

**Розробка методу прогнозування несучої здатності та температуростабільності силових платформ космічних апаратів.**

**Разработка метода прогнозирования несущей способности и температуростабильности силовых платформ космических аппаратов.**

**Development of a method for predicting carrying capacity and temperature stability of space vehicles platform.**

**1. Номер державної реєстрації - 0118U003638**

**2. Науковий керівник - д.т.н., проф., член-кор. НАН України Бобир Микола Іванович, Бобырь Николай Иванович, Mykola Bobyr.**

**3. Суть розробки, основні результати.**

(укр.) Вперше розроблена імітаційна модель, яка враховує змінні температурні градієнти, схему армування багат шарових ПКМ за умов складного динамічного та вібраційного навантаження. Вперше розроблена феноменологічна модель розсіяного руйнування анізотропних конструкційних матеріалів з врахуванням основних термосилових параметрів експлуатаційного навантаження та коефіцієнта анізотропії. Розроблена нова методика оцінки міцності болтового з'єднання композитних панелей. Одержана та обґрунтована формула для оцінки коефіцієнта концентрації напружень для цього типу з'єднань.

Розроблено алгоритми вібраційного аналізу конструкції силової платформи сотопанелі космічного апарату при виводі на навколосезну орбіту. Створена методика та проведено скінчено-елементне моделювання поведінки конструкції з КМ за умов складного термосилового експлуатаційного навантаження для етапів виводу та експлуатації на навколосезній орбіті. Для умов складного напруженого стану одержано деформаційний критерій руйнування на стадії зародження макротріщини, який враховує вплив двох механізмів руйнування (відрив та зріз) та скалярний параметр пошкоджуваності матеріалу. Виходячи з енергетичного підходу щодо процесу руйнування матеріалу, розроблено узагальнений метод оцінки довговічності для елементів конструкцій, що містять концентратори напружень (деформацій). На основі розрахунків в ANSYS APDL визначені характеристики НДС та проведена оцінка міцності панелі корпусу блоку корисного навантаження КА типу «Січ-2М» при навантаженнях, які виникають в період запуску на орбіту КА (прискорення, гармонійна та випадкова вібрація);

Розроблена методика прийняття обґрунтовання скінченно-елементних моделей терморозмірностабільних силових конструкцій сканерів високої роздільної здатності для сучасних КА. Розроблена методика чисельного моделювання НДС термостабільних силових елементів КА, з врахуванням технологічних особливостей виготовлення ПКМ;

Вдосконалена методика розрахунку кріпильних з'єднань деталей з ПКМ з врахуванням реальних геометричних розмірів, площин симетрії, величин допусків кріпильний елемент /отвір, структури ПКМ, контактної взаємодії окремих складових кріпильного елемента та тертя між ними. Встановлені особливості підбору ПКМ з метою оптимізації контактних зусиль на поверхні отворів та бічних поверхонь кріпильних елементів;

Практичне значення отриманих результатів наукових досліджень підтверджено створенням реальних силових конструкцій СВРЗ для КА «Січ-2М» з відповідним актом впровадження та госпдоговорною тематикою з ДП «КБ Південне ім. М.К.Янгеля».

(рос.) Впервые разработана имитационная модель, которая учитывает переменные температурные градиенты, схему армирования многослойных ПКМ в условиях сложного динамического и вибрационного нагружения. Впервые разработана феноменологическая модель рассеянного разрушения анизотропных конструкционных материалов с учетом

основных термосиловых параметров, эксплуатационной нагрузки и коэффициента анизотропии. Разработана новая методика оценки прочности болтового соединения композитных панелей. Получена и обоснована формула для оценки коэффициента концентрации напряжений для этого типа соединений.

Разработаны алгоритмы вибрационного анализа конструкции силовой платформы сотопанели космического аппарата при выводе на околоземную орбиту. Создана методика и проведено конечно-элементное моделирование поведения конструкции с КМ в условиях сложного термосилового эксплуатационного нагружения для этапов вывода и эксплуатации на околоземной орбите. Для условий сложного напряженного состояния получено деформационный критерий разрушения на стадии зарождения макротрещины, учитывающий влияние двух механизмов разрушения (отрыв и срез) и скалярный параметр повреждаемости материала. Исходя из энергетического подхода к процессу разрушения материала, разработан обобщенный метод оценки долговечности для элементов конструкций, содержащих концентраторы напряжений (деформаций). На основе расчетов в ANSYS APDL определены характеристики НДС и проведена оценка прочности панели корпуса блока полезной нагрузки КА типа «Сич-2М» при нагрузках, которые возникают в период запуска на орбиту КА (ускорение, гармоничная и случайная вибрация).

Разработана методика принятия обоснование конечно-элементных моделей терморазмеростабильных силовых конструкций сканеров высокого разрешения для современных КА. Разработана методика численного моделирования НДС термостабильных силовых элементов КА, с учетом технологических особенностей изготовления ПКМ;

Усовершенствована методика расчета крепежных соединений деталей из ПКМ с учетом реальных геометрических размеров, плоскостей симметрии, величин допусков крепеж / отверстие, структуры ПКМ, контактного взаимодействия отдельных составляющих крепежа и трения между ними. Установлены особенности подбора ПКМ с целью оптимизации контактных усилий на поверхности отверстий и боковых поверхностях крепежных элементов;

Практическое значение полученных результатов научных исследований подтверждено созданием реальных силовых конструкций СВРЗ для КА «Сич-2М» с соответствующим актом внедрения и хозяйственной тематике с ГП «КБ Южное им. Янгеля».

**(англ.)** A simulation model was developed for the first time. That model takes into account variable temperature gradients, the scheme of reinforcement of multilayer PCM under conditions of complex dynamic and vibration load. For the first time, a phenomenological model of scattered destruction of anisotropic structural materials was developed. The main thermopower parameters of the operational load and the anisotropy coefficient were taken into account. A new method for estimating the strength of bolted joints of composite panels has been developed. The formula for estimating the stress concentration factor for this type of connections is obtained and substantiated.

Algorithms for vibration analysis of the space platform soto-panel power platform design during launch into Earth orbit have been developed. The technique is created and the finite-element modelling of the behaviour of the structure with composite materials under the conditions of complex thermopower operational load for the stages of output and operation in Earth orbit is carried out. For conditions of complex stress state, the deformation criterion of fracture at the stage of macrocrack formation is obtained, which considers the influence of two fracture mechanisms (separation and shear) and the scalar parameter of material damage. Based on the energy approach to the process of material destruction, a generalized method for assessing the durability of structural elements containing stress concentrators (deformations). Based on the calculations in ANSYS APDL, the characteristics of stress-strain state are determined and the strength of the panel of the body of the payload unit of the spacecraft type "Sich-2M" at loads that occur during the launch into orbit of the spacecraft (acceleration, harmonic and random vibration);

A method for accepting the justification of finite-element models of thermally dimensionally stable power structures of high-resolution scanners for modern spacecraft has been developed. The technique of numerical modelling of stress-strain state of thermostable power elements of the

spacecraft was developed. Where technological features of manufacturing of PCM were taken into account.

Method of calculating the fastening joints of parts with PCM with taking into account the actual geometric dimensions, symmetry planes, tolerances of the fastener/hole, the structure of PCM, the contact interaction of the individual components of the fastener and the friction between them was improved. Features of the selection of PCM for the purpose of optimization of contact efforts on a surface of apertures and lateral surfaces of fastening elements were established;

The practical significance of the obtained research results was confirmed by the creation of real power structures high-resolution scanners for spacecraft "Sich-2M" with the relevant act of implementation and economic contract issues with Yuzhnoye State Design Office .

4. –

#### **5. Порівняння зі світовими аналогами.**

Вперше створено ефективний метод прогнозування ресурсу, як основний параметр надійності силових елементів відповідальних виробів нової техніки, які виготовлені із компо-зиційних матеріалів, на стадії їх проектування при циклічному стохастичному навантаженні з врахуванням пошкоджуваності. Отримані нові дані для визначення параметрів моделі пошкоджуваності та критерію руйнування композиційних матеріалів в процесах циклічного термосилового навантаження терморозміростабільних силових елементів конструкцій космічного призначення протягом всього їх життєвого циклу. Отримані результати є новим важливим кроком в розв'язуванні актуальної комплексної науково-технічної проблеми, а саме: обґрунтуванні ресурсу на стадії проектування виробів нової наукоємної та високотехнологічної техніки із КМ.

#### **6. Економічна привабливість для просування на ринок.**

На сьогодні відповідальні вироби, які виготовлені з КМ, широко використовуються в авіакосмічній галузі всіх країн світу. Однак проблема прогнозування їх безпечного ресурсу експлуатації не вирішена (лист від ДП «КБ «Південне» №332/2784 від 19.11.2020 р. та лист від ДП «Антонов» №701/10074-20 від 19.11.2020 р. додається). Отримані результати є новим важливим кроком в розв'язуванні актуальної комплексної науково-технічної проблеми, а саме: обґрунтуванні ресурсу на стадії проектування виробів нової наукоємної та високотехнологічної техніки із ПКМ. Отримані результати роботи є актуальною інженерною та виробничою потребою, в першу чергу, ДП «Антонов» та ДП «КБ «Південне» при створенні нових видів авіакосмічної техніки України, що підтверджено відповідними листами. Названа НДР є логічним продовженням виконання досліджень в рамках комплексної угоди про співпрацю між КПП ім. Ігоря Сікорського та ДП «Антонов» (№12.2490.2019 від 18.07.2019 р.) та ДП «КБ «Південне» (№15/1-НТС від 23.09.2015 р.).

#### **7. Потенційні користувачі.**

Результати роботи планується використати в інженерній практиці КБ підприємств та організацій авіакосмічного комплексу України (ДП «Антонов», ДП «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля», ПАТ «Мотор-Січ», ЗМКБ «Прогрес» та ін.); автопрому України (АвтоКРАЗ, АвтоЗАЗ); Нафтогаз України («Київтрансгаз», НПО «Заря», МКБ «Луч» та ін.) та Інституту механіки Отто-фон-Геріке університету Магдебурга (ФРН) у вигляді: ефективного методу проектування температуророзміростабільних силових елементів конструкцій різного призначення протягом всього їх життєвого циклу; методики визначення параметрів моделі визначення параметрів моделі пошкоджуваності та критерію руйнування КМ з врахуванням основних факторів термосилового навантаження.

#### **8. Стан готовності розробки.**

Розроблено методичне та інформаційне забезпечення для розрахунково-теоретичних досліджень конструктивно-технологічного забезпечення несучої здатності та терморозміростабільності силових платформ КА; Наведено експериментальні дані фізико-

механічні та теплофізичні властивості композитних матеріалів для конструювання композитних пластин сотопанелей для КА та інших технічних систем. Розроблена методика розрахунково-теоретичного визначення фізико-механічних властивостей композитних сотопанелей.

Створений новий узагальнюючий метод проектування несучих конструкцій різного призначення для умов термосилового навантаження в широкому діапазоні нестационарного (стохастичного) мало- та багато циклового частотного спектру.

Вперше в систему визначальних рівнянь введено розроблений авторами проекту енергетичний параметр пошкоджуваності та критерій руйнування для нових композиційних матеріалів з врахуванням всього життєвого циклу КА.

Ефективність та достовірність розробленого методу перевірено на основі натурних досліджень з використанням сучасних зразків нової техніки.

## **9. Існуючі результати впровадження.**

Результати роботи використовуються в інженерній практиці ДП «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля» (Акт впровадження результатів НДР від ДП «КБ «Південне» імені М.К. Янгеля» від 07.12.2020р. в рамках угоди про співпрацю між КПІ ім. Ігоря Сікорського та ДП «КБ «Південне» (№15/1-НТС від 23.09.2015 р.). Зокрема, в інженерну практику ДП «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля» впроваджено ефективний метод розрахунку напружено-деформованого стану силових елементів конструкцій сучасних та перспективних космічних апаратів (КА). Він дозволив обґрунтовано оптимізувати конструктивно-технологічні параметри несучої платформи СВРЗ та прогнозувати ресурс на протязі всього життєвого циклу КА.

## **10. Назва підрозділу, телефон, e-mail.**

Механіко-машинобудівний інститут, кафедра динаміки і міцності машин та опору матеріалів. Тел.: (044) 204-94-55 E-mail: mmi@kpi.ua

## **11. Фото (слайди з презентації):** Додаються

## **12. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання:**

Захищені кандидатські дисертації:

Коваль В.В. на тему: «Малоциклова втома елементів конструкцій з урахуванням пошкоджуваності», , 05.02.09 – динаміка та міцність машин, наук. керівник Бобир М.І., 2018р.;

Фам Д.К. на тему: «Критерій граничного стану конструкційних матеріалів з врахуванням пошкоджуваності», 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла, наук. керівник бобир м.і., 2019р.;

Маслей В.М на тему: "Міцність композиційних терморозміростабільних силових конструкцій космічних апаратів при динамічному навантаженні",. за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин, наук. керівник Рудаков К.М. 2018р.

Дифучин Ю.М.,: "Напружено-деформований стан і міцність однозрізних болтових з'єднань елементів конструкцій з композиційних матеріалів" , за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин, наук. керівник Рудаков К.М. 2019р.

### **Перелік основних публікацій:**

1. Рудаков К.Н., Дифучин Ю.Н. О расчетах болтового соединения на разрывное разрушение ослабленного отверстием сечения композитной пластины // Mechanics and Advanced Technologies #1 (82), 2018. pp. 58-66. Copernicus

2. Рудаков К.Н., Дифучин Ю.Н. О расчетах болтового соединения на смятие отверстий в пластине из слоистого полимерного композиционного материала // Mechanics and Advanced Technologies #2 (82), 2018. pp. 42-50. Copernicus

3. D. Pham Kinetics of damages accumulation and criterion of the limit state of construction materials/ D. Pham, A. Babak, V. Koval// *Mechanics and Advanced Technologies*, Киев, 2018 р., №1 (82). – с. 131-138 Copernicus
4. Бабак А.М., Фам дик Куан, Тимошенко О.В., Яхно Б.О., доц Чисельне моделювання полів пошкоджуваності та залишкових напружень після дорнування отворів // *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, Житомир, 2018 р., № 1 (81). – с. 54-62 DOI: [https://doi.org/10.26642/tn-2018-1\(81\)-54-62](https://doi.org/10.26642/tn-2018-1(81)-54-62)
5. Тимошенко О.В., Коваль В.В., Бабак А.М., Фам Дик Куан Повреждаемость металлических материалов с учетом повреждаемости // *Научный журнал «Технічні науки та технології»*, №2, (12) 2018, с. 49-58 Copernicus
6. Тимошенко О.В., Прогнозування довговічності силових елементів з функціональними отворами при малоцикловій втомі / Тимошенко О.В., Бабак А.М., Фам Дик Куан // *Вісник Херсонського національного технічного університету*, Херсон, 2018 р., № 2 (65). – с. 56-67
7. Маслей В.Н., Кришук Н.Г., Цыбенко А.С. Анализ характеристик гармонических колебаний композитной сотовой панели сканера космического аппарата // *Проблемы прочности*, 2018, №4, с. 1-11 БД:Scopus;
8. Маслей В.М., Кришук М.Г., Цыбенко О.С. Аналіз міцності композитної сотової панелі сканера космічного апарату при гармонічній вібрації на етапі виведення на орбіту. *Mechanics and Advanced Technologies*, Том 1, № 82 (2018) с.34-42; Url - <http://journal.mmi.kpi.ua/article/view/124310>; DOI - <https://dx.doi.org/https://doi.org/10.20535/2521-1943.2018.82.124310>; БД: Copernicus
10. Kryshchuk N.G. Experience using the platform 3DEXPERIENCE. Academia case Study National Technical University Of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”. Dassault Systemes, the 3DEXPERIENCE Company, 2018, с. 1-4
11. The influence of plastic deformation on the low-cycle fatigue during the burnishing of holes in flat specimens of D16chT steel / [O. V. Timoshenko, V. V. Koval, A. M. Babak and oth.] *Strength of materials*. – 2018. – Vol 50 (№3). – pp. 448–452. БД:Scopus;
12. Кришук М.Г., Маслей В.М., Масштабей А. В. Анализ терморазмеростабильности композитной сотовой панели для условий термического нагружения космического аппарата. // *Mechanics and Advanced Technologies*, 2019, том 85, №1, с.57-62, DOI: ; Url - <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2019.85.156494>; Наукометричні БД: Copernik; Мова публікації: західноєвропейська, Категорія «В»
13. Кришук М.Г., Маслей В.М., Шукаєв С.М., Лавендел Ю.О. Оцінка розмірної стійкості композитної сотової панелі для умов терсилового навантаження на навколосеземній орбіті. // *Mechanics and Advanced Technologies*, 2019, том 85, №3 , 5 стр. Наукометричні БД: Copernik; Мова публікації: західноєвропейська., Категорія «В»
14. Рудаков К.Н. К методике определения "эквивалентных" физико-механических характеристик сотового заполнителя композиционной плиты / К.Н. Рудаков, В.Н. Маслей // *Mechanics and Advanced Technologies* #3 (84), 2018. - с. 75-85.; DOI - <https://dx.doi.org/https://doi.org/10.20535/2521-1943.2018.84.149780>, Copernicus, Категорія «В»
15. Рудаков К.Н. Коэффициент концентрации напряжений у контактирующего с болтом нагруженного отверстия в монослое ортотропного композиционного материала / К.Н. Рудаков, Ю.Н. Дифучин, С.А. Бабієнко // *Mechanics and Advanced Technologies* #1 (85), 2019. С. 41-48, Copernicus, Категорія «В»
16. Mykola Bobyr, Yurii Borodii, Pavlo Protsenko, Eckart Uhlmann, Janis Thalau, Pavlo Lypovka The wear resistance research of the rail contact surface depending on the grinding process // *Mechanics and Advanced Technologies*, №2 (86), 2019, p.26-35. DOI: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2019.86.181036>, Copernicus, Категорія «В»
17. Y. Kalenychenko, V. Bazhenov, A. Kalenychenko, V. Koval, S. Ratsebarsky Determination of Mechanical Properties of Paramagnetic Materials by Multi-frequency Method // *International Journal “NDT Days”*, 2019. – Volume II, Issue 4. – pp. 406–416.

18. Masley V., Kryshchuk M., Tsybenko A. Analysis of Harmonic Vibration Characteristics for a Composite Honeycomb Panel of the Spacecraft Scanner. *Strength of Materials*, July 2018, Vol. 50, Issue 4, pp 655–664; Наукометричні БД:Scopus;

19. О. А. Bondarets., А. Р. Hrabovskyi, І. І. Babiienko, Модель пошкоджуваності для розрахунку руйнування конструкційних матеріалів // *Mechanics and Advanced Technologies* Том 87, № 3, 2019. Copernicus, Категорія «В».

20. Рудаков К.Н. Экспресс-оценка коэффициента концентрации напряжений у нагруженного болтом круглого отверстия в пластине из слоистого полимерного композиционного материала. Влияние схемы армирования / К.Н. Рудаков, Ю.Н. Дифучин // *Mechanics and Advanced Technologies*. – #1(88), 2020. – С. 7-18. DOI:10.20535/2521-1943.2020.88.200290.

21. Рудаков К.М. Визначення коефіцієнта концентрації напружень у послабленому отвором перерізі композитній пластині, при контакті отвору з циліндром / К.М. Рудаков, С.А. Бабієнко, Т.І. Щербань // *Mechanics and Advanced Technologies*. – #2(89), 2020. – С. 48-54. DOI: 10.20535/2521-1943.2020.89.204546.

22. 4. Dubyk Y., Ishchenko O., Kryshchuk M. “A new simple method for shell vibration analysis with initial stress accounting”, 1st Mediterranean Conference on Fracture and Structural Integrity, MedFract1. Athens (Greece). 2020, February 26-28. [https://www.vcsi1.eu/medfract/pdf/Flyer\\_Athens%202020.pdf](https://www.vcsi1.eu/medfract/pdf/Flyer_Athens%202020.pdf)

23. Dubyk Y., Ishchenko O., Kryshchuk M. A new simple method for shell vibration analysis with initial stress accounting, *Procedia Structural Integrity* 26 (2020) 422–429. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.06.055> (SCOPUS).

24. Зилинский А.И., Луговской А.Ф., Кришук Н.Г., Гришко И.А., Шульга А.В. фильтроэлемента при ультразвуковом кавитационном фильтровании. *Mechanics and Advanced Technologies*, 2020, Vol. 88, №1, p. 58-65, DOI:<https://doi.org/10.20535/2521-1943.2020.88.201335>

25. Удод А.А., Помпий А.А., Кришук Н.Г., Волошин В.А. Исследование напряженно-деформированных состояний различных конструкций адгезивных мостовидных протезов. *Медицинские новости Грузии*, 2020, No 9 (306), с.156-161 (SCOPUS).

26. Bobyr N.I., Koval V.V., Pham D.Q. Phenomenological criterion of the limit state of materials taking into account damage value. *Strength of Materials*, 2020, № 6, p., <https://www.springer.com/journal/11223> (SCOPUS).

Навчальні посібники:

1. Механіка матеріалів і конструкцій: Домашня контрольна робота: Частина 1 [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. заочної форми навчання спеціальності 131 «Прикладна механіка», спеціалізацій «Технології та інжиніринг зварювання» і «Автоматизовані технологічні системи у зварюванні»/ А. Є. Бабенко, О. П. Заховайко, М. С. Шидловський, А.М. Бабак ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,1 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 49 с.

2. Нові матеріали: Частина І. Міцність і деформування полімерних та композиційних матеріалів при короткочасному навантаженні: Лабораторний практикум. [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка», спеціалізацій «Динаміка і міцність машин» та «Інформаційні системи та технології в авіабудуванні» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Шидловський М.С., Заховайко О.П., Тимошенко О.В., Мусієнко О.С. – Електронні текстові дані (1 файл: 11,2 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 81 с.

3. Теорія коливань та стійкості руху. коливальні системи з розподіленими параметрами. Курсовий проект (Електронний ресурс) навч. Посібник для студ.денної форми навчання спеціальності 131 «Прикладна механіка» спеціалізації «Динаміка і міцності машин» та «Інформаційні системи та технології авіабудування» А.Є.Бабенко, О.О.Боронко, А.П. Грабовський, А.М. Бабак, КПІ ім. Ігоря Сікорського. Електронні текстові дані – КПІ 2018. – 67.

4. Цибенко А.С., Крищук М.Г. ПОЧАТКОВО-КРАЙОВІ ЗАДАЧІ МЕХАНІКИ СУЦІЛЬНОГО СЕРЕДОВИЩА. Навчальний посібник для освітньо-наукової програми «Динаміка і міцність машин» за спеціальністю 131 «Прикладна механіка» галузі знань «Механічна інженерія», Київ, «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2020, 90с

**13. Ключові слова.**

КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ, РЕСУРС, МОДЕЛЬ ПОШКОДЖУВАНOSTI, ТЕМПЕРАТУРОСТАБІЛЬНІСТЬ, СИЛОВА ПЛАТФОРМА КА, ДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ, НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН.