

**Секція:** 10 - Механіка

2. Проблеми механіки і засоби їх вирішення із використанням комп'ютерних технологій. 2.1. Розробка методів, інформаційних технологій, обчислювальних алгоритмів і процедур для чисельного розв'язання практичних задач. 2.1.1. Механіки деформівного твердого тіла

### АНОТОВАНИЙ ЗВІТ

**за завершеним прикладним дослідженням або завершеною науково-технічною (експериментальною) розробкою, виконання яких здійснювалось у 2018-2020 роках**

Назва прикладного дослідження або науково-технічної (експериментальної) розробки (далі – дослідження або розробки): Розробка методу прогнозування несучої здатності та температуростабільності силових платформ космічних апаратів

Керівник дослідження або розробки: Бобир Микола Іванович

Номер державної реєстрації: 0118U003638

Номер облікової картки заключного звіту: 0221U102852

Найменування організації-виконавця: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Строки виконання: початок - 01.01.2018, закінчення - 31.12.2020

Обсяг коштів, виділених на виконання дослідження або розробки за весь період (згідно із запитом / фактичний): 1980 / 1247,000 тис. гривень.

#### 1. КОРОТКИЙ ЗМІСТ ЗАПИТУ (до 30 рядків тексту)

**1.1. Проблема, на вирішення якої було спрямовано прикладне дослідження або прикладну розробку:** На сьогодні в світі не вирішена комплексна науково-технічна проблема ефективного обґрунтування надійних експлуатаційних параметрів силових платформ СВРЗ в широкому діапазоні стохастичних циклічних та ударних термосилових навантажень з врахуванням матеріаломісткості сучасних КА. Використання розробленого методу оцінки несучої здатності та прогнозування ресурсу експлуатації СП на стадії проектування дозволить суттєво знизити собівартість та матеріаломісткість, підвищити жорсткість та скоротити терміни проведення конструкторсько-технологічної підготовки виробництва нових конструкцій КА вітчизняного виробництва. Робота спрямована на вирішення актуальної науково-технічної проблеми, а саме: розробки ефективного розрахунково-експериментального методу проектування терморозміростабільних силових конструкцій сучасних КА з врахуванням основних термосилових параметрів їх життєвого циклу.

**1.2. Об'єкт і предмет дослідження або розробки:** Об'єкт дослідження – конструкції терморозміростабільних силових платформ (СП) сучасних та перспективних космічних апаратів (КА) з врахуванням основних термосилових параметрів їх життєвого циклу (транспортування, виведення на орбіту та цикл експлуатації), що забезпечують відповідність технічним умовам по терморозміростабільності, міцності, жорсткості, вібраційним та динамічним навантаженням. Предмет дослідження – напружено-деформований стан та несуча спроможність СП ска-нера високої роздільної здатності (СВРЗ) з врахуванням основних видів вібраційного та імпульсного термосилових навантажень на етапах життєвого циклу в детермінованій та ймовірнісній постановках. Моделі пошкоджуваності та критерії руйнування нових композиційних матеріалів (КМ), обґрунтування границь їх використання.

**1.3. Мета і основні завдання дослідження або розробки:** Мета – розробка нового узагальнюючого методу оцінки несучої здатності та терморозміростабільності силових платформ СВРЗ на стадії ескізного проекту геостационарної платформи протягом всього життєвого циклу КА з врахуванням основних термосилових параметрів і закономірностей пошкоджуваності сучасних композиційних матеріалів (КМ) та використанням основних положень механіки твердого деформівного тіла, термодинаміки незворотніх процесів, континуальної механіки пошкоджуваності, теорії ймовірності та математичної статистики, а також застосування сучасних програмних комплексів. Розробка ефективних методів проектування терморозміростабільних силових платформ космічних апаратів на основі тестових

комп'ютерних випробувань та порівняння з результатами експертних даних і натурних експериментів. В якості термосилових параметрів враховується термічне, вібраційне та ударне навантаження стохастичного типу для КА вагою до 500 кг.

**1.4. Коментар.** (надати обов'язково у випадку, якщо відбувалися коригування мети, предмету дослідження або розробки, основних завдань, відхилення від запланованого календарного плану роботи): -

## **2. ОПИС ПРОЦЕСУ НАУКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ АБО РОЗРОБКИ** (до 50 рядків тексту)

**2.1. Описати підхід щодо проведення дослідження або розробки, визначити, у чому його (її) новизна:** Методологічно та концептуально прийнято підхід, який ґрунтується на аналізі об'єктів ракетно-космічного призначення та їх просторових композицій. Для виконання робіт будуть застосовані методи імітаційного натурного та комп'ютерного моделювання.

Науковий підхід базується на основних положеннях механіки деформівного твердого тіла, термопружності (як складової) при циклічних навантаженнях в широкому діапазоні частот, теорії надійності, термодинаміки незворотніх процесів та континуальної механіки пошкоджень. Введення параметрів пошкоджуваності та критеріїв руйнування на стадії зародження макротріщин в систему визначальних рівнянь (з широким обґрунтуванням їх границь використання для сучасних КМ), вперше дасть можливість обґрунтовано визначити геометричні параметри СП різного призначення на стадії проектування нових конструкцій КА. На сьогодні поки не розроблені фізично обґрунтовані феноменологічні моделі та критерії розсіяного руйнування КМ, які могли б врахувати основні технологічні та конструктивні особливості будови КМ, термосилові параметри експлуатаційного навантаження та інш і які могли бути зручними для інженерного використання. Гармонійне поєднання розрахункових методів чисельного моделювання та методів діагностики, зокрема різних видів неруйнівного контролю на стадії запуску в експлуатацію відповідальних виробів із КМ дає можливість суттєво знижувати коефіцієнт запасу по ресурсу (на сьогодні  $n_t=10-20$ ), матеріаломісткість конструкції та обґрунтовано закладати періодичність проведення регламентних і ремонтних робіт в період експлуатації.

Названий алгоритм розрахунково-експериментальних робіт складає основу для прогнозування надійності експлуатації виробу із КМ як на стадії проектування, так і на стадії експлуатації. Він вимагає врахування складного термосилового навантаження та нестационарності його прикладання, анізотропії та реологічних властивостей КМ.

Більш зручним (але менш надійним та трудомістким) для інженерного використання виступає нині детермінований підхід, який базується на основних положеннях механіки твердого деформівного тіла, статистичної фізики та континуальної механіки пошкоджуваності. Моделювання процесу розсіяного руйнування на мікро та мезорівнях здійснюється, як правило, у вигляді кінетичних рівнянь для швидкості зміни параметра пошкоджуваності. В якості параметра пошкоджуваності використовується скаляр, вектор або тензор. Статистичний підхід оцінки закономірностей накопичення розсіяних руйнувань в КМ на сьогодні практично не розроблено. Важливу роль при використанні в силових елементах конструкцій космічної техніки КМ відіграє їх температуростабільність. Цей важливий показник, в свою чергу, залежить не тільки від матеріалів матриці та волокон, а також від режимів та напрямів укладки. В науково-дослідній роботі базуючись на основних положеннях деформування КМ та взаємозв'язаного з ним процесом накопичення розсіяних руйнувань побудована та отримала обґрунтування з границь використання узагальнена феноменологічна модель пошкоджуваності у вигляді кінетичного рівняння еволюції параметра пошкоджуваності та критерія руйнування на стадії зародження макротріщини. Розширено перелік експлуатаційних факторів, які враховуються в кінетичному рівнянні пошкоджуваності, а саме: анізотропію фізико-механічних властивостей КМ (клас армованих вуглепластиків), характер стохастичного режиму навантаження в режимі мало- та багатоциклової втоми, анізотропію фізико-механічних властивостей КМ та інш. При цьому вперше встановлено залежність кінетики накопичення розсіяних руйнувань від знаку першого інваріанту тензора напружень, від значення коефіцієнта анізотропії КМ та обґрунтовано тензор пошкоджуваності і його інваріанти.

**2.2. Розкрити основні ідеї дослідження або розробки, як вони втілювались:** Основна ідея - удосконалення композитних конструкцій та обґрунтування застосування нових композиційних матеріалів в авіакосмічній, енергетичній та транспортній галузях промислового комплексу. Результати науково-дослідної роботи дозволять оптимізувати проектування та

розробку конструкторської документації виробів нової техніки.

Вперше запропоновано новий узагальнюючий метод конструктивно-технологічного забезпечення несучої здатності та терморозміростабільності силових платформ КА, який враховуватиме основні термосилові параметри життєвого циклу КА.

Ефективність і новизна методу визначається тим, що вперше обґрунтовано надійність СП космічних апаратів різного призначення по параметрах циклічної міцності та жорсткості в широкому діапазоні експлуатаційних частот. Для підвищення точності оцінки НДС та ресурсу несучих елементів СП будуть використані розроблені та допрацьовані авторами узагальнені рівняння стану і феноменологічні моделі розсіяного руйнування в ймовірнісній постановці для сучасних анізотропних КМ (в тому числі армованих безперервними волокнами).

Розроблені нові методи проектування терморозміростабільних силових платформ космічних апаратів при дії циклічних термосилових навантажень різної фізичної природи.

Проведено комплекс експериментальних досліджень нових КМ для визначення параметрів моделі пошкоджуваності та критерію руйнування, визначення та уточнення границь їх використання.

Вперше розроблено та апробовано ефективні методи проектування терморозміростабільних силових платформ космічних апаратів на основі тестових комп'ютерних випробувань та порівняння з результатами експертних даних і натурних експериментів.

Проведено аналіз деформативності, міцності і стійкості силової платформи КА до зовнішніх термосилових навантажень на етапах їх життєвого циклу (транспортування, виведення на орбіту та експлуатації) з урахуванням вибору типу структурних елементів формостабільної конструкції космічного призначення, фізико-механічних властивостей матеріалів з метою визначення несучої спроможності конструкції з врахуванням пошкоджуваності. Розроблені методи та алгоритми перевірено на тестових задачах.

### **2.3. Навести основні гіпотези дослідження або розробки, як вони підтверджувались або спростовувались, визначали формування науково-прикладних результатів:**

Базуючись на основних підходах щодо оцінки міцності конструкцій з КМ, статистичному аналізу та результатах експериментальних досліджень, розроблена імітаційна модель, що враховує змінні температурні градієнти, схему армування багат шарових КМ та може використовуватись за умов складного динамічного та вібраційного навантаження.

### **2.4. Представити нові або оновлені методи та засоби, методика та методологію дослідження або розробки, що створені авторами у ході виконання дослідження або розробки; обґрунтувати, чим вони відрізняються від існуючих:**

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.

Дана математична постановка задач термомеханіки для визначення термопружного стану сотопанелі в умовах термічного навантаження на навколосемній орбіті з урахуванням гіпотез про процеси теплопереносу для технічних систем в умовах космічного простору на навколосемній орбіті.

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.

### **2.5. Описати особливості структури та складових виконання дослідження або розробки:**

Аналіз сучасних конструкцій температурозміростабільних силових платформ космічних апаратів та вимог до їх проектування.

Удосконалення конструкцій та застосування нових матеріалів.

Проведення комплексу експериментальних досліджень нових КМ для визначення параметрів

моделі пошкоджуваності та критерію руйнування, визначення та уточнення границь їх використання.

Розробка та апробація методів проектування температуророзміростабільних силових платформ космічних апаратів на основі тестових комп'ютерних випробувань та порівняння з результатами експертних даних і натурних експериментів.

В першому розділі описано результати критичного аналізу сучасної науко-технічної літератури з методів оцінки ресурсу та температуростабільності силових елементів конструкцій, які виготовлені із КМ. Проведено (в детермінованій та ймовірнісній постановках задачі) аналіз сучасних методів та результатів розрахунку НДС і мало- та багатоциклової втоми конструкцій, які виготовлені з КМ. На цій основі зроблені висновки та поставлені основні задачі наукових досліджень.

В другому розділі описано ефективний метод моделювання кінетики накопичення розсіяних руйнувань в анізотропному КМ за умов статичного складного навантаження. Встановлено зв'язок між характеристиками матеріалу та параметрами пошкоджуваності КМ, що значно скорочує кількість проведення базових експериментів для конкретизації складових тензора пошкоджуваності. Обґрунтовано вплив інваріантів тензора (девіатора) напружень на граничний стан КМ з врахуванням пошкоджуваності та двох механізмів руйнування (відрив та зраз).

Третій розділ присвячено опису методики врахування розсіяних руйнувань в розрахункову практику інженерних задач за умов малоциклової втоми елементів конструкцій. Описано метод їх розрахунку на малоциклову втому з врахуванням динаміки накопичення розсіяних руйнувань та виду напруженого стану.

В четвертому розділі висвітлено метод чисельного моделювання та експрес розрахунку коефіцієнта концентрації напружень в шаруватій композиційній платівці з врахуванням технологічних параметрів болтового кріплення. Обґрунтовано ефективність різних методів визначення фізико-механічних характеристик складних армованих КМ.

П'ятий розділ розкриває методику врахування теплових процесів в умовах складного динамічного навантаження силових платформ КА. Показані особливості впливу різних джерел теплового випромінювання на параметри температурного деформування силових платформ. Розроблена та обґрунтована математична модель теплопереносу для аналізу термічних градієнтів конструкцій силових платформ.

Шостий розділ присвячено моделюванню термопружного стану сотопанелі космічного апарату під дією експлуатаційних навантажень на біляземній орбіті. Проведено аналіз міцності та стійкості її несучих елементів. На цій основі обґрунтовано комплекс рекомендацій для оптимального проектування композитних сотопанелей по параметру жорсткості та температуростабільності.

В сьомому розділі висвітлено апробацію розроблених методик та алгоритмів на прикладі дослідження термонапруженого і деформованого станів сотопанелі КА за умов експлуатаційних навантажень в системі інженерного аналізу ANSYS APDL. Показана ефективність оцінки довговічності панелі КА під дією вібраційних навантажень.

### **3. ОДЕРЖАНІ НАУКОВО-ПРИКЛАДНІ РЕЗУЛЬТАТИ** (до 100 рядків тексту)

#### **3.1. Результати етапів (відповідно до технічного завдання) відобразити у таблиці:**

Таблиця 1

<b>Номер етапу, строки</b>	<b>Назва етапу згідно з техн. завданням</b>	<b>Заплановані результати</b>	<b>Отримані результати</b>
1. з <u>01.01.2018</u> по <u>31.12.2018</u>	Розробка технічного завдання. Оцінка технічних вимог до проектних параметрів міцності композиційних матеріалів та	Методичне забезпечення досліджень конструктивно-технологічних параметрів несучої здатності та температуростабільності силових платформ при транспортуванні, виводу на орбіту та експлуатації КА. Банк даних фізико-	Висвітлено стан проблеми розрахунків відповідальних елементів конструкцій за умов стаціонарних та нестаціонарних термосилових навантажень з врахуванням терморозміростабільності.. Проведено комплекс експериментальних досліджень

Номер етапу, строки	Назва етапу згідно з техн. завданням	Заплановані результати	Отримані результати
	<p>конструкторських характеристик термостабільних платформ малих космічних апаратів (КА). Розрахунково-теоретичні та експериментальні дослідження методів конструктивно-технологічного забезпечення несучої здатності та температурної стабільності силових платформ КА. Розробка методичного та інформаційного забезпечення.</p>	<p>механічних характеристик сучасних КМ при різних термосилових експлуатаційних навантаженнях. Методи та алгоритми досліджень міцності та надійності КМ і конструкцій. 2 публікації у міжнародних наукових журналах, 2 магістерські дисертації, 2 кандидатські дисертації.</p>	<p>композиційних матеріалів (КМ) в умовах статичного навантаження та визначення коефіцієнтів температурного розширення. Описані та проаналізовані результати досліджень, діаграми деформування армованих КМ з врахуванням анізотропії їх механічних властивостей. Проведено комплекс експериментальних досліджень нових КМ для визначення параметрів моделі пошкоджуваності та критерію руйнування, визначення та уточнення границь їх використання. Вперше розроблено та апробовано ефективні методи проектування терморозміростабільних силових платформ космічних апаратів на основі тестових комп'ютерних випробувань та порівняння з результатами експертних даних і натурних експериментів. 2 публікації у міжнародних наукових журналах, 2 магістерські дисертації, 2 кандидатські дисертації.</p>
<p>2. з <u>01.01.2019</u> по <u>31.12.2019</u></p>	<p>Розробка математичної моделі, методик та алгоритмів чисельного моделювання випробувань на стійкість та міцність до акустичних і вібраційних навантажень об'єктів обладнання силових платформ КА з урахуванням спектральної густини потужності спектру</p>	<p>Математична модель несучої платформи КА для чисельного моделювання випробувань на стійкість та міцність до акустичних і вібраційних навантажень. Робоча документація за методиками розрахунків, чисельна модель не-сучої платформи КА, розрахункові схеми, опис моделей пошкоджуваності КМ та результати досліджень міцності та ресурсу КМ силових платформ КА. 2 магістерські дисертації, 1 докторська дисертація. 4 публікації у міжнародних наукових журналах.</p>	<p>Розроблена математична модель несучої платформи КА для чисельного моделювання випробувань на стійкість та міцність до акустичних і вібраційних навантажень. Зроблена робоча документація за методиками розрахунків, отримано чисельна модель несучої платформи КА, розрахункові схеми, опис моделей пошкоджуваності КМ та результати досліджень міцності та ресурсу КМ силових платформ КА. Створено ефективний розрахунково-експериментальний метод проектування несучих елементів конструкцій, які виготовлені із КМ. 2 магістерські дисертації, 2 кандидатські дисертації, 4</p>

Номер етапу, строки	Назва етапу згідно з техн. завданням	Заплановані результати	Отримані результати
	прискорень ракетноносія. Моделі пошкоджуваності та критерій руйнування КМ силової платформи КА при експлуатаційних навантаженнях. Методики досліджень.		публікації у міжнародних наукових журналах.
З. з <u>01.01.2020</u> по <u>31.12.2020</u>	Розробка методичного забезпечення (методи, алгоритми, комп'ютерні тести) для оцінки терморозміростабільності силової платформи з КА за конструктивно допустимими показниками деформацій, напружень та надійності після впливу ударно-імпульсних навантажень, що виникають в системах відділення КА від ракетноносія та температурних градієнтів при його експлуатації. Впровадження розроблених методик, математичних моделей та рекомендацій в практику ДКБ «Південне». Остаточний звіт.	Результати експериментальної перевірки працездатності конструктивно-технологічних рішень для виготовлення силових платформ КА. Протоколи експериментальних досліджень дослідних зразків силових платформ ДКБ «Південне». Опис методичного забезпечення (методи, алгоритми, тести) для розрахунків жорсткості, міцності та надійності терморозміростабільних силових платформ КА під дією статичних та динамічних навантажень на протязі життєвого циклу виробів. Остаточний звіт. 4 публікації у наукових міжнародних журналах, 2 магістерські дисертації.	Отримані та проаналізовані результати експериментальної перевірки працездатності конструктивно-технологічних рішень для виготовлення силових платформ КА. Затверджено протоколи експериментальних досліджень дослідних зразків силових платформ ДКБ «Південне». Описано методичне забезпечення (методи, алгоритми, тести) для розрахунків жорсткості, міцності та надійності терморозміростабільних силових платформ КА під дією статичних та динамічних навантажень на протязі життєвого циклу виробів. 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. Завершено остаточний звіт. 4 публікації у наукових міжнародних журналах, 2 магістерські дисертації.

**3.2. Докладно розкрити одержані прикладні наукові результати щодо створення нового наукового знання або навести описи технологій, конструкторської, технологічної та програмної документації, дослідних зразків, положень, регламентів, стандартів, проектів нормативно-правових і методичних документів, що були створені, змінені та/або доповнені авторами у процесі виконання дослідження або 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. Дана математична постановка задач термомеханіки для визначення термопружного стану сотопанелі в умовах термічного навантаження на навколосемній орбіті з урахуванням гіпотез про процеси теплопереносу для технічних систем в умовах космічного простору на навколосемній орбіті.

Наведено опис розробленої скінченно-елементної моделі для дослідження функціональної надійності сотопанелі силової платформи при моделюванні силових навантажень в системах відділення КА від ракетноносія та температурних градієнтів при його експлуатації на навколосемній орбіті.

Описано результати віртуальних випробовувань в середовищі системи скінченно-елементного аналізу ANSYS 12.1 параметрів терморозміростабільності типової конструкції сотопанелі для чотирьох розрахункових варіантів термосилового навантаження в умовах навколосемної орбіті за конструктивно допустимими показниками деформацій, напружень.

Розроблені алгоритми для математичного моделювання гармонічних та вібраційних коливань силової платформи сотопанелі КА для моделювання силових навантажень в системах її відділення від ракетноносія наведено у кодах команд системи інженерного аналізу ANSYS APDL. Представлено результати апробації методичного забезпечення (методи, алгоритми, комп'ютерні тести) для оцінки функціональної надійності сотопанелі силової платформи з КА за конструктивно допустимими показниками амплітуд напружень після впливу вібраційних навантажень, що виникають в системах відділення КА від ракетноносія.

Розроблена динамічна імітаційна модель конструкції панелі СКА з описом топології пористих структур, схем армування багат шарових композиційних матеріалів з вуглепластикових стрічок, може бути ефективно застосована для оцінки несучої здатності конструкцій даного типу при перевантаженні з урахуванням гармонічних та випадкових вібрацій на етапі виведення і визначенні параметрів терморозміростабільності для умов експлуатації на навколосемній орбіті.

**3.3. Визначити, які із результатів і як само були науково обґрунтовані та доведені, як вони пов'язані із закономірностями організації та розвитку природи, суспільства людини, їх взаємозв'язків (і якими саме); які результати розробки було створено виключно на основі узагальнення практичного досвіду і не вимагали науково-технологічних досліджень:** Результати наукових досліджень базуються на розрахунково-теоретичних та нових експериментальних результатах по визначенню закономірностей кінетики накопичення пошкоджень в КМ з врахуванням основних параметрів термосилового навантаження.

Нові методики, розроблені авторами проекту, базуються на фундаментальних наукових результатах, які отримані на сьогодні методами фізики твердого тіла про взаємозв'язок фізико-механічних макрохарактеристик конструкційних матеріалів та накопичення мікропошкоджень у вигляді мікропор та мікротріщин. Цей факт є основою для формування та обґрунтування феноменологічних моделей розсіяного руйнування в МТДТ (як найбільш практичних в інженерних розрахунках). Новий та обґрунтований тензор пошкоджуваності, введений в систему рівнянь термопружнов'язкості із застосуванням сучасних інформаційних технологій, систем та створених засобів, є основою методу уточнення прогнозування та діагностики ресурсу експлуатації відповідальних елементів виробів нової техніки.

**3.4. Довести наукову і науково-прикладну новизну результатів дослідження або розробки на основі їх змістовного порівняння із існуючими аналогами у світовій науці, техніці і технологіях на основі посилань на конкретні публікації. Список цих**

**публікацій навести у Додатку 1 до цього Анотованого звіту. Довести переваги отриманих науково-прикладних результатів над аналогами, суміжними науково-прикладними напрацюваннями світової спільноти вчених, конструкторів, технологів, програмістів:** Наукова новизна роботи полягає в наступному:

- вперше побудована та обґрунтована узагальнена феноменологічна модель, яка описує кінетику накопичення розсіяних руйнувань в КМ на мікро та мезорівнях з врахуванням параметрів анізотропії, статичного та мало- та багатоциклового стаціонарного і стохастичного експлуатаційного навантажень;
- обґрунтовано енергетичні критерії руйнування анізотропного КМ на стадії зародження макротріщини з врахуванням двох механізмів руйнування: відрив та зріз;
- вперше сформовано та обґрунтовано тензор параметрів пошкоджуваності і показані його інваріанти, а також конкретизовано методику їх знаходження;
- розроблено та обґрунтовано ефективні методики визначення коефіцієнтів концентрації напружень в шаруватих композиційних матеріалах з врахуванням контактних взаємодій кріпильних елементів;
- розроблено комплексний розрахунково-експериментальний метод прогнозування ресурсу елементів конструкцій із КМ, який враховує пошкоджуваність та нестаціонарність експлуатаційного навантаження, а також розроблено відповідне програмне забезпечення.

Достовірність методу показана на базі розв'язання ряду актуальних в науковому та прикладному аспектах інженерних задач для ефективного проектування температуростабільних силових платформ космічних апаратів.

**3.5. Обґрунтувати цінність очікуваних результатів для світової та вітчизняної науки, техніки і технологій:** 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.

#### **4. ПРАКТИЧНА ЦІННІСТЬ ДЛЯ СУПІЛЬСТВА ТА ЕКОНОМІКИ (до 100 рядків)**

**4.1. Визначити та обґрунтувати використання очікуваних результатів для конкретної галузі, потреб розвитку науково-технологічної сфери, вирішення світових проблем; довести відповідність потребам суспільства та економіки країни. Навести у Додатку 2 до цього Анотованого звіту результати проведених маркетингових досліджень щодо просування науково-прикладних результатів на світовий ринок, визначити потенційних замовників, навести у Додатку 3 до цього Анотованого звіту перелік реальних майбутніх користувачів, з якими вже встановлено попередні договірні стосунки:** 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.. 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. (Акт впровадження результатів НДР від ДП «КБ «Південне» імені М.К. Янгеля» від 07.12.2020р. в рамках комплексної угоди про науково-технічне співробітництво в галузі створення ракетно-космічної техніки №15/1-НТС від 23.09.2015 р. )

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.).

Колектив авторів в період з 1998 по 2019 р. проводив НДР по експериментальному дослідженню та імітаційному комп'ютерному моделюванні систем ракетноносія «Циклон-4» та супроводжував проектування і аналіз несучої спроможності мікросупутника КПП ім. Ігоря Сікорського «POLITAN-2» , а також провів комплекс досліджень по визначенню НДС в зонах функціональних отворів крила ЛА (літального апарату).



**4.2. Довести цінність результатів для підготовки фахівців у системі освіти, зокрема фахівців вищої кваліфікації. Відокремити використання очікуваних результатів від науково-методичних завдань, що виконуються викладачами у межах їх основної педагогічної діяльності. Навести у Додатку 4 до цього Анотованого звіту теми досліджень магістрантів (студентів), аспірантів і докторантів, кількість місяців їх роботи за темою з оплатою:** По результатах виконання роботи 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.

Підготовлено до захисту кандидатські дисертації: Бабак Антон Миколайович на тему: «Малоциклова втома поверхнево зміцнених конструктивних елементів з врахуванням пошкоджуваності». (Захист 1кв. 2021р.); Бондарець Олександр Анатолійович на тему: «Моделювання кінетики накопичення розсіяних пошкоджень в анізотропних конструкційних матеріалах при пружнопластичному деформуванні» (Захист 1кв. 2021р.).

## 5. ОСНОВНІ ПОКАЗНИКИ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРОБКИ

*(зазначати виключно доробок, серед авторів яких 50% і більше належать до колективу виконавців, визначеного у Таблиці 11. Оцінюючи наукові праці на відповідність меті, предмету та завданням дослідження або розробки, експерт має право не зараховувати їх у разі повної невідповідності)*

**5.1. Перелік опублікованих статей в журналах, що індексуються у наукометричній базі Scopus та/або Web of Science Core Collection (WoS) (або Index Copernicus для суспільних та гуманітарних наук) відповідно до таблиці 2 (окремо за кожною наукометричною базою):**

Таблиця 2

№	Повні дані про статті з веб-адресою електронної версії; <u>підкреслити прізвища авторів, зазначених у списку виконавців</u>	Наукометр. база даних
1	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	SCOPUS
2	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. <a href="https://link.springer.com/article/10.1007/s11223%2D018%2D9989%2D2">https://link.springer.com/article/10.1007/s11223%2D018%2D9989%2D2</a>	SCOPUS
3	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. <a href="https://www.springerprofessional.de/en/analysis%2Dof%2Dharmonic%2Dvibration%2Dcharacteristics%2Dfor%2Da%2Dcomposite%2Dh/16224412">https://www.springerprofessional.de/en/analysis%2Dof%2Dharmonic%2Dvibration%2Dcharacteristics%2Dfor%2Da%2Dcomposite%2Dh/16224412</a>	SCOPUS
4	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. <a href="https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.06.055">https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.06.055</a>	SCOPUS

№	Повні дані про статті з веб-адресою електронної версії; <b>підкреслити</b> <b>прізвища авторів</b> , зазначених у списку виконавців	Наукометр. база даних
5	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., <a href="https://www.springer.com/journal/11223">https://www.springer.com/journal/11223</a>	SCOPUS

**5.2. Перелік опублікованих за темою англomовних статей та тез доповідей у матеріалах міжнародних конференцій, що індексуються у наукометричній базі Scopus або WoS (або Index Copernicus для суспільних та гуманітарних наук) відповідно до таблиці 3 (окремо за кожною наукометричною базою):**

Таблиця 3

№	Повні дані про статті та тези доповідей з веб-адресою електронної версії; <b>підкреслити</b> <b>прізвища авторів</b> , які належать до списку виконавців	Наукометр. база даних
1	Маслей В.Н., Крищук Н.Г., Цыбенко А.С. Анализ характеристик гармонических колебаний композитной сотовой панели сканера космического аппарата // Проблемы прочности, 2018, №4, с. 1-11	SCOPUS
2	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. <a href="https://link.springer.com/article/10.1007/s11223%2D018%2D9989%2D2">https://link.springer.com/article/10.1007/s11223%2D018%2D9989%2D2</a>	SCOPUS
3	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. <a href="https://www.springerprofessional.de/en/analysis%2Dof%2Dharmonic%2Dvibration%2Dcharacteristics%2Dfor%2Da%2Dcomposite%2Dh/16224412">https://www.springerprofessional.de/en/analysis%2Dof%2Dharmonic%2Dvibration%2Dcharacteristics%2Dfor%2Da%2Dcomposite%2Dh/16224412</a>	SCOPUS
4	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. <a href="https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.06.055">https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.06.055</a>	SCOPUS
5	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., <a href="https://www.springer.com/journal/11223">https://www.springer.com/journal/11223</a>	SCOPUS

**5.3. Перелік опублікованих за темою статей у виданнях, що входять до переліку фахових видань України, а також статей у закордонних журналах, які не увійшли до п.5.1 і 5.2:**

Таблиця 4

№	Повні дані про статті з веб-адресою електронної версії; <b>підкреслити</b> <b>прізвища авторів</b> , зазначених у до списку виконавців
1	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
2	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 p., №1 (82). - с. 131-138 Copernicus
3	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.

№	<b>Повні дані про статті з веб-адресою електронної версії; підкреслити прізвища авторів, зазначених у до списку виконавців</b>
	<a href="https://www.vcsi1.eu/medfract/pdf/Flyer_Athens%202020.pdf">https://www.vcsi1.eu/medfract/pdf/Flyer_Athens%202020.pdf</a>
4	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
5	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: <a href="https://doi.org/10.20535/2521%2D1943.2019.86.181036">https://doi.org/10.20535/2521%2D1943.2019.86.181036</a> , Copernicus, Категорія «В»
6	О. А. Bondarets ., А. Р. Hrabovskyi, I. I. Babiienko , Модель пошкоджуваності для розрахунку руйнування конструкційних матеріалів // Mechanics and Advanced Technologies Том 87, № 3, 2019. Copernicus, Категорія «В».
7	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.
8	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: <a href="https://doi.org/10.26642/tn%2D2018%2D1">https://doi.org/10.26642/tn%2D2018%2D1</a> (81)-54-62
9	Зилинский А.И., Луговойской А.Ф., Крищук 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: <a href="https://doi.org/10.20535/2521%2D1943.2020.88.201335">https://doi.org/10.20535/2521%2D1943.2020.88.201335</a>
10	Крищук 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 - <a href="https://doi.org/10.20535/2521%2D1943.2019.85.156494">https://doi.org/10.20535/2521%2D1943.2019.85.156494</a> ; Наукометричні БД: Copernik; Мова публікації: західноєвропейська, Категорія «В»
11	Крищук М.Г., Маслей В.М., Шукаев С.М., Лавендел Ю.О. Оцінка розмірної стійкості композитної сотової панелі для умов терсилового навантаження на навколоразетній орбіті. // Mechanics and Advanced Technologies, 2019, том 85, №3 , 5 стр. Наукометричні БД: Copernik; Мова публікації: західноєвропейська., Категорія «В»
12	Лазарев І.А., Страфун О.С., Крищук М.Г., Скибан М.В., Максимішин О.М. Математичне визначення механічних властивостей капсули ліктьового суглобу при його згинально-розгинальній контрактурі // Вісник ортопедії, травматології та протезування , 2018, №2, с.13-18
13	Маслей В.М., Крищук М.Г., Цибенко 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 - <a href="http://journal.mmi.kpi.ua/article/view/124310">http://journal.mmi.kpi.ua/article/view/124310</a> ; DOI - <a href="https://dx.doi.org/https://doi.org/10.20535/2521%2D1943.2018.82.124310">https://dx.doi.org/https://doi.org/10.20535/2521%2D1943.2018.82.124310</a> ; БД: Copernicus
14	Рудаков К.М. Визначення коефіцієнта концентрації напружень у послабленому отвором перерізі композитної пластини, 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.
15	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 - <a href="https://dx.doi.org/https://doi.org/10.20535/2521%2D1943.2018.84.149780">https://dx.doi.org/https://doi.org/10.20535/2521%2D1943.2018.84.149780</a> , Copernicus, Категорія «В»

№	<b>Повні дані про статті з веб-адресою електронної версії; підкреслити прізвища авторів, зазначених у до списку виконавців</b>
16	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»
17	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.
18	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
19	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
20	Тимошенко О.В., Коваль В.В., Бабак А.М., Фам Дик Куан Повреждаемость металлических материалов с учетом повреждаемости // Науковий журнал «Технічні науки та технології», №2, (12) 2018, с. 49-58 Copernicus
21	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

#### 5.4. Перелік опублікованих монографій відповідно до таблиці 5: -

#### 5.5. Перелік опублікованих підручників, навчальних посібників, словників, довідників відповідно до таблиці 6:

Таблиця 6

№	<b>Повні дані про підручники, навчальні посібники, словники, довідники; підкреслити прізвища авторів, зазначених у списку виконавців</b>
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 I. 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

№	<b>Повні дані про підручники, навчальні посібники, словники, довідники; підкреслити прізвища авторів, зазначених у списку виконавців</b>
	машин» за спеціальністю 131 «Прикладна механіка» галузі знань «Механічна інженерія», Київ, «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2020, 90с

**5.6. Перелік отриманих охоронних документів на об'єкти права інтелектуальної власності України або інших країн (патенти, свідоцтва на право автора на твір) відповідно до таблиці 7:**

Таблиця 7

№	<b>Повні дані про охоронні документи; підкреслити прізвища авторів, зазначених у списку виконавців</b>
1	-

**5.7. Створено та передано для використання поза межами організації-виконавця методик, технологій, зразків, проектної і конструкторської документації; інформаційно-аналітичні матеріали, рекомендації, пропозиції до органів влади тощо, зокрема на основі укладеного договору на науково-технічну продукцію, що підтверджується довідкою від бухгалтерії закладу вищої освіти (наукової установи) із зазначенням обсягів фінансування виконаних робіт відповідно до таблиці 8: -**

**5.8. Перелік захищених дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора наук та кандидата наук відповідно до таблиці 9:**

Таблиця 9

№	<b>Інформація про дисертацію</b>
1	Кандидатська дисертація на тему: «Малоциклова втома елементів конструкцій з урахуванням пошкоджуваності», Коваль В.В., 05.02.09 – Динаміка та міцність машин, наук. керівник Бобир М.І., 2018р.
2	Кандидатська дисертація на тему: «Критерій граничного стану конструкційних матеріалів з врахуванням пошкоджуваності», Фам Д.К., 01.02.04 – Механіка деформівного твердого тіла, наук. керівник Бобир М.І., 2019р.
3	Кандидатська дисертація на тему: "Міцність композиційних терморозміростабільних силових конструкцій космічних апаратів при динамічному навантаженні", Маслей В.М. за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин, наук. керівник Рудаков К.М. 2018р.
4	Кандидатська дисертація на тему: "Напружено-деформований стан і міцність однозрізних болтових з'єднань елементів конструкцій з композиційних матеріалів", Дифучин Ю.М., за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин, наук. керівник Рудаков К.М. 2019р.

**5.9. Кількість грантів, за якими працювали виконавці дослідження або розробки, що фінансувались закордонними організаціями (з відповідним підтвердженням від закладу вищої освіти (наукової установи), посиланням на сайт грантового проекту або офіційним листом від грантодавця) відповідно до таблиці 10:**

Таблиця 10

№	<b>ПІБ виконавців</b>	<b>Назва дослідження за грантом</b>	<b>Фінансування, тис. гривень</b>
1	Мусієнко Ольга Станіславівна	проект "NTNU-KPI Collaboration within Industry 4.0 Education" програми Eurasia	40

**6. ВИКОНАВЦІ ДОСЛІДЖЕННЯ АБО РОЗРОБКИ** (з оплатою в межах дослідження)

- доктори наук: 3, кандидати наук: 3;

- молоді вчені до 35 років: 3, з них кандидатів: 1, докторів: 0, докторантів: 0;

аспірантів: 1

- наукові працівники без ступеня: 1;

- інженерно-технічні кадри: 1, допоміжний персонал: 0; студенти: 4.

Р а з о м : 13.

Таблиця 11

**Виконавці дослідження або розробки** (з оплатою в межах дослідження або розробки)

№	Прізвище, ім'я, по батькові	Науковий ступінь	Вчене звання	Посада і місце основної роботи	Вік
1	Бобир Микола Іванович	д-р техн. наук	проф.	директор Механіко-машинобудівного інституту . Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»	70
2	Коваль Віктор Вікторович	д-р техн. наук	без звання	молодший науковий співробітник. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»	38
3	Тимошенко Олександр Вікторович	канд. техн. наук	доц.	науковий співробітник . Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»	49
4	Кришук Микола Георгійович	д-р техн. наук	проф.	професор кафедри ДММ та ОМ ММІ КПП ім. Ігоря Сікорського. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»	65
5	Рудаков Константин Миколайович	д-р техн. наук	проф.	професор кафедри ДММ та ОМ ММІ КПП ім. Ігоря Сікорського. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»	70

**Рішення вченої (наукової, науково-технічної) ради** від "15" лютого 2021р., протокол № 2 щодо завершення дослідження або розробки

**Керівник дослідження або розробки**

Бобир М. І.

**Проректор з наукової роботи**

Віталій ПАСІЧНИК  
(ініціали, прізвище)

МП

**Додаток 1.** Список основних публікацій закордонних та вітчизняних вчених, на які посилаються автори для доведення наукової новизни власних результатів

№	Повні дані про статті
1	R.M. Guedes Creep and fatigue lifetime prediction of polymer matrix composites based on simple cumulative damage laws// Journ. Composites: Part A.,39, 2008, P. 1716-1725
2	Shokrieh M. M. a I Kamali S. M. Theoretical and experimental studies On residual stresses in aminated polymer composites // J. Comp. Mater. - 2005. I 39, No. 24. - P. 2213 - 2225.

№	Повні дані про статті
3	Кучер Н.К., Заразовский М.Н. Прогнозирование несущей способности слоистых армированных композитов криогенного и аэрокосмического назначения // Пробл. прочности. -2008, №2. -С. 11-25
4	В. Е. Гайдачук, А. В. Кондратьев, М. Е. Харченко Анализ степени и характера изменения терморазмеростабильности структуры полимерного композита после ее карбонизации // Авиационно-космическая техника и технология, 2014, № 3 (110), стр. 4-7.
5	Lemaitre J. Engineering Damage Mechan Ductile, Creep, Fatigue and Brittle Failures / J. Lemaitre, R. Desmorat. - Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. - 372 с.
6	Корпус сканера высокой разрешающей способности "Корпус-СВРЗ". [Текст]: Эскизный проект. Пояснительная записка. Основные характеристики корпуса сканера высокой разрешающей способности. "Корпус-СВРЗ" ПЗ. - ГП "КБ "Южное им. М. К. Янгеля", 2009. - 103 с.
7	Jing Zhanga, Jason Rowlandb, Damage modeling of carbon-fiber reinforced polymer composite pin-joints at extreme temperatures. Composite Structures. Volume 94, Issue 8, July 2012, Pages 2314-2325.
8	Karol Pietrak, Tomasz S. Wisniewski A review of models for effective thermal conductivity of composite materials/ Journal of Power Technologies 95 (1) (2015) 14-24
9	Santiuste, Carlos. Modelling thermal effects in machining of carbon fiber reinforced polymer composites. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 33 (2014) 8-April, pp. 758-766.
10	Sukanta Das, Naresh Reddy, Dr. Ganga dharan Raju. Damage Evolution Studies in Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites using Active and Passive Thermography / NDE2015, Hyderabad November 26-28, 2015.
11	Klaus Friedrich, Ulf Breuer . Multifunctionality of Polymer Composites: Challenges and New Solutions/ 1st Edition/ ISBN: 978-0-323-26434-1/ PAGES: с. 964/ May 2015.
12	Кондратов А.В., Харченко М.Е. Терморазмеростабильность корпуса сканера высокой разрешающей способности космического аппарата из трёхслойных панелей с углепластиком // Авиационно-космическая техника и технология, 2014, №1, с. 99-103.
13	P. Sanoj and Balasubramanian Kandasubramanian. Hybrid Carbon-Carbon Ablative Composites for Thermal Protection in Aerospace/ Volume 2014 (2014), Article ID 825607, 15 pages.

**Додаток 2. Список потенційних замовників:**

№	Реквізити замовників, з якими велися переговори	Документи, якими зафіксовано переговори
1	ДП «Антонов»	угода про співпрацю між КПП ім. Ігоря Сікорського та ДП «Антонов» (№12.2490.2019 від 18.07.2019 р.)
2	ДП «КБ «Південне»	угода про співпрацю між КПП ім. Ігоря Сікорського та ДП «КБ «Південне» (№15/1-НТС від 23.09.2015 р.)

**Додаток 3.** Список реальних замовників:

№	Реквізити замовників, з якими укладено договори щодо передачі результатів розробки або документи, що підтверджують їх використання замовником	Документи, якими зафіксовано використання результатів
1	ДП «КБ «Південне»	Акт впровадження результатів НДР від ДП «КБ «Південне» імені М.К. Янгеля» від 07.12.2020р. в рамках угоди про співпрацю між КПП ім. Ігоря Сікорського та ДП «КБ «Південне» (№15/1-НТС від 23.09.2015 р.)

**Додаток 4.** Дані про магістрантів (студентів), аспірантів і докторантів, які працювали за темою з оплатою праці

№ з/п	ПІБ	Статус	Назва досліджень	Кількість місяців роботи з оплатою
1	Савчук Є. В.	Студент	Визначення концентрації напружень в композитних пластинах з отвором	8
2	Саймбетов Р.Д.	Студент	Оцінювання довговічності конструкцій в умовах малоциклового багатовісного непропорційного навантажування	8
3	Кутузов О. В	Студент	Анізотропія механічних властивостей вуглепластикових композиційних матеріалів	8
4	Романюк А. В.	Студент	Методичне та інформаційне забезпечення для розрахунково-теоретичних досліджень конструктивно-технологічного забезпечення несучої здатності	4
5	Мусієнко О.С.	Аспірант	Термомеханічні параметри армуючих волокон та матриці	7

**Додаток 5.** Анотації українською мовою статей у журналах, що входять у наукометричні бази Scopus та/або Web of Science Core Collection (WoS) (або Index Copernicus для суспільних та гуманітарних наук) і представляють результати дослідження або розробки

№ статті у Таблиці 2	Анотації
1	За даними імітаційного моделювання гармонічних коливань композитної сотопанелі сканера космічного апарату з встановленим технологічним обладнанням (сканер, оптичні прилади, магнітометр) отримані розподіли по координатам і частоті величини амплітуд переміщень, прискорень, коефіцієнтів посилення віброприскорень, а також еквівалентних по Мізесу напружень. Динамічна імітаційна модель композитної сотопанелі розроблена за допомогою сучасних засобів скінчено-елементного аналізу в пакеті Ansys. Утворюють Сотопанелі углепластикові композитні пластини зі стільниковим заповнювачем з алюмінієвої фольги у вигляді регулярних шестигранних осередків правильної форми апроксимовані багаточастотними пластинчастими кінцевими елементами. Технологічне обладнання - оптичні прилади, сканер і магнітометр - представлені в моделі зосередженими масами, жорстко пов'язаними з панеллю. З використанням розробленої імітаційної моделі визначено спектр власних частот і власних форм



№ статті у Таблиці 2	Анотації
	вільних коливань сотопанелі сканера. В інтервалі робочих частот досліджувального режиму гармонійних коливань сотопанелі сканера встановлені резонансні амплітуди переміщень, прискорень, коефіцієнтів посилення амплітуд віброприскорень, а також розподілу амплітуд еквівалентних по Мізесу напружень.
2	У роботі розглянуто одну з найважливіших проблем машинобудівного та авіабудівного комплексу, яка пов'язана з визначенням довговічності деталей та конструкцій, що працюють в умовах дії циклічного навантаження. Крім того, наявність місцевих конструкційних та технологічних концентраторів напружень суттєво ускладнює визначення прогнозованого ресурсу на стадії проектування деталей та конструкцій. Задля зміцнення деталей з отворами використовують метод дорнування, а саме метод пластичного деформування стінок отвору з метою створення на їх поверхні величини залишкової пластичної деформації. Таким чином, в роботі представлені результати випробувань на малоциклову втому при віддільному розтязі плоских лабораторних зразків, виготовлених з авіаційного алюмінієвого сплаву Д16ЧТ з центральним технологічним отвором циліндричної форми, який зміцнений дорнуванням. Для цього були розраховані геометричні параметри дорна, що забезпечують необхідне значення рівня залишкової пластичної деформації на поверхні отвору - 1%, 2% та 3%.
3	В цій роботі а даними імітаційного моделювання гармонічних коливань композитної сотопанелі сканера космічного апарату з встановленим технологічним обладнанням (сканер, оптичні прилади, магнітометр) отримані розподіли по координатам і частоті величини амплітуд переміщень, прискорень, коефіцієнтів посилення віброприскорень, а також еквівалентних по Мізесу напружень. Динамічна імітаційна модель композитної сотопанелі розроблена за допомогою сучасних засобів скінчено-елементного аналізу в пакеті Ansys. Утворюють Сотопанелі углепластикові композитні пластини зі стільниковим заповнювачем з алюмінієвої фольги у вигляді регулярних шестигранних осередків правильної форми апроксимовані багат шаровими пластинчастими кінцевими елементами. Технологічне обладнання - оптичні прилади, сканер і магнітометр - представлені в моделі зосередженими масами, жорстко пов'язаними з панеллю. З використанням розробленої імітаційної моделі визначено спектр власних частот і власних форм вільних коливань сотопанелі сканера. В інтервалі робочих частот досліджувального режиму гармонійних коливань сотопанелі сканера встановлені резонансні амплітуди переміщень, прискорень, коефіцієнтів посилення амплітуд віброприскорень, а також розподілу амплітуд еквівалентних по Мізесу напружень.
4	У цій роботі представлений простий напіваналітичний підхід для вільної вібрації циліндричної оболонки з початковим попереднім напруженням на основі методу еквівалентного навантаження та теорії Донелла-Муштарі. У більшості практичних застосувань снаряди піддаються статичним навантаженням, що викликають внутрішнє поле напружень. Наявність таких початкових сил, як внутрішній тиск, осьова сила, доцентрова сила та крутний момент, істотно впливає на природні частотні спектри. Відповідно до методу еквівалентного навантаження Калладіна початкове поле напруження створює додаткові кривизни і може бути додано як додаткові умови до основних рівнянь. Результати представленого методу добре узгоджуються з експериментальними даними, знайденими в літературі. Досліджено вплив жорсткості опорної пружності, довжини оболонки та радіуса до співвідношення товщини на власні частоти.
5	В роботі проведено аналіз основних критеріїв граничного стану конструкційних матеріалів на стадії зародження макротріщини, які базуються на основних положеннях термодинаміки незворотних процесів в континуальній механіці пошкоджуваності. Встановлено межі їх застосування для випадку складного напруженого стану. Представлена модель накопичення розсіяних пошкоджень в

№ статті у Таблиці 2	Анотації
	<p>залежності від рівня незворотної деформації, встановлені залежності параметрів моделі кінетики накопичення пошкоджуваності та граничного значення величини пошкоджуваності від пружно-пластичних характеристик матеріалу в умові чистого розтягу. Показані порівняння кінетики накопичення пошкоджуваності відповідно до представленої моделі по відношенню до експериментальним значенням для ряду конструкційних матеріалів. Описана методика проведення базового експерименту з використанням циліндричних суцільних зразків, враховуючи нерівномірність розподілу деформації вздовж радіуса зразка. Проведено порівняння результатів накопичення пошкоджуваності механізмом руйнування при зсуві, отриманих згідно з розробленою методикою відносно експериментальних результатів випробування тонкостінних зразків. Показано, що значення параметра пошкоджуваності істотно залежить від виду напруженого стану. На основі підходу Давиденкова-Фрідмана, що враховує два механізми руйнування (відрив та зсув), з використанням параметра виду напруженого стану Надаї-Лоде, запропоновано й обґрунтовано узагальнений феноменологічний критерій граничного стану.</p>

**Додаток 7.** Анотації захищених виконавцями дослідження або розробки дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора наук та кандидата наук, що наведені у Таблиці 9

№	Назви дисертацій та їх анотації
1	<p>Кандидатська дисертація на тему: «Малоциклова втома елементів конструкцій з урахуванням пошкоджуваності», Коваль В.В., 05.02.09 – Динаміка та міцність машин, наук. керівник Бобир М.І., 2018р.</p> <p>Дисертаційна робота присвячена розробці методу оцінки довговічності елементів конструкцій у випадку малоциклового навантаження з урахуванням пошкоджуваності. Параметр пошкоджуваності в роботі визначався за допомогою оцінки зміни питомого електроопору зразка (у випадку статичного навантаження) та за допомогою аналізу зміни модуля пружності (для випадку циклічного навантаження).</p>
2	<p>Кандидатська дисертація на тему: «Критерій граничного стану конструкційних матеріалів з врахуванням пошкоджуваності», Фам Д.К., 01.02.04 – Механіка деформівного твердого тіла, наук. керівник Бобир М.І., 2019р.</p> <p>Дисертаційна робота присвячена розробці критерія граничного стану конструкційних матеріалів, які працюють в умовах складного напруженого стану у випадку статичного навантаження з урахуванням пошкоджуваності. В даній роботі для визначення величини параметра пошкоджуваності використовувалися різні енергетичні підходи, які базуються на зміні фізико-механічних характеристик матеріалів при простих навантаженнях (розтяг та кручення). На основі отриманих експериментальних результатів різних конструкційних матеріалів, модернізовано модель опису кінетики накопичення пошкодження запропонований Бонора в залежності від рівня пластичної деформації. Отримано залежність параметрів моделі та критерія від пружно-пластичних характеристик матеріала. Проведено порівняння отриманих теоретичних значень з експериментальними. Розроблена методика отримання кінетики накопичення пошкодження у випадку кручення циліндричних зразків з врахуванням неоднорідності розподілу деформації в перерізі зразка. На основі підходу Давіденко-Фрідмана враховуючи два механізми руйнування (відрив та зріз) розроблено критерій граничного стану конструкційних матеріалів з врахуванням виду напруженого стану та пошкоджуваність. Представлено порівняння результатів граничного стану отриманих за представленим критерієм, експериментальними даними, та іншими методами.</p>
3	<p>Кандидатська дисертація на тему: "Міцність композиційних терморозміростабільних силових конструкцій космічних апаратів при динамічному навантаженні", Маслей В.М. за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин, наук. керівник Рудаков К.М. 2018р.</p> <p>Дисертаційна робота присвячена науковому обґрунтуванню та розробці методів створення</p>

№	Назви дисертацій та їх анотації
	терморозміростабільних (ТРС) силових конструкції космічних апаратів (КА) і оптичних сканерів високої роздільної здатності (СВРЗ) для КА дистанційного зондування Землі, із заданими технічними характеристиками, в частині забезпе-чення їх достатньої розмірної стабільності (РС, жорсткості) та міцності при мінімальній вазі, в умовах динамічного навантаження. Проблему отримання ТРС силових конструкції КА і оптичних СВРЗ вирішили застосуванням оболонок та пластин із композиційних матеріалів зі спеціально підбраною структурою. Створені конструкції перевірені розрахунками та натурними випробуваннями. Із застосуванням МСЕ визначені характеристики напружено-деформованого стану та проведена оцінка міцності панелі корпусу блока корисного навантаження КА "Січ-2М" при навантаженнях, виникаючих при запуску на орбіту КА (прискорення, гармонійна та випадкова вібрація). Проведено впровадження в ДП "КБ "Південне" ім. М.К. Янгеля", створені керівні документи.
4	Кандидатська дисертація на тему: "Напружено-деформований стан і міцність однозрізних болтових з'єднань елементів конструкцій з композиційних матеріалів" , Дифучин Ю.М., за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин, наук. керівник Рудаков К.М. 2019р. Дисертація присвячена науковому обґрунтуванню модифікацій у методах розрахунків на статичну міцність однозрізних болтових з'єднань (БЗ) елементів конструкцій з шаруватими полімерно-композиційними матеріалами (ПКМ). Основою для обґрунтувань виступають чисельні розрахунки характеристик напружено-деформованого стану методом скінченних елементів. Розроблено алгоритм створення ефективних скінченно-елементних моделей для розрахунків БЗ із ПКМ з урахуванням впливових факторів: структури ПКМ, величини зазорів болт/отвір, контактної взаємодії елементів, тертя між ними. Алгоритм застосовано для побудови моделі зразка однозрізного дворядного БЗ з ПКМ, який використовується для випробувань на утому з варіюванням таких параметрів, як зазор болт/отвір та структура ПКМ. Застосувалися змішані моделі для ПКМ: пошарова в зонах отворів, а удалині – за теорією "ефективного модуля". Виявлена спадна залежність відносної величини площі контакту в отворах від збільшення зазору болт/отвір. Запропоновано алгоритм обчислення величин зусиль у перетинах болтів з урахуванням тертя в БЗ через долю від повного навантаження. Виявлені значні впливи структури ПКМ та величини зазору болт/отвір на величини напружень, коефіцієнтів вигину та концентрації напружень у БЗ, у зв'язку з чим запропоновані модифікації в критеріях статичної міцності однозрізних БЗ із ПКМ.

**Додаток 8.** Короткий зміст (анотації) досліджень за грантами, що наведені у Таблиці 10

№	Назви досліджень за грантом та їх анотації
1	проект "NTNU-KPI Collaboration within Industry 4.0 Education" програми Eurasia -

**Керівник дослідження або  
розробки**

МП

Бобир М. І.  
(ініціали, прізвище)