблено відповідне програмне та апаратне забезпечення. З використанням цього обладнання було досягнуто зменшення максимальних амплітуд коливань удвічі порівняно з методом пасивного демпфірування коливань.

Застосовуючи розроблені моделі, було встановлено залежності між частотою обертання ротора турбіни вертикально-осьового вітрогенератора, параметрами композитного матеріалу лопатей та їх вібронпруженістю [4]. Це дозволило визначити вплив цих факторів на коливання лопатей вітрогенератора й оцінити їх вібраційну надійність. Отримані результати можуть бути корисними для подальшого вдосконалення конструкції лопатей та підвищення ефективності роботи вітрогенераторів.

Розроблення методів вібродіагностики локальних пошкоджень композитних елементів конструкцій. Під час експлуатації та виготовлення багатошарових композитних елементів конструкцій можуть виникати пошкодження, які часто мають вигляд поверхневих надрізів та розшарувань. Для тривимірних скінченноелементних моделей пошкоджених стрижнів прямокутного поперечного перерізу отримано нові дані, які засвідчують вплив співвідношення пружних характеристик та анізотропії матеріалу на зміну основної частоти коливань [5]. Дослідження показали значний вплив деформацій зсуву на характер залежностей, що ра-

ніше не враховувалося у стрижневих моделях. Крім того, було встановлено, що є такі місця розташування пошкоджень, у яких виявити їх за допомогою зміни власної частоти коливань практично неможливо.

Вивчається також вплив іншого типу пошкоджень вуглепластиків плетеної структури, які виникають під дією низькоенергетичних ударів. Було проведено дослідження на багатошарових зразках з різними типами таких локальних пошкоджень і встановлено залежності між їхньою дисипативною здатністю та енергією удару. Результати засвідчили значний вплив таких пошкоджень на абсолютну величину та зміну характеру амплітудної залежності показників дисипації енергії.

Показано, що для пошкоджених зразків залежність логарифмічного декременту коливань від амплітуди циклічної деформації має локальний максимум в області малих деформацій. Однак це спостерігається лише при досягненні певної критичної величини пошкодження (енергії удару). Тому постає необхідність розроблення більш чутливих методів вібраційної діагностики пошкоджень у композитних елементах конструкцій.

Для вирішення цього завдання було вдосконалено методіку, яка ґрунтується на аналізі амплітуд домінуючих гармонік за умови основного, суб- та супергармонічного резонансів. З використанням сучасного обладнання та розробленої у відділі оригінальної установки [6] було встановлено нові вібраційні ознаки наявності низькоенергетичних ударних пошкоджень стрижневих елементів з багатошарового плетеного вуглепластику.

Зокрема, показано, що спектр амплітуд коливань для такої пружної системи характеризується домінуванням непарних гармонік. Кількісним показником наявності та величини пошкодження є співвідношення амплітуд цих гармонік. Розроблено відповідну методіку розрахункових досліджень, яка враховує контакт між берегами тріщин та розшарувань. Уперше її застосовано для дослідження нелінійних коливань лопаток з наявністю дихаючих тріщин. За результатами обчислень отри-

mano нові дані щодо вібраційної діагностики втомних тріщин у робочих лопатках турбін [7].

Дослідження впливу порушення структурної однорідності лопаткових вінців на їх вібронпруженість. Експлуатаційні пошкодження різного типу та допуски на виготовлення зумовлюють розкид значень власних частот коливань лопаток робочих коліс турбомашин. За результатами проведених розрахунково-експериментальних досліджень [8] встановлено, що локальний розлад частот коливань лопаток є причиною підвищення вібронпруженості міжпазових виступів дисків робочих коліс компресора низького тиску авіаційного газотурбінного двигуна. Зокрема, показано можливість зниження вібронпруженості шляхом аналізу та вибору характеристик, що впливають на жорсткість зв'язку лопаток з диском. Це має велике практичне значення для підвищення вібраційної надійності робочих коліс компресорів. Результати досліджень передано провідним підприємствам, зокрема ДП «Зоря»—«Машпроект». Крім того, цей напрям досліджень є одним із пунктів перспективного плану спільної науково-дослідної діяльності з ДП «Івченко-Прогрес». Ще одним напрямом таких досліджень є визначення границь стійкості лопаток до флатеру. За результатами досліджень створено базу даних критичних значень параметрів лопаткових решіток. На її основі розроблено експрес-метод прогнозування границь динамічної стійкості до дозвукового зривного флатеру, який може бути використано при проектуванні компресорів авіаційних газотурбінних двигунів.

Висновки. Отже, в Інституті проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України розроблено комплекс розрахунково-експериментальних методик, які дозволяють визначити динамічні властивості структурно-неоднорідних матеріалів та оцінити вплив експлуатаційних і конструктивних факторів на вібронпруженість складних механічних систем. Побудовано уточнені моделі багатошарових елементів, які враховують реальні дисипативні властивості матеріалів, що відрізняє їх від уже відомих моделей. На основі розроблених

моделей було обґрунтовано ефективність методів активного демпфірування та отримано нові дані щодо вібродіагностики наявних пошкоджень.

Зазначений комплекс методів спрямовано на наукове обґрунтування застосування ком-

позитних матеріалів у високонавантажених елементах конструкцій. Вивчення їх живучості за наявності локальних пошкоджень та розроблення методів аналізу залишкового ресурсу є актуальним завданням, яке може стати предметом подальших досліджень.

REFERENCES

[СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ]

1. Palchykovskiy V., Morozov A., Torba Yu. Methods for defect detection in aviation engine parts made of composite materials. *Aerospace Technic and Technology*. 2021. **173**(4): 102–109. <https://doi.org/10.32620/akt.2021.4sup1.14>
[Пальчиковський В.О., Морозов А.В., Торба Ю.І. Методи діагностування дефектів деталей авіаційних двигунів з композиційних матеріалів. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2021. Т. 173, № 4. С. 102–109.]
2. Boginich O.E., Derkach O.L., Kobzar V.L. Effect of low and elevated temperatures on the dissipative properties of woven carbon fiber plastics. *Strength of Mater.* 2023. **55**(1): 58–68. <https://doi.org/10.1007/s11223-023-00502-x>
[Богиніч О.Є., Деркач О.Л., Кобзар В.Л. Вплив низької і підвищеної температури на дисипативні властивості тканих вуглепластиків. *Проблеми міцності*. 2023. Т. 55, № 1. С. 71–84.]
3. Derkach O.L., Zinkovskiy A.P., Savchenko O.V. Active damping of nonstationary vibrations of a three-layer electro-viscoelastic composite plate. *Strength of Materials*. 2020. **52**(6): 876–888. <https://doi.org/10.1007/s11223-021-00241-x>
[Деркач О.Л., Зінковський А.П., Савченко О.В. Активне демпфірування нестационарних коливань тришарової електров'язкопружної композитної пластини. *Проблеми міцності*. 2020. Т. 52, № 6. С. 65–78.]
4. Savchenko O.V., Derkach O.L., Zinkovskii A.P., Savchenko K.V. Modal analysis of a blade H-type Darrieus rotor under the action of centrifugal load and energy dissipation in the material. In: 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (September 13–17, 2021, Kharkiv). <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570035>
5. Derkach O.L., Zinkovskii A.P., Onyshchenko Ye.O., Savchenko K.V. Notch-type damage influence on the frequency of the principal mode of the composite cantilever beam flexural vibrations. *Procedia Structural Integrity*. 2022. **36**: 71–78. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.005>
6. Patent of Ukraine No. 143486. Onishchenko E.O., Kabannyk S.M., Kruts V.O., Savchenko K.V. An experimental complex for determining the parameters of forced oscillations of a rod specimen with a fatigue crack when it is excited by a harmonic driving force. 27.07.2020.
[Патент України № 143486. Онищенко Є.О., Кабанник С.М., Круц В.О., Савченко К.В. Експериментальний комплекс для визначення параметрів вимушених коливань стрижневого зразка з тріщиною втоми при його силовому збудженні гармонічною змушувальною силою. 27.07.2020.]
7. Onishchenko E.A., Zinkovskii A.P., Kruts V.A. Determination of the vibration diagnostic parameters indicating the presence of a mode I crack in a blade airfoil at the main, super- and subharmonic resonances. *Strength of Mater.* 2018. **50**(3): 369–375. <https://doi.org/10.1007/s11223-018-9980-y>
[Онищенко Є.О., Зінковський А.П., Круц В.О. Визначення вібродіагностичних показників наявності дихаючої тріщини нормального відриву на вихідній кромці пера лопатки при основному, супер- та субгармонічному резонансах. *Проблеми міцності*. 2018. Т. 50, № 3. С. 5–13.]
8. Zinkovskii A., Merkulov V., Derkach O., Tokar I., Savchenko K. Stress state analysis of compressor blade-disk joint with the influence of centrifugal forces and blade mistuning. *Aerospace Technic and Technology*. 2021. **173**(4): 47–54. <https://doi.org/10.32620/akt.2021.4sup1.07>
[Зінковський А.П., Меркулов В.М., Деркач О.Л., Токар І.Г., Савченко К.В. Дослідження напруженого стану міжпазових виступів диска робочого колеса компресора з урахуванням впливу відцентрових сил та розладу частот коливань лопаток. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2021. Т. 173, № 4. С. 47–54.]

Oleh L. Derkach

G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6783-8516>

DEVELOPMENT OF METHODS FOR ENSURING VIBRATION RELIABILITY OF STRUCTURALLY HETEROGENEOUS MECHANICAL SYSTEMS

According to the materials of report at the meeting of the Presidium of the NAS of Ukraine, May 3, 2023

The report presents the results of research conducted at the G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the NAS of Ukraine. The research focuses on the development of methods and techniques for determining and enhancing the damping capacity of structural elements, vibration diagnostics of different types of damage in multilayer polymer composite elements, and the investigation of the impact of breaking cyclic symmetry on the vibrational stress of bladed disks in turbomachines. The main objectives of this research are to enhance the vibrational reliability of structural elements by improving their damping capacity, establish the scientific foundations for vibration diagnostics of various types of damage, analyze the vibrational stress of bladed crowns in turbomachines, and predict their stability limits under gas flow conditions.

Keywords: vibration damping, vibration diagnostics, composite materials, bladed disk, vibration strength.

Cite this article: Derkach O.L. Development of methods for ensuring vibration reliability of structurally heterogeneous mechanical systems. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2023. (7): 67–71. <https://doi.org/10.15407/visn2023.07.067>