

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-357-66>

УДК 620.22:621.396.67:615.47:519.6

СВЕРСТЮК АНДРІЙ

Тернопільський національний технічний університет імені І. Пулюя,
Тернопільський національний медичний університет імені І.Я. Горбачевського
<https://orcid.org/0000-0001-8644-0776>

e-mail: sverstyuk@tdmu.edu.ua**МОСІЙ ЛЮБОМИР**

Тернопільський національний технічний університет імені І. Пулюя
<https://orcid.org/0009-0000-9778-331X>

e-mail: mosiy@gmail.com**РЕМЕЗ АНДРІЙ**

Тернопільський національний технічний університет імені І. Пулюя
<https://orcid.org/0009-0005-4846-4650>

e-mail: Filvasoxz@gmail.com**МАРКОВСЬКИЙ ВОЛОДИМИР**

Тернопільський національний технічний університет імені І. Пулюя
<https://orcid.org/0009-0007-9314-8619>

e-mail: mr.volmark@gmail.com

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ЖОРСТКОСТІ АРМОВАНИХ КОМПОЗИТИВ В РАДІОТЕХНІЦІ ТА МЕДИЦИНІ

У статті представлено комплексне дослідження армованих композитних матеріалів для відбиваючих решіток та біомедичних застосувань, що поєднує бібліометричний аналіз наукових тенденцій та математичне моделювання напружено-деформованого стану антенних конструкцій. На основі аналізу 652 публікацій у базі Scopus за 10-річний період виявлено стабільне зростання дослідницької активності з піком у 2024 році (114 публікацій). Географічний розподіл демонструє лідерство Китаю (32,5%) та США (21,1%). Застосований бібліометричний підхід підтвердив універсальність статистичних методів для міждисциплінарних досліджень. Розроблено математичну модель температурного впливу на параболічну оболонку дзеркала антени з урахуванням анізотропних властивостей композитних матеріалів. Порівняльний аналіз матеріалів показав оптимальність міді для максимальної ефективності відбиття, алюмінію – для легких конструкцій, композитів з CNT та GPL – для структурно-оптимізованих рішень. Визначено високий потенціал композитних матеріалів з вуглецевими нанотрубками та графеновими пластинками для створення біомедичних електродів з підвищеним співвідношенням сигнал/шум (до 40 дБ) для електрокардіографічного моніторингу. Найперспективнішою технологією визначено електродугове напilenня. Результати чисельного моделювання підтвердили критичний вплив температурних градієнтів на геометричну стабільність відбиваючих поверхонь. Дослідження виявило синергійний потенціал між технологіями виготовлення антенних решіток та біомедичних електродів, що відкриває перспективи для розробки багатофункціональних композитних систем. Дослідження створює науково-методологічну основу для розробки термостабільних антенних систем у аерокосмічній, енергетичній та медичній галузях.

Ключові слова: відбиваючі решітки, армовані композитні матеріали, бібліометричний аналіз, напружено-деформований стан, температурне навантаження, електродугове напilenня, вуглецеві нанотрубки, антенні системи, термостійкість, математичне моделювання, біомедичні електроди, електрокардіографія, графенові композити.

SVERSTYUK ANDRIY

Ternopil Ivan Puluj National Technical University,
Ternopil Ivan Horbachevsky National Medical University

MOSIY LYUBOMYR**REMEZ ANDRIY****MARKOVSKIY VOLODYMYR**

Ternopil Ivan Puluj National Technical University

ANALYSIS OF STIFFNESS RESEARCH OF REINFORCED COMPOSITES IN RADIO ENGINEERING AND MEDICINE

The article presents a comprehensive study of reinforced composite materials for reflective arrays and biomedical applications, combining bibliometric analysis of scientific trends and mathematical modeling of stress-strain states in antenna structures. Based on analysis of 652 publications in Scopus database over 10-year period, stable growth in research activity was revealed with peak in 2024 (114 publications). Geographic distribution demonstrates leadership of China (32.5%) and USA (21.1%). The applied bibliometric approach confirmed universality of statistical methods for interdisciplinary research. Mathematical model of temperature impact on parabolic shell of antenna mirror was developed considering anisotropic properties of composite materials. Comparative material analysis showed optimality of copper for maximum reflection efficiency, aluminum for lightweight constructions, CNT and GPL composites for structurally optimized solutions. High potential of composite materials with carbon nanotubes and graphene platelets for creating biomedical electrodes with enhanced signal-to-noise ratio (up to 40 dB) for electrocardiographic monitoring was identified. Electric arc spraying was identified as most promising technology. Numerical modeling results confirmed critical influence of temperature gradients on geometric stability of reflective surfaces. The research revealed synergistic potential between technologies for manufacturing antenna arrays and biomedical electrodes, opening prospects for developing multifunctional composite systems. The research creates scientific-methodological foundation for developing thermostable antenna systems in aerospace, energy and medical industries.

Keywords: reflective arrays, reinforced composite materials, bibliometric analysis, stress-strain state, temperature loading, electric arc spraying, carbon nanotubes, antenna systems, thermal stability, mathematical modeling, biomedical electrodes, electrocardiography, graphene composites.

Стаття надійшла до редакції / Received 27.06.2025

Прийнята до друку / Accepted 15.08.2025

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Сучасні дослідження у сфері відбиваючих решіток та армованих композиційних матеріалів обумовлені зростаючими вимогами до створення міцних, легких і термостійких конструкцій, здатних функціонувати в екстремальних умовах. Такі матеріали знаходять застосування не лише в аерокосмічній промисловості, телекомунікаціях, енергетиці та оптоелектроніці, але й у медичній техніці, автомобілебудуванні та навіть у будівництві. Особливо актуальним є розвиток композитних матеріалів для біомедичних застосувань, зокрема для створення високоефективних електродів електрокардіографічного обладнання, де критично важливими є біосумісність, електропровідність та довгострокова стабільність контакту з біологічними тканинами [1, 2].

Високі механічні навантаження, різкі перепади температур і вплив агресивних середовищ вимагають від матеріалів не лише високої міцності, але й стійкості до корозії, зносу та деградації. У медичних застосуваннях додатково постають вимоги до біосумісності, неінвазивності та здатності забезпечувати стабільну реєстрацію біоелектричних сигналів з мінімальним рівнем шумів. Вирішення цих завдань стимулює розвиток передових технологій, таких як електродугове напилення, плазмове нанесення покриттів, металізація полімерів та використання наноматеріалів, зокрема вуглецевих нанотрубок, графену та керамічних нанопокриттів. Особлива увага приділяється розробці інтелектуальних матеріалів із адаптивними властивостями, які здатні змінювати свою структуру, теплопровідність або електропровідність у відповідь на зовнішні умови. Це відкриває нові перспективи для створення енергоефективних систем, самовідновлюваних конструкцій та матеріалів нового покоління, здатних працювати в умовах, де традиційні матеріали виявляються неефективними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Комплексне дослідження розвитку наукових підходів до вивчення армованих композитних матеріалів для відбиваючих решіток протягом останнього десятиліття демонструє різноманітність методологічних підходів до моделювання цих складних систем. Сучасний науковий ландшафт у галузі композитних матеріалів характеризується широким спектром дослідницьких напрямків. Особливе місце займають удосконалені методи математичного моделювання механічної поведінки матеріалів, зокрема у випадках наявності дефектів у вигляді тріщин [3]. Дослідники приділяють особливу увагу розвитку мікромеханічних підходів до моделювання композитних структур, що створює можливості для передбачення макроскопічних властивостей на основі характеристик окремих складових елементів [4].

Паралельно відбувається інтенсивне вивчення термопластичних матеріалів та композитів на їх основі з метою їх адаптації до вимог сучасного виробництва. Активно розробляються інноваційні методи поверхневої металізації полімерних матеріалів, спрямовані на покращення таких експлуатаційних характеристик, як стійкість до зношування та якість адгезійного з'єднання. Створюються прогресивні екологічно орієнтовані технології металізації, що характеризуються підвищеною швидкістю процесу осадження.

Дослідження 2024 року демонструють значний прорив у галузі композитних біомедичних електродів. Експериментальні результати показали, що гнучкі носимі електроди для електрокардіографічного моніторингу під час фізичних вправ можуть забезпечити покращення якості електрокардіосигналів (ЕКС) ($3,809 \pm 0,282$ мВ) з вищою амплітудою та значно зменшеними артефактами руху порівняно з комерційними Ag/AgCl гелевими електродами ($2,468 \pm 2,990$ мВ) [5]. Графенові електроди демонструють кращі ЕКС, вище співвідношення сигнал/шум (покращення на 8%) та нижчий контактний імпеданс (покращення на 78%) порівняно з традиційними Ag/AgCl електродами [6]. Гідрогелі та вуглецеві нанотрубки як композитні електродні матеріали призначені для підвищення ефективності збору сигналу під час довготривалого (понад 24 години) ЕКС моніторингу [7]. Композитні матеріали або готуються шляхом диспергування CNT всередині комерційної рідкої гідрогелевої матриці, або шляхом закладення гідрогелів у макроскопічні CNT плівки.

Технології виготовлення армованих композитних матеріалів, розроблені для відбиваючих решіток, знаходять застосування в суміжних галузях, зокрема в медичній техніці. Особливо перспективним є використання композитних матеріалів у електрокардіографічному обладнанні, де критично важливими є електропровідність, біосумісність та механічна стабільність. Електродугове напилення, визначене як найперспективніша технологія для антенних застосувань, також успішно адаптується для нанесення біосумісних металевих покриттів на полімерні основи медичних пристроїв. Дослідники [8, 9] продемонстрували, що графенові композити з вуглецевими нанотрубками (CNT) та графеновими нанопластинками (GNP) можуть забезпечувати стабільний електричний контакт з біологічними тканинами при тривалому моніторингу ЕКГ з високим співвідношенням сигнал/шум (до 40 дБ).

Процедура визначення жорсткісних навантажень у армованих композитних системах представляє собою комплексну задачу, що потребує глибокого розуміння фізико-механічних властивостей матеріалів, особливостей геометричної конфігурації конструкції та характеру діючих силових факторів. Підвищені значення питомої жорсткості та міцності композитних матеріалів створюють передумови для їх використання як ефективної заміни класичних конструкційних матеріалів [10]. У зв'язку з розширенням застосування композитних матеріалів у різноманітних промислових секторах, зокрема в аерокосмічній індустрії, автомобілебудуванні та об'єктах цивільної інфраструктури, проблематика розрахунку жорсткісних навантажень набуває все більшої актуальності [11–13].

Повністю друковані та делікатні для шкіри вологі ЕКГ електроди з компактним бездротовим зчитуванням для кардіальної діагностики та віддаленого моніторингу використовують у 265 разів менше металу для провідної частини та у 176 разів менше ЕКГ електродного гелю порівняно зі стандартними комерційними вологими ЕКГ електродами [14]. Крім того, їх безпровідна система зв'язку досягає максимальної дальності зчитування 142 м та пропонує в 4 рази більшу дальність безпровідного зв'язку, ніж типові комерційні чіп-антени. Дослідження якості ЕКС при довготривалих записках з сухими електродами з контрольованими артефактами руху показали перспективність матеріалів для носимого ЕКГ моніторингу [15]. Безклеєві, конформні та миючі електроди з тканини на основі вуглецевих нанотрубок для біосенсингу можуть бути виготовлені з використанням різних текстильних виробничих процесів [16]. Плетені та в'язані конструкції електродів з використанням пряжі, обгорнутої CNT, є високо сумісними зі шкірою та вимірюють високоточну електрокардіографію. Дешеві графенові піноподібні електроди на основі нанографену продемонстрували здатність забезпечувати як точне отримання, так і ефективну обробку біосигналу для медичних пристроїв та носимих пристроїв нового покоління [17]. При поєднанні з алгоритмом кластеризації графенові піноподібні електроди можуть ефективно пригнічувати артефакти та шумові сигнали й витягувати серцевий ритм з точністю понад 90%.

Специфічні властивості цих матеріалів, включаючи анізотропний характер механічних характеристик та структурну неоднорідність, обумовлюють необхідність застосування складних аналітичних та обчислювальних методологій для достовірного прогнозування структурної відповіді за різних режимів навантаження [18]. Критично важливим є трансформація розрахункових параметрів у реальні значення для подальшого прогнозування ефективних характеристик граничного стану та міцності композитної структури виключно через призму властивостей армуючих волокон та матричного матеріалу [19]. Покращення біосумісності та функціональності композитів вуглецевих нанотрубок з полімерами для покращених біомедичних застосувань демонструє значний прогрес [20]. Поєднуючи адаптивність та біосумісність полімерів з відмінними механічними, електричними та хімічними властивостями вуглецевих нанотрубок, ці нанокомпозити забезпечують гнучку платформу для біомедичних застосувань.

Методологія дослідження композитних матеріалів традиційно реалізується на трьох ієрархічних рівнях: мікромеханічному, макромеханічному та рівні механіки конструкцій. Мікромеханічний підхід зосереджується на вивченні розподілу напруженого та деформованого стану в індивідуальних структурних компонентах [21]. Макромеханічна методологія призначена для встановлення усереднених властивостей матеріалу без урахування деталей його внутрішньої архітектури [22]. Рівень механіки конструкцій охоплює аналіз поведінки цілісних структурних елементів, створених з композитних матеріалів.

Оцінка якості сигналу відіграє життєво важливу роль у значному покращенні діагностичної точності та надійності систем автоматичного аналізу ЕКС [23]. На практиці ЕКС часто пошкоджується різними видами шумів та артефактів. Тому були представлені численні методи оцінки якості сигналу на основі ознак ЕКГ сигналу та/або шуму, а також класифікаторів машинного навчання та/або евристичних правил рішень. Загальний конвеєр машинного навчання для оцінки якості електрокардіограм з різних джерел показав, що модель трансформера розширила точність з 90% до 98% [24]. Бібліотека Physio-Net допомагає отримувати ЕКС, включаючи популярні базові бази даних, такі як MIT-BIH, PTB, та складні набори даних. Аналогічно, носимі пристрої встановилися як відповідний варіант для моніторингу здоров'я пацієнтів без обмежень часу та місця. Гнучкі електроди з використанням композитних матеріалів досягли нових проривів у якості сигналу в напрямку безконтактних датчиків та імплантованих датчиків [25]. Новий композитний датчик значно покращує зручність, екологічну адаптивність та економічність датчика, роблячи можливою мініатюризацію обладнання для ЕКГ моніторингу.

Визначення жорсткісних навантажень у армованих композитних матеріалах вимагає фундаментального розуміння структурної організації та механічної поведінки матеріалу. Інтегральні властивості композитів у значній мірі детермінуються характеристиками та пропорційним співвідношенням складових компонентів, особливостями міжфазної взаємодії на границі матриця-армування, об'ємним вмістом армуючих елементів у композиті та їх просторовою орієнтацією, а також архітектурними особливостями армуючої системи [26].

Просторовий розподіл та орієнтаційні характеристики армуючих елементів у матричному середовищі виявляють значний вплив на інтегральні показники жорсткості та міцності композитної

системи, що обумовлює критичну важливість прецизійної характеристики цих параметрів для достовірних розрахунків жорсткісних навантажень. Процедура розрахунку потребує точної характеристики матеріальних властивостей, застосування сучасних аналітичних моделей та використання методів комп'ютерного моделювання для передбачення структурної поведінки в різноманітних сценаріях навантаження [27]. Застосування обчислювального матеріалознавства демонструє тенденцію до зростання у зв'язку з прогресом комп'ютерних технологій та розвитком спеціалізованого програмного забезпечення для моделювання, що спрямовано на інтенсифікацію процесів проектування та сертифікації композитних матеріалів, зокрема вуглепластиків, що знаходять застосування в авіаційній галузі [28]. Методологія елементарної комірки забезпечує інтеграцію мікро- та макромасштабних підходів для виведення макроскопічних властивостей матеріалу з мікроскопічних характеристик його складових [29].

Потреба у спеціалізованих обчислювальних мікроемеханічних методах виникає при необхідності оцінки в'язкості руйнування для кожного з режимів руйнування шару, оскільки попри наявність багатьох перевірених методик для визначення жорсткості та міцності шару, оцінка в'язкості руйнування є більш складним завданням. Моделювання має враховувати динаміку розповсюдження тріщин від концентратора напружень та процеси локалізації пошкоджень, що створює несумісність з аналізом представницького об'ємного елемента за періодичних граничних умов [30]. Чисельні методи знаходять широке застосування для аналізу пошкоджень, що виникають під дією механічних навантажень у композитних матеріалах, при цьому результати чисельних розрахунків порівнюються з доступними аналітичними розв'язками або експериментальними даними [31]. З точки зору промислової практики, аналітичне та чисельне моделювання може стати життєздатною альтернативою, враховуючи що експериментальні дослідження, призначені для визначення ефективних пружних властивостей композитів, включаючи модулі пружності та зсуву, а також коефіцієнти Пуассона, характеризуються значними витратами часу та фінансових ресурсів [32, 33].

Прогресивні моделі матеріалів є необхідною умовою для точного прогнозування поведінки композитних матеріалів під навантаженням, при цьому ключову роль відіграють нелінійні властивості матеріалу, геометричні нелінійності, пов'язані з переорієнтацією волокон, та процеси накопичення пошкоджень із супутньою концентрацією напружень [34]. Моделі руйнування, розроблені на мезоскопічному рівні, здатні забезпечити теоретичну основу для селекції матеріалів та розробки композитних конструкцій з підвищеною ударостійкістю [35]. Формулювання адекватних критеріїв руйнування має критичне значення для оцінки структурної цілісності та прогнозування механізмів руйнування композитних конструкцій. Численні дослідження присвячені вивченню впливу пошкоджень на композитні матеріали з використанням різноманітних критеріїв руйнування [36]. Прогресивне моделювання пошкоджень, що включає алгоритми деградації матеріальних властивостей, сформулювалося як провідний метод для оцінки експлуатаційних характеристик композитних конструкцій [37]. Інтеграція методу скінченних елементів з користувацькими підпрограмами матеріалів широко використовується в прогресивному моделюванні пошкоджень для відтворення поетапного накопичення пошкоджень та його впливу на жорсткісні та міцнісні характеристики композиту. Метод скінченних елементів демонструє високу ефективність для прогнозування нелінійної поведінки матеріалів, проте потребує значних обчислювальних ресурсів та тривалого часу розрахунку [38].

Технології виготовлення армованих композитних матеріалів, розроблені для відбиваючих решіток, знаходять застосування в суміжних галузях, зокрема в медичній техніці. Особливо перспективним є використання композитних матеріалів у електрокардіографічному обладнанні, де критично важливими є електропровідність, біосумісність та механічна стабільність. Сучасні дослідження демонструють ефективність використання вуглецевих нанотрубок (CNT) та графенових пластинок (GPL) не лише для структурного підсилення антенних конструкцій, але й для створення високочутливих біомедичних електродів. Електродугове напilenня, визначене як найперспективніша технологія для антенних застосувань, також успішно адаптується для нанесення біосумісних металевих покриттів на полімерні основи медичних пристроїв. Дослідники [6, 39, 40] продемонстрували, що графенові композити з вуглецевими нанотрубками (CNT) та графеновими нанопластинками (GNP) можуть забезпечувати стабільний електричний контакт з біологічними тканинами при тривалому моніторингу ЕКГ з високим співвідношенням сигнал/шум (до 40 дБ). Аналогічно, полімерні композити з домішками срібла та міді, що використовуються в рефлекторах, виявляють високу ефективність як матеріали для сухих електродів ЕКГ.

Попри досягнутий значний прогрес, недостатньо дослідженими залишаються питання довгострокової стабільності композитних відбиваючих решіток в умовах космічного середовища, оптимізації структурних параметрів для ширококугових застосувань та створення економічно доцільних технологій масового виробництва. Таким чином, аналіз сучасного стану досліджень демонструє динамічний розвиток галузі армованих композитних матеріалів для відбиваючих решіток, при цьому пріоритетні напрямки концентруються на нанотехнологічних рішеннях, створенні багатофункціональних систем, екологічній безпеці процесів та цифрових методах оптимізації.

Формулювання цілей статті

Необхідно провести комплексний аналіз наукових публікацій, що стосуються моделювання, обробки та класифікації армованих композитних матеріалів для відбиваючих решіток та біомедичних застосувань. Для цього потрібно дослідити публікації наукометричної бази Scopus за останнє десятиліття. Дослідження має охоплювати аналіз кількості публікацій за роками, типами, авторами, країнами, організаціями, категоріями Scopus та напрямками досліджень, а також оцінку динаміки цитування публікацій. Особливу увагу слід звернути на основні проблеми, що виникають при розробці відбиваючих решіток, ваги, міцності, термостійкості та корозійної стійкості. Додатково необхідно проаналізувати потенціал використання композитних матеріалів у медичній техніці, зокрема для створення високоефективних електродів електрокардіографічного обладнання з покращеними характеристиками біосумісності та електропровідності.

Додатково важливою метою дослідження є розробка математичної моделі напружено-деформованого стану параболічної оболонки дзеркала антени при температурному навантаженні. Дана модель повинна містити розрахунок жорсткісних навантажень у композитних структурах з визначенням розподілу переміщень, деформацій і напружень в умовах термічного навантаження; ідентифікацію критичних ділянок конструкції, що потребують додаткового підсилення або корекції геометричних параметрів для забезпечення функціональної надійності антенної системи; оптимізацію вибору матеріалів та технологічних параметрів для мінімізації термічних деформацій та підвищення експлуатаційної стабільності відбиваючих решіток. Важливою складовою дослідження є виявлення синергійного потенціалу між технологіями виготовлення антенних решіток та біомедичних електродів, зокрема для електрокардіографічного моніторингу. Необхідно оцінити можливості використання композитних матеріалів з вуглецевими нанотрубками (CNT) та графеновими пластинками (GPL) для створення багатофункціональних систем, що поєднують високу ефективність відбиття електромагнітних хвиль з можливістю реєстрації біоелектричних сигналів.

Мета дослідження полягає в тому, щоб виявити основні тенденції та напрямки досліджень, оцінити внесок різних наукових груп та країн, визначити найбільш перспективні методи та технології, а також забезпечити науково обґрунтований підхід до проектування температурно-стабільних композитних конструкцій антенних систем з потенціалом для міждисциплінарного застосування у медичній техніці, особливо в області електрокардіографічної діагностики.

Виклад основного матеріалу

Наукометрична база Scopus дозволяє здійснювати розширений пошук наукових публікацій, що стосуються зазначеної тематики. Тому для підготовки аналітичного огляду публікацій з аналізу методів моделювання, обробки та класифікації армованих композитних матеріалів для відбиваючих решіток за останнє десятиріччя був сформульований запит для розширеного пошуку: (TITLE-ABS-KEY("reflective") OR TITLE-ABS-KEY("reinforced composite") OR TITLE-ABS-KEY("biomedical composite")) AND TITLE-ABS-KEY("grid" OR "electrode" OR "ECG").

Результати розширеного пошуку в наукометричній базі Scopus показали 652 публікації за останнє десятиліття. Така кількість наукових робіт свідчить про значний інтерес дослідників до тематики відбиваючих решіток, а також до розробки та класифікації методів нанесення композиційних матеріалів (рис. 1).

Найбільша кількість публікацій припадає на 2024 рік (114 публікацій). Такий активний зріст кількості публікацій свідчить про зростаючий інтерес науковців до цієї тематики та її актуальність у сучасних дослідженнях. Крім того, станом на 2025 рік вже вийшло 7 наукових праць, що підкреслює продовження активної роботи у цій галузі (рис. 2).

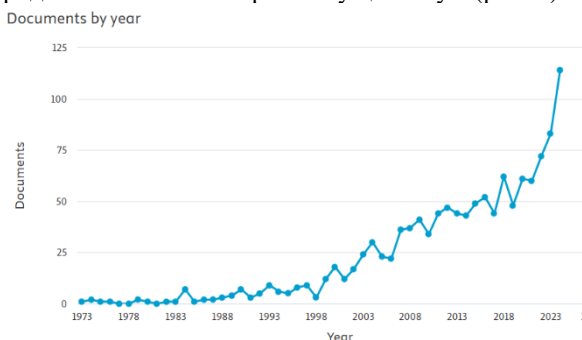


Рис. 1. Динаміка кількості публікацій у наукометричній базі Scopus за роками



Рис. 2. Динаміка кількості публікацій у наукометричній базі Scopus за останні 10 років

Представлений підхід до бібліометричного аналізу демонструє універсальність статистичних методів дослідження наукових публікацій, які успішно застосовуються в різних галузях науки. Аналогічні методологічні принципи ефективно використовуються для вивчення тенденцій розвитку біомедичних досліджень, зокрема в області аналізу функцій ритму та амплітудної варіабельності біосигналів [41, 42]. Спільність підходів до систематизації наукових знань, виявлення тенденцій

публікаційної активності та географічного розподілу досліджень підкреслює важливість бібліометрії як інструменту наукометричного аналізу незалежно від предметної області. Це дозволяє формувати об'єктивну картину розвитку наукових напрямків та ідентифікувати перспективні напрями міждисциплінарних досліджень.

Комплексний аналіз та огляд найактуальніших статей, присвячених методам створення, обробки та класифікації армованих композиційних матеріалів і відбиваючих решіток, виявив наступні результати. Розвиток і вдосконалення технологій виготовлення та застосування армованих композитів і решіток є пріоритетним напрямком сучасних наукових досліджень, що відіграє важливу роль у таких галузях, як аерокосмічна промисловість, енергетика та оптоелектроніка. Зокрема, електродугове напилення визначається як одна з перспективних технологій для нанесення композиційних покриттів, які забезпечують високу міцність, корозійну стійкість і термостійкість. Цей метод активно досліджується для створення високоефективних відбиваючих решіток та покращення їх експлуатаційних характеристик. Науковець Cho, Jin-Rae дослідив нанокомпозитні структури, посилені вуглецевими нанотрубками (CNT) та графеновими пластинками (GPL), у функціонально-градієнтному розподілі. Дослідження спрямоване на порівняння механічної поведінки композитних плит, посилених CNT та GPL, з тріщинами та без них, у лінійному та нелінійному діапазонах. Використовувався чисельний метод у рамках двовимірного розширеного методу природних елементів (XNEM), де лінія тріщини моделювалася за допомогою фазового поля (PFF), а сингулярність враховувалася через спеціальні функції для вершини тріщини. Результати показали, що метод точно прогнозує лінійну та нелінійну механічну поведінку тріщинованих нанокомпозитних плит. Плити, посилені GPL, виявилися значно жорсткішими порівняно з плитами, посиленими CNT, причому останні демонструють значну залежність від орієнтації CNT [43].

Автори Wen, L., Hu, W., Pang, B., Luo, Q., & Gao, S. розробили антену та масив на основі псевдоповерхневих плазмон-поляритонів (SSPP), використовуючи парні та непарні резонансні режими. Вперше застосовано розділені коругові канавки для узгодження обох режимів на одній апертурі SSPP. Нові техніки, такі як ємнісні пати та трикутні вирізи, подолали виклики живлення та узгодження імпедансу. Тестування показало широку смугу узгодження 14,8% та високу ізоляцію 29 дБ. Результати підтвердили перспективність SSPP для багатокористувацьких систем (MIMO) завдяки компактній структурі та ортогональним режимам [44].

Науковці Sun, H.-H., Ding, C., Zhu, H., Jones, B., & Guo, Y. J. [45] представили новий метод придушення міжсмугового розсіювання в двохсмугових двополяризаційних антенних решітках. Метод полягає у введенні дроселів у низькосмугові (LB) елементи для придушення високосмугових (HB) струмів розсіювання. Експериментальні результати показали, що встановлення LB-дроселів, які пропускають LB-сигнали та блокують HB-сигнали, у LB-випромінювачі забезпечує придушення індукованих HB-струмів на LB-елементах. Це значно зменшує спотворення діаграми спрямованості HB-решітки, спричинене наявністю LB-елементів. Розглянута решітка складається з двох колонок HB-антен, які працюють у діапазоні від 1,71 до 2,28 ГГц, та однієї колонки LB-антен, які працюють у діапазоні від 0,82 до 1,0 ГГц. Реалізована решітка з LB-елементами, оснащеними дроселями, демонструє стабільне та симетричне випромінювання як у HB, так і у LB діапазонах.

Christofi I., Hadjiloizi D.A., Kalamkarov A.L. та Georgiades A.V. розробили комплексну мікромеханічну модель для аналізу структурно періодичних і пов'язаних магнітоелектричних та термопружних композитів і армованих оболонок. Модель базується на асимптотичній гомогенізації та включає макро- і мікроскопічні задачі, що розглядаються окремо, хоча взаємопов'язані. Мікроскопічний аналіз визначає ефективні коефіцієнти, а макроскопічний – апроксимацію польових змінних (напруження, електричне зміщення, тепловий потік тощо). У граничному випадку тонких оболонок модель збігається з класичною теорією, що є вдосконаленням попередніх досліджень [46]. Науковець Michel Biron дослідила майбутнє термопластів та термопластичних композитів, акцентуючись на їхній адаптації до економічних, технічних та екологічних вимог. Ключові аспекти: інновації, легкість, переробка та екологічна стійкість. Використання нанопоповнювачів, графену та нанотрубок підвищує продуктивність і екологічність. Різні типи армувань (LFRT, UD, 2D, 3D) розширюють можливості застосування. Важливими залишаються переробка, сталі біопластики та композити. Споживання залежить від ринкового попиту, інновацій та екологічних обмежень. Аналіз соцмереж додатково висвітлює потреби споживачів [47].

Дослідники Ruslan Melentiev, Arief Yudhanto, Ran Tao, Todor Vuchkov, Gilles Lubineau дослідили полімери та їх композити, які широко використовуються в аерокосмічній, автомобільній, електронній та спортивній галузях завдяки легкості, низькій вартості та простоті обробки. Однак поверхня полімерних матеріалів має низку недоліків, таких як низька зносостійкість, теплопровідність, адгезія та біоактивність. Металізація полімерів — перспективний підхід для усунення цих обмежень шляхом нанесення металевих шару. У статті розглянуто принципи, досягнення, виклики та застосування сучасних методів металізації, включаючи фізичне осадження, електрохімічне покриття, термічне напилення (полум'яне, плазмове, холодне) та методи прямого з'єднання полімерів з металами (адгезійне, ультразвукове, лазерне тощо). Ці підходи сприяють оптимізації властивостей полімерних/композитних матеріалів для структурних застосувань [5].

Науковці Shrutee Nigam, Siba Sankar Mahapatra, Saroj Kumar Patel дослідили нову техніку металізації, яка не містить хімічних небезпек і має високу швидкість осадження. Металізація перетворює непровідні матеріали, такі як пластик, на провідні шляхом нанесення металевого шару. У роботі вивчалось осадження міді на акрилонітрил-бутадієн-стирол (АБС), який вважається одним із найміцніших пластиків. За допомогою скануючої електронної мікроскопії (SEM) виявлено пластичні структури в покритті, а також досліджено мікротвердість, шорсткість поверхні та щільність покриття. Для оптимізації параметрів процесу використано метод Тагучі та дисперсійний аналіз (ANOVA), що дозволило визначити оптимальну комбінацію параметрів для досягнення максимальної щільності покриття [48].

На рисунку 3 відображена хмара ключових слів, створена на основі аналізу публікацій авторів, що містяться в базі Scopus та відповідають досліджуваній тематиці. Ця візуалізація дозволяє швидко ідентифікувати найбільш значущі терміни, що використовуються в даній галузі досліджень. Аналіз розподілу наукових праць за типами документів засвідчує домінування статей (64,6%), що є характерним для сучасного наукового дослідження. Значну частку також становлять матеріали конференцій, зокрема доповіді (27,0%), що свідчить про активну участь науковців у науково-практичних заходах. Розділи книг (3,7%) та огляди (2,3%, включаючи огляди конференцій – 2,1%) відіграють важливу роль у систематизації та інтеграції наукових знань. Книги, як правило, становлять меншу частку (0,3%) (рис.4).

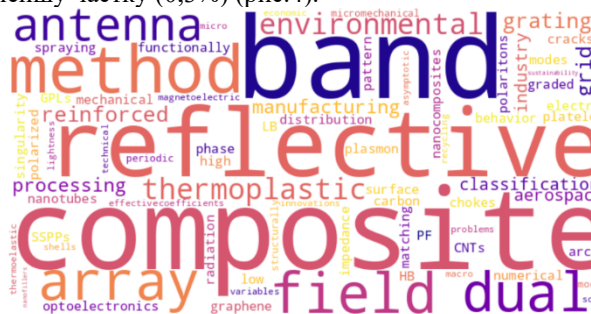


Рис. 3. Набір ключових слів, які автори використовують у своїх роботах

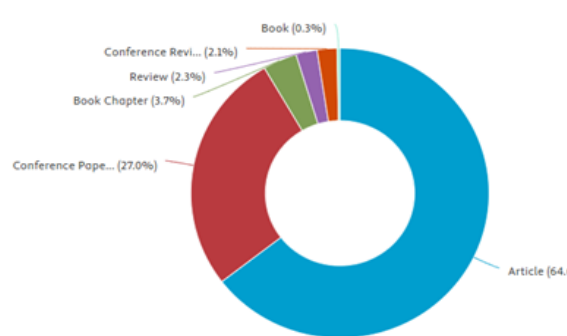


Рис.4. Класифікація наукових праць за видами публікацій

Наукові статті складають значну частину опублікованих матеріалів, про що свідчить аналіз розподілу наукових праць за типами документів. Розподіл цих праць за темами відображено на гістограмі (рис. 5), де кожен сектор представляє окрему категорію, а його розмір пропорційний кількості документів цієї категорії. Інженерія (Engineering) (25,8%), очолює список, найбільш представлена галузь, далі іде матеріалознавство (Materials Science) (13,9%), друга за величиною категорія, що охоплює дослідження матеріалів та їх властивостей. Фізика та астрономія (Physics and Astronomy) (13,0%), третя за розміром категорія. Комп'ютерні науки (Computer Science) (10,1%), важлива галузь, що включає комп'ютерні науки та інформаційні технології. Окрім зазначених категорій, існують й інші, менш чисельні, які об'єднані в категорію "Інше". Цей розподіл відображає різноманітність наукових досліджень та інтересів, а також показує, які галузі є найбільш популярними та фінансованими на даний момент.

За даними категорій Scopus, найбільша частка публікацій за останніх 10 років належить організаціям: Ministry of Education of the People's Republic of China – 17 публікацій (2,6%), Southeast University – 12 публікацій (1,8%), CNRS Centre National de la Recherche Scientifique – 10 публікацій (1,5%), Chinese Academy of Sciences – 10 публікацій (1,5%), Harbin Institute of Technology – 8 публікацій (1,2%), (рис. 6).

Кількість публікацій варіюється залежно від країни або території. Найбільше публікацій надходить з тих країн, де наука та дослідження є пріоритетними напрямками розвитку. До цих країн або територій належать Китай – 180 (32,5%), США – 117 (21,1%), Велика Британія – 44 (7,9%), Німеччина – 44 (7,9%), Індія – 39 (7,0%), Італія – 30 (5,4%), Австралія – 29 (5,2%), Франція – 25 (4,5%), Південна Корея – 24 (4,3%), Канада – 22 (4,0%) (рис.7).

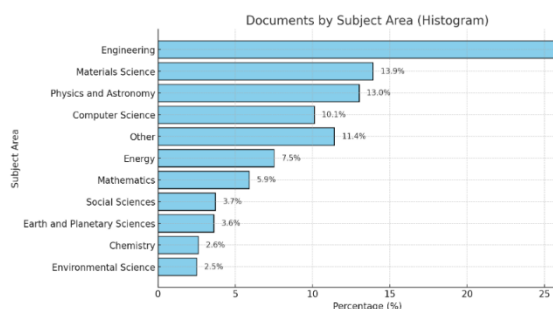


Рис. 5. Наукові публікації: розподіл за темами

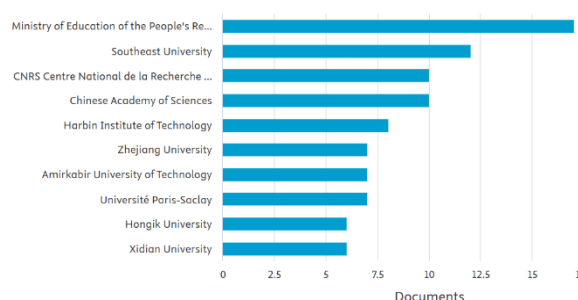


Рис. 6. Кількість публікацій до різних організацій

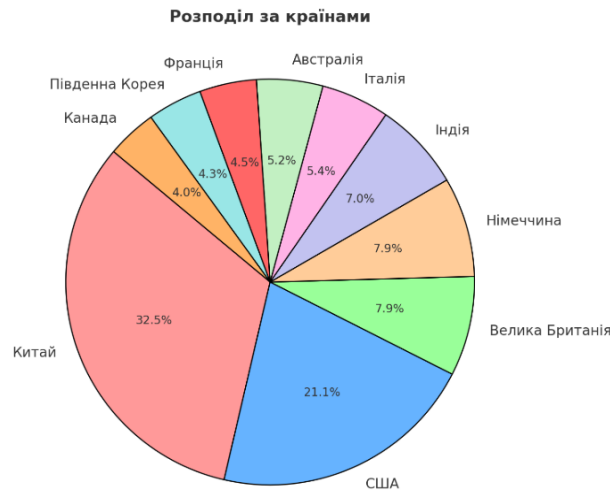


Рис. 7. Розподіл за країнами походженням

Порівняльний аналіз матеріалів для рефлекторів антенних решіток

Ідея формування конструкцій відбиваючих решіток із сітчастих матеріалів виникла у відповідь на потребу створення легких, міцних і стійких до деформацій конструкцій, які можуть витримувати вплив механічних навантажень, погодних умов та вібрацій. Класичні параболічні антени виготовлялися із суцільнометалевих дзеркал, які забезпечували хорошу відбиваючу здатність, але мали значну вагу, що обмежувало їхнє використання, особливо у сфері космічного зв'язку та мобільних систем зв'язку. Вибір матеріалу для рефлектора залежить від конкретних вимог для відбиваючих решіток. Якщо потрібна максимальна ефективність, кращим вибором буде мідь. Якщо важлива вартість та легкість, слід обрати алюміній. Для роботи у важких умовах підійде сталь. Композити є оптимальним варіантом для сучасних антен, де поєднуються високі вимоги до характеристик та обмеження за вагою. Дані представлені у таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняння матеріалів для рефлекторів антенних решіток та біомедичних електродів

Характеристика	Алюміній (Al)	Мідь (Cu)	Сталь (сплав заліза з вуглецем)	Латунь (сплав міді з цинком)	Листовий полістирол	Графен/CNT композити
Ефективність відбиття	Висока	Дуже висока	Середня	Висока	Дуже висока	Висока
Легкість	Дуже легкий	Важчий за алюміній	Важкий	Важчий за алюміній	Дуже легкий	Дуже легкий
Термостійкість	Задовільна	Добра	Висока	Добра	Добра	Відмінна
Біосумісність	Добра	Відмінна	Погана	Добра	Задовільна	Відмінна
Електропровідність	Висока (3.8×10^7 S/m)	Дуже висока (5.9×10^7 S/m)	Середня (1.0×10^7 S/m)	Висока (1.5×10^7 S/m)	Дуже низька	Надвисока ($\sim 10^8$ S/m)
Гнучкість для носіння	Середня	Середня	Низька	Середня	Висока	Надвисока
Стабільність контакту	Середня	Висока	Низька	Висока	Низька	Відмінна
Опір шкірним виділенням	Добрий	Відмінний	Поганий	Добрий	Задовільний	Відмінний
Корозійна стійкість	Хороша	Дуже хороша	Погана	Хороша	Дуже хороша	Відмінна
Вартість виробництва	Низька	Вища за алюміній	Низька	Середня	Низька	Висока

Кожен з цих матеріалів має свої унікальні властивості, які роблять його придатним для різних застосувань. Алюміній цінується за легкість та хорошу провідність, мідь – за чудову провідність та стійкість до корозії, сталь – за міцність та відносно низьку вартість, а латунь – за хорошу оброблюваність та стійкість до корозії. Полістирол завдяки своїй легкості, дешевизні та можливості обробки використовується для широкого спектру виробів, але має обмеження щодо міцності та термостійкості. Вибір матеріалу залежить від конкретних вимог до виробу. Науковці [6, 8, 9, 49]

показали, що графенові електроди забезпечують стабільний контакт з біологічними тканинами при збереженні високої електропровідності, необхідної для антенних систем. Порівняння матеріалів показані у таблиці 2.

Таблиця 2

Порівняльна таблиця фізичних та хімічних властивостей матеріалів

	Алюміній (Al)	Мідь (Cu)	Сталь (сплав заліза з вуглецем)	Латунь (сплав міді з цинком)	Листовий полістирол
Фізичні властивості	Легкий метал сріблясто-білого кольору	Червонувато-золотистий метал	Сірий метал з різними відтінками залежно від складу	Жовтий метал, відтінок залежить від співвідношення міді та цинку	Безбарвний, прозорий, твердий матеріал. Може бути як аморфним (склоподібним), так і кристалічним
	Густина: 2,7 г/см ³	Густина: 8,96 г/см ³	Густина: близько 7,8 г/см ³	Густина: близько 8,5 г/см ³	Залежить від типу полістиролу (аморфний або кристалічний) та може коливатися від 1,04 до 1,12 г/см ³
	Температура плавлення: 660 °C	Температура плавлення: 1083 °C	Температура плавлення: залежить від складу (зазвичай вище 1400 °C)	Температура плавлення: залежить від складу (зазвичай близько 900 °C)	Для кристалічного полістиролу становить близько 240 °C. Аморфний полістирол не має чіткої температури плавлення, він поступово розм'якшується при нагріванні
	Добре проводить тепло й електрику	Чудово проводить тепло й електрику (краще за алюміній)	Добре проводить тепло й електрику, але гірше за мідь та алюміній	Добре проводить тепло й електрику	Низька, тому полістирол є хорошим теплоізолятором
	Має високу пластичність та ковкість	Має високу пластичність та ковкість	Має високу міцність та твердість	Має високу пластичність та ковкість	Має досить високу міцність на стиск та вигин, але є крихким матеріалом
Хімічні властивості	Активний метал, але на повітрі швидко утворює захисну оксидну плівку, що запобігає подальшому окисленню	Малоактивний метал	Залізо активно реагує з киснем, утворюючи іржу	Стійка до корозії	Стійкий до дії розбавлених кислот та лугів
	Реагує з кислотами та лугами	На повітрі утворює зелену патину (основний карбонат міді)	Стійкість до корозії залежить від складу сталі та наявності легуючих добавок (наприклад, хром у нержавіючій сталі)	Легко обробляється	На повітрі під дією ультрафіолетового випромінювання може окислюватися, що призводить до пожовтіння, утворення тріщин та втрати міцності
	Відновлює метали з їх оксидів	Реагує з концентрованими кислотами	Реагує з кислотами		Горючий матеріал, при горінні виділяє чорний дим та токсичні речовини

Таким чином, проведений аналіз сучасних методів утворення армованих композитних матеріалів для відбиваючих решіток дозволяє виділити основні технологічні підходи та їхній вплив на механічні характеристики кінцевого виробу. Проте для забезпечення надійності та ефективності функціонування антенних систем, особливо в умовах змінних температур, необхідно не лише враховувати властивості матеріалів, а й глибоко дослідити їхню механічну поведінку в реальних експлуатаційних умовах. У зв'язку з цим доцільним є аналіз напружено-деформованого стану

конструктивних елементів, зокрема параболічної оболонки дзеркала антени, яка виконує ключову роль у формуванні та відображенні електромагнітних хвиль. Тому математичне моделювання та чисельний аналіз напружено-деформованого стану оболонки за умов термічного навантаження є необхідним етапом у процесі проєктування та оптимізації конструкцій з композитних матеріалів. Такий підхід дозволяє не лише передбачити поведінку конструкції в експлуатаційних умовах, а й виявити критичні ділянки, що потребують додаткового підсилення або корекції геометричних параметрів.

Напружено-деформований стан параболічної оболонки дзеркала антени при температурному навантаженні

З метою кількісної оцінки впливу температурних та жорсткісних навантажень на геометричну стабільність відбиваючої поверхні, у цьому розділі розглядається математична модель напружено-деформованого стану параболічної оболонки дзеркала антени, виготовленої з армованого композитного матеріалу. Модель будується в рамках теорії оболонок з урахуванням анізотропних властивостей матеріалу, температурного градієнта та граничних умов, що відповідають реальним умовам закріплення конструкції. Розроблений підхід дозволяє визначити розподіл переміщень, деформацій і напружень у конструкції, що є критично важливим для забезпечення її функціональної надійності.

Визначення температурного поля в оболонковій конструкції дзеркала антени розглянуто вище. Досліджуємо ПДВ оболонки дзеркала антени, виконаної у вигляді параболоїда обертання.

Нехай температура на поверхні оболонки розкладається в тригонометричний ряд уздовж меридіана θ та окружної координати φ :

$$\begin{aligned}\varepsilon_T &= \beta t_0 = \sum_{k=0}^K \sum_{m=0}^M \varepsilon_m^k \frac{\cos m\theta}{\sin k\varphi}, t_0 = \frac{T_1 + T_2}{2}, \\ \chi_T &= \beta t_1 = \sum_{k=0}^K \sum_{m=0}^M \chi_m^k \frac{\cos m\theta}{\sin k\varphi}, t_1 = \frac{T_2 - T_1}{2}\end{aligned}\quad (1)$$

де β – коефіцієнт лінійного розширення.

Оцінимо необхідну кількість членів, що утримуються, тобто значення $k \leq K, m \leq M$, достатні для опису напружено-деформованого стану з високим ступенем. Врахуючи нелінійний характер граничних умов температурної задачі, крім $k = 0$ і $k = 1$ характеризує компоненти теплового потоку, в рішенні будемо включати і більш високі гармоніки але ступінь їхньої участі швидко загасатиме зі збільшенням k ($k = 4, 5$). При невеликих граничних значеннях $\theta = \theta_0$, потрібно утримати велике число M членів, однак у цих випадках параболічна і сферична поверхня обертання мають практично збігливу метрику.

Для розрахунку непологою параболічної оболонки потрібно утримати обмежену кількість членів $M \approx K$.

Нехай у деякому положенні радіус-вектор $\mathbf{r}$ направленою потоку сонячного випромінювання, паралельної площині yz , утворює з віссю z та кут θ_q :

$$r = y \sin \theta_q - z \cos \theta_q.$$

Умова освітленості поверхні з урахуванням залежності має вигляд

$$rn = F(\theta, \varphi) = \sin \theta_q \sin \theta \sin \varphi - \cos \theta_q \cos \theta \leq 0 \quad (2)$$

При $\cos \theta_q \cos \theta_0 \geq \sin \theta_q \sin \theta_0$, вся поверхня оболонки освітлена Сонцем; інакше з нерівності (3) випливає, що межа поділу світла і тіні перебуває з рівняння $tg \theta \sin \varphi = ctg \theta_q$. Використовуючи залежності для параболоїда, отримуємо для інтегрального потоку випромінювання

$$q_K = -\alpha_c q_s F(\theta, \varphi), F(\theta, \varphi) < 0, q_K = 0, F(\theta, \varphi) \geq 0$$

необхідні залежності під час інтегрування по всій поверхні.

Визначимо інтеграл:

$$I(a, b, f) = \int_a^b d\varphi \int_0^{\psi(\varphi)} F(\theta, \varphi) \frac{\sin \theta}{\cos^4 \theta} d\theta = \int_a^b \left[\frac{1}{3} \sin \theta_q tg^3 \psi \sin \varphi d\varphi - \frac{\cos \theta_q}{2} tg^2 \psi d\varphi \right].$$

При $\theta_q \leq \frac{\pi}{2 - \theta_0}$ вся поверхня оболонки освітлена і загальна кількість тепла, поглинена оболонкою, визначиться формулою:

$$\alpha_s \int_S q_n dS = 2\alpha_s q_s f^2 \cos \theta_q tg^2 \theta_0 \quad (3)$$

Якщо частина оболонки знаходиться в «тіні» при $\pi/2 - \theta_0 < \theta_q \leq \pi/2$ де:

$$\begin{aligned}\alpha_s \int_S q_n dS &= 4f^2 \alpha_s q_s \left[I\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_0, \frac{3\pi}{2} + \varphi_0, \theta_0\right) + 2I\left(0, \frac{\pi}{2} - \varphi_0, \theta_1\right) \right] \\ \varphi_0 &= \arcsin(ctg \theta_q ctg \theta_0); \theta_1 = \arctg\left(\frac{ctg \theta_q}{\sin \varphi}\right)\end{aligned}\quad (4)$$

При $\theta_q = \pi - \theta_q$, справедливі формули (3), (4) для повністю освітленої $\pi - \theta_0 < \theta_q < \pi + \theta_0$ або частинок освітленої поверхні відповідно. При цьому новостворюється взаємно однозначна відповідність станів для точок, розташованих на поверхні з різних сторін від площини O_{xz} .

Розрахунок напружено-деформованого стану проводиться для осесиметричної та антисиметричної компонентів навантаження. Через велике значення коефіцієнта теплопровідності для металів осесиметрична компонента розподілу температури велика. Роль інших компонент може бути оцінена відношенням максимальної різниці абсолютних температур вздовж паралелі до середньої абсолютної температури і зростає зі збільшенням відхилення напрямків r і z . Для випадків $k = 0$ і $k = 1$ отримані в роботі залишається лише взяти інтеграли у виразах для переміщень стосовно параболічної оболонки.

Для скорочення запису введемо позначення:

$$\begin{aligned} \cos^n x &= c^n, \sin^n x = s^n, \cos m x = c_m, \sin m x = s_m, \\ \int \cos^n x \cos m x dx &= c_m^n, \int \sin^n x \sin m x dx = s_m^n, \\ \int \sin^n x \cos m x dx &= E_m^n, \int \cos^n x \sin m x dx = F_m^n. \end{aligned}$$

Застосовувавши послідовно рекурентні залежності:

$$c_m^n = \frac{(m+n+2)c_{m+1}^{n+1} - c^{n+1} s_m + 1}{n+1}, F_m^n = \frac{(m+n+2)F_{m+1}^{n+1} + c^{n+1} c_m + 1}{n+1},$$

Знаходимо:

$$\begin{aligned} \varepsilon_m^2 \cos m \theta (R_1 - R_2) \frac{d\theta}{\sin \theta} &= -\frac{R_0}{2} \sum_{m=0}^M t_m (F_{m+1}^{-3} - F_{m-1}^{-3}) = \\ &= -\frac{R_0}{4} \sum_{m=0}^M t_m [(c^{-1} c_{m+3} + (m+2) F_{m+3}^{-1}) m - c^{-2} c_{m+2} - \\ &- (m-2)(c^{-1} c_{m+1} + m F_{m+1}^{-1}) + c^{-2} c_m], \\ \int \varepsilon_m^0 \sin m \theta (R_1 - R_2) \frac{d\theta}{\sin \theta} &= \frac{R_0}{2} \sum_{m=0}^M \varepsilon_m (c_{m+1}^{-3} - c_{m-1}^{-3}) \\ &= \frac{R_0}{4} \sum_{m=0}^M \varepsilon_m [-m(c^{-1} s_{m+3} - (m+2) c_{m+3}^{-1} + c_{m+2}^{-2} +) + \\ &+ (c_{m+1}^{-1} - m c_{m+1}^{-1})(m-2) - c^{-2} s_m] \end{aligned} \quad (5)$$

Комбінація інтегралів дозволяє записати:

$$C_{m+2}^{-1} = 2 \sum_{k=(m+1+p)}^{\infty} (-1)^{\frac{m+p+1}{2}-k-1} \frac{s_{2k-p}}{2k-p},$$

де для непарних m $p = 0$, для парних- $p = 1$.

Аналогічним чином через інтеграли визначаються $F_{2n+1}^{-1}, F_{2n}^{-1}$

Інший інтеграл у виразі для ω :

$$\begin{aligned} \int_{\theta_0}^{\theta} (1 + v \cos^2 \theta) m \cos \theta x_m^0 \frac{d\theta}{\sin m \theta} &= -\frac{\pi}{2} \left(1 + \frac{3}{4}v\right) \left(\frac{c_{m+1}^{s_{m+1}}}{m+1} + \frac{c_{m-1}^{s_{m-1}}}{m-1} \right) - \frac{vm}{8} \left(\frac{c_{m+3}^{s_{m+3}}}{m+3} + \frac{c_{m-3}^{s_{m-3}}}{m-3} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

Розглянемо випадок $k \geq 2$ (циклічне навантаження). Використовуючи комплексні уявлення, що дозволяє рівняння для розрахунку на температурні дії запишемо у вигляді:

$$\begin{aligned} G \{ \tilde{U}_c \} + [1 - ic\chi] k^2 \tilde{T}_k &= f_k(\theta), -icG \{ \tilde{T}_k \} + \tilde{T}_k + \chi \tilde{U}_k = R_2 \tilde{q} n k, \\ \chi &= \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \frac{1}{\sin^2 \theta}, G_k = \frac{1}{R_1 R_2 \sin \theta} \left(\frac{R_2^2 \sin \theta}{R_1} \right)_{\theta} - \frac{\chi^2}{R_2 \sin^2 \theta}; \\ \tilde{f}_k(\theta) &= \frac{1}{R_1 R_2 \sin \theta} \{ [(q_{nk} \cos \theta - q_{1k} \sin \theta) R_2^3 \sin^2 \theta]_{\theta} \pm k \tilde{q}_{2k} R_1 R_2^2 \sin^2 \theta \}; \\ q_{jk} &= i q_{jk}^t, (j = 1, 2, \dots, n), q_{1k}^t = \frac{Ehc}{R_1} \left(\frac{1}{R_1} \varepsilon_{k,\theta} - \chi_{k,\theta} \right), q_{2k}^t = \frac{Ehc}{R_2 \sin \theta} \left(\pm k \chi_k \mp \frac{k}{R_2} \varepsilon_k \right), \\ q_{nk}^t &= Ehc \left\{ \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \chi_k + \frac{1}{R_1 R_2 \sin \theta} \times \left[\left(\frac{R_2}{R_1} \sin \theta \varepsilon_{\theta} \right)_{\theta} - \frac{R_1 k^2}{R_2 \sin \theta} \varepsilon_k \right] \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

Для функції $F_2^k = \tilde{U}_k + ick^2 \tilde{T}_k$ вирішальне рівняння виходить із загальної системи при $c \rightarrow 0$:

$$L_k(F_2^k) = f_k - k^2 R_2 \tilde{q}_{nk}, L_k = \frac{1}{R_1 R_2 \sin \theta} \left[\frac{R_2^2 \sin \theta}{R_1} (\dots) \right]_{\theta} - \frac{k^2}{R_1 \sin^2 \theta} (\dots) \quad (8)$$

Для параболоїда, серединна поверхня якого утворена обертанням кривої другого порядку $z = f - x^2/4f$ навколо осі z підстановкою $\xi = 2f \int_{\theta_0}^{\theta} \frac{R_1 d\theta}{R_2^2 \sin \theta} = \frac{1}{2f} \int_{\theta_0}^{\theta} \frac{R_2}{\sin \theta} d\theta$ роздільна здатність рівняння перетворюється на вигляд:

$$F_{2,\xi\xi}^k - k^2 F_2^k = R_1 \sin^2 \theta \left[\tilde{f}_k(\theta) - k^2 R_2 \tilde{q}_{nk} \right] = i \tilde{\Psi}_k \quad (9)$$

Повертаючись до незалежної змінної θ , запишемо загальне рішення (9) у вигляді:

$$\begin{aligned} F_2^k &= (C_1^k + iC_{1q}^k) t g^k \theta + (C_2^k + iC_{2q}^k) c t g^k \theta, \\ C_1 &= A_1 + iB_1, C_2 = A_2 + iB_2, \\ C_{1q}^k &= \frac{1}{2k} \int_{\theta_0}^{\theta} c t g^k \theta \Psi_k(\theta) d\theta, C_{2q}^k = -\frac{1}{2k} \int_{\theta_0}^{\theta} t g^k \theta \Psi_k(\theta) d\theta \end{aligned} \quad (10)$$

Права частина неоднорідного рівняння у вигляді:

$$\begin{aligned} \Psi_k &= R_1 \sin^2 \theta \left[f_k - k^2 R_2 \tilde{q}_{nk} \right] = i \sin \theta \cos \theta \left\{ \left[(\tilde{q}_n \cos \theta - \right. \right. \\ &\left. \left. - \tilde{q}_1 \sin \theta) R_0^2 \frac{\sin^2 \theta}{\cos^3 \theta} \right]_{\theta} \pm k q_{2,\varphi} \frac{R_0^2 \sin^2 \theta}{\cos^5 \theta} - \frac{k^2 R_0^2 \sin^2 \theta}{\cos^4 \theta} \tilde{q}_{nk}, \right. \\ q_1^t (Ehc)^{-1} &= \cos^6 \theta \cdot \varepsilon_{t,\theta} - \cos^3 \theta x_{t,\theta}, \\ q_n^t (Ehc)^{-1} &= (1 + \cos^2 \theta) \cos \theta \chi_t + \frac{\cos^4 \theta}{\sin \theta} \left[(\cos^2 \theta \sin \theta \varepsilon_{t,\theta})_{\theta} - \frac{k^2 \varepsilon_t}{\cos^2 \theta \sin \theta} \right], \\ q_2^t (Ehc)^{-1} &= \left(c t g \theta k \chi_{tk} + \frac{\cos^2 \theta}{\sin \theta} k \varepsilon_t^k \right) \end{aligned} \quad (11)$$

Після проведених перетворень знаходимо:

$$\begin{aligned} \Psi_k &= i \sin^2 \theta \left\{ \chi_t \left[2 \cos \theta (1 + \cos^2 \theta) + \sin^4 \theta - \frac{k^2}{\cos \theta} \right] \right. \\ &\quad \left. + \chi_{t,\theta} \sin \theta (4 \cos^2 \theta + 1) - \sin^2 \theta \cos \theta \chi_{t,\theta\theta} \right\} + \\ &\quad + \frac{k^2 (k^2 - \sin^2 \theta)}{\cos^2 \theta} \varepsilon_t - [k^2 \sin \theta \cos \theta (3 \cos^2 \theta - 1) + (2\theta \cos^2 \theta - 9) \cos^3 \theta \sin^3 \theta] \varepsilon_{t,\theta} - \\ &\quad - \sin^2 \theta \cos^2 \theta (k^2 + 7 \sin \theta \cos^2 \theta) \varepsilon_{t,\theta} + \cos^5 \theta \sin^3 \theta \varepsilon_{t,\theta\theta} \end{aligned} \quad (12)$$

Для аналітичного обчислення інтегралів приватних рішень:

$$\varepsilon_t^k = \sum_{\substack{\sin \\ \cos m \theta, \chi_t^k = \sum \chi_{tm}^k \cos m \theta}} \varepsilon_{tm}^k \quad (13)$$

потім використовувати залежності:

$$\begin{aligned} \sin m \theta &= \sum_{n=1}^{n+1} (-1)^{n+1} \binom{m}{2n-1} \cos^{m-2n+1} \theta \sin^{2n-1} \theta, \cos m \theta \\ &= \cos^m \theta + \sum_{n=1}^m (-1)^n \binom{m}{2n} \cos^{m-2n} \theta \sin^{2n} \theta \end{aligned} \quad (14)$$

При підстановці цих виразів у (13), а потім у обчисленні (12) отримаємо однотипні інтеграли виду $I_q^p = \int \sin^p x \cos^q x dx$.

Рекурентні формули для обчислення цих інтегралів у загальному вигляді надаються залежностями

$$I_q^p = f_1(I_{q+2}^{p-2}) = f_2(I_q^{p-2}) = f_3(I_q^{p+2}) = f_4(I_{q-2}^{p+2}) = f_5(I_{q-2}^p) = f_6(I_{q+2}^p) \quad (15)$$

Для практичних обчислень важливо з'ясувати рекурентні зв'язки та максимально ефективно їх використовувати з урахуванням такої послідовності дій:

- а) внутрішній цикл підсумовування за n виразів $\bar{n} = n + 1, \bar{p} = p + 2, \bar{q} = q - 2$;
- б) підсумовування розкладань за різними гармоніками від θ : $\bar{m} = m + 1, \bar{p} = p, \bar{q} = q + 1$;
- в) перехід до нової гармоніки за координатами k : $\bar{k} = k + 1, \bar{p} = p \pm 1, \bar{q} = q \mp 1$.

Отже, обчислення розпаду на послідовне визначення інтегралів парних та непарних компонентів розкладів по k і m .

Висновки з даного дослідження

і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Аналіз 652 публікацій у базі Scopus за останніх 10 років засвідчив стабільне зростання наукового інтересу до тематики відбиваючих решіток та біомедичних композитних матеріалів, з піком

активності у 2024 році (114 публікацій). Географічний розподіл досліджень демонструє лідерство Китаю (32,5%), США (21,1%) та європейських країн. Найперспективнішою технологією виготовлення армованих композитних покриттів визначено електродугове напилення, що забезпечує високу міцність, термостійкість та корозійну стійкість. Порівняльний аналіз матеріалів показав оптимальність використання міді для максимальної ефективності відбиття в антенних системах, алюмінію – для легких конструкцій, сталі – для високоміцних застосувань.

Композитні матеріали з вуглецевими нанотрубками (CNT) та графеновими пластинками (GPL) демонструють значний потенціал не лише для структурно-оптимізованих антенних рішень, але й для медичних застосувань, зокрема у створенні високочутливих електродів для електрокардіографічного моніторингу з високим співвідношенням сигнал/шум (до 40 дБ). Дослідження виявило синергію між технологіями виготовлення антенних решіток та біомедичних електродів. Графенові композити з CNT та GNP забезпечують стабільний електричний контакт з біологічними тканинами при тривалому моніторингу ЕКГ, при цьому зберігаючи високу електропровідність, необхідну для антенних систем. Полімерні композити з домішками срібла та міді, що використовуються в рефлекторах, виявляють високу ефективність як матеріали для сухих електродів ЕКГ завдяки поєднанню біосумісності та відмінних електричних властивостей.

Розроблена математична модель напружено-деформованого стану параболічної оболонки дзеркала антени дозволила визначити критичний вплив температурних градієнтів на геометричну стабільність відбиваючої поверхні. Результати чисельного моделювання підтвердили необхідність урахування анізотропних властивостей композитних матеріалів при проєктуванні термостабільних антенних конструкцій. Для забезпечення експлуатаційної надійності систем рекомендуються: застосування композитів з низьким коефіцієнтом теплового розширення; впровадження заходів активної термостабілізації критичних ділянок; оптимізація структурних параметрів відповідно до специфічних умов експлуатації.

Отримані результати створюють науково-методологічну основу для інноваційного розвитку технологій, що поєднують високоефективні антенні системи та медичні пристрої нового покоління, забезпечуючи теоретичне підґрунтя для подальших досліджень у галузі багатофункціональних композитних матеріалів спеціального призначення з можливістю застосування як в аерокосмічній техніці, так і в електрокардіографічній діагностиці.

Література

1. Lee, E. K., Baruah, R. K., Bhamra, H., Kim, Y.-J., & Yoo, H. (2021). Recent advances in electrode development for biomedical applications. *Biomedical Engineering Letters*, 11(2), 107–115. <https://doi.org/10.1007/s13534-021-00189-6>
2. Stauffer, F., Thielen, M., Sauter, C., Chardonens, S., Bachmann, S., Tybrandt, K., Peters, C., Hierold, C., & Vörös, J. (2018). Skin Conformal Polymer Electrodes for Clinical ECG and EEG Recordings. *Advanced Healthcare Materials*, 7(7). <https://doi.org/10.1002/adhm.201700994>
3. Monzheran D. Monitoring of the bearing capacity of bridge structures during operation / Monzheran D., Sikorskyi O., Kovalenko Y. // *Herald of Khmelnytskyi national university*, Issue 2, 2025 (349) – S. 272–277. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-349-40>
4. Dorofiev O. Mathematical modeling of the interaction of machine elements and mechanisms with the discrete environment / Dorofiev O., Bahrii O., Dorofiev Y. // *Herald of Khmelnytskyi national university*, Issue 2, 2025 (349) – S. 144–149. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-349-21>
5. Melentiev, R., Yudhanto, A., Tao, R., Vuchkov, T., & Lubineau, G. (2022). Metallization of polymers and composites: State-of-the-art approaches. In *Materials & Design* (Vol. 221, p. 110958). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110958>
6. Celik, N., Manivannan, N., Strudwick, A., & Balachandran, W. (2016). Graphene-Enabled Electrodes for Electrocardiogram Monitoring. *Nanomaterials*, 6(9), 156. <https://doi.org/10.3390/nano6090156>
7. Kolodziej, L., Iwasińska-Kowalska, O., Wróblewski, G., Giżewski, T., Jakubowska, M., & Lekawa-Raus, A. (2024). Hydrogels and Carbon Nanotubes: Composite Electrode Materials for Long-Term Electrocardiography Monitoring. *Journal of Functional Biomaterials*, 15(5), 113. <https://doi.org/10.3390/jfb15050113>
8. Lou, C., Li, R., Li, Z., Liang, T., Wei, Z., Run, M., Yan, X., & Liu, X. (2016). Flexible Graphene Electrodes for Prolonged Dynamic ECG Monitoring. *Sensors*, 16(11), 1833. <https://doi.org/10.3390/s16111833>
9. Gandhi, B., & Raghava, N. S. (2022). Graphene and graphene nanohybrid composites-based electrodes for physiological sensing applications. *Biomedical Microdevices*, 24(3). <https://doi.org/10.1007/s10544-022-00630-2>
10. Supar, K., & Ahmad, H. (2017). XFEM Modelling of Multi-holes Plate with Single-row and Staggered Holes Configurations. *MATEC Web of Conferences*, 103, 2031. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710302031>
11. Attahu, C. Y., Yang, J., Wong, K. H., & Thein, C. K. (2022). Flexural and shear strength properties

of unidirectional carbon fiber reinforced polymer composite interleaved with recycled carbon fiber and short virgin aramid fiber non-woven mats. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 1225(1), 12005. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1225/1/012005>

12. Caliman, R. (2016). Friction Behaviour of Polymeric Composite Materials Mixed with Carbon Fibers Having Different Orientations Layout. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 133, 12009. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/133/1/012009>

13. Dubynyak T., Nevozhai V., Remez A., Bukhovets V., Senyk A. (2024) Analysis of the accuracy, stiffness, and stability of antennas using simulation modeling. Scientific Journal of TNTU, (vol 115, no 3, pp. 30–43). https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2024.03.030

14. Rauf, S., Bilal, R. M., Li, J., Vaseem, M., Ahmad, A. N., & Shamim, A. (2024). Fully Screen-Printed and Gentle-to-Skin Wet ECG Electrodes with Compact Wireless Readout for Cardiac Diagnosis and Remote Monitoring. ACS Nano, 18(14), 10074–10087. <https://doi.org/10.1021/acsnano.3c12477>

15. Joutsen, A., Cömert, A., Kaappa, E., Vanhatalo, K., Riistama, J., Vehkaoja, A., & Eskola, H. (2024). ECG signal quality in intermittent long-term dry electrode recordings with controlled motion artifacts. Scientific Reports, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56595-0>

16. Hossain, Md. M., Li, B. M., Sennik, B., Jur, J. S., & Bradford, P. D. (2022). Adhesive free, conformable and washable carbon nanotube fabric electrodes for biosensing. Npj Flexible Electronics, 6(1). <https://doi.org/10.1038/s41528-022-00230-3>

17. Romero, F. J., Castillo, E., Rivadeneyra, A., Toral-Lopez, A., Becherer, M., Ruiz, F. G., Rodriguez, N., & Morales, D. P. (2019). Inexpensive and flexible nanographene-based electrodes for ubiquitous electrocardiogram monitoring. Npj Flexible Electronics, 3(1). <https://doi.org/10.1038/s41528-019-0056-2>

18. Amsalu, C., Negasa, D., & Merga, A. (2024). Numerical analysis of fiber reinforced composite material for structural Component Application. Heliyon, 10(18). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37698>

19. Huang, Z. (2019). Micromechanical Failure Analysis of Unidirectional Composites. In IntechOpen eBooks. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.80807>

20. M, M., Sagadevan, S., E, B., Fatimah, I., Lett, J. A., Moharana, S., Garg, S., & Al-Anber, M. A. (2024). Enhancing biocompatibility and functionality: Carbon nanotube-polymer nanocomposites for improved biomedical applications. Journal of Drug Delivery Science and Technology, 99, 105958. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2024.105958>

21. Naito, T., Urushiyama, Y., & Bruyneel, M. (2015). Strength Analysis of CFRP Composite Material Considering Multiple Fracture Modes. SAE Technical Papers on CD-ROM/SAE Technical Paper Series. <https://doi.org/10.4271/2015-01-0693>

22. Ye, J., Qiu, Y., Chen, X., He, Y., & Zhai, Z. (2015). A Study of Failure Strength for Fiber-Reinforced Composite Laminates with Consideration of Interface. Advances in Materials Science and Engineering, 2015, 1. <https://doi.org/10.1155/2015/158578>

23. Satija, U., Ramkumar, B., & Manikandan, M. S. (2018). A Review of Signal Processing Techniques for Electrocardiogram Signal Quality Assessment. IEEE Reviews in Biomedical Engineering, 11, 36–52. <https://doi.org/10.1109/rbme.2018.2810957>

24. Albaba, A., Simões-Capela, N., Wang, Y., Hendriks, R. C., De Raedt, W., & Van Hoof, C. (2021). Assessing the signal quality of electrocardiograms from varied acquisition sources: A generic machine learning pipeline for model generation. Computers in Biology and Medicine, 130, 104164. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2020.104164>

25. Zhang, L., & Liu, J. (2021). Research Progress of ECG Monitoring Equipment and Algorithms Based on Polymer Materials. Micromachines, 12(11), 1282. <https://doi.org/10.3390/mi12111282>

26. Todor, M., Bulei, C., Hepuț, T., & Kiss, I. (2018). Consolidated Composites with Natural Textile Fabrics. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 416, 12098. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/416/1/012098>

27. Tsai, S. W., & Hahn, H. T. (2018). Introduction to Composite Materials. In Routledge eBooks. Informa. <https://doi.org/10.1201/9780203750148>

28. Vu, Q. T. L., Seon, G., Ghaffari, S., Makeev, A., Lachaud, F., Charlotte, M., & Gourinat, Y. (2023). Evaluating Residual Stress in Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP) at Microscale Using Fiber Push-Out Experiment and Finite Element Modeling. Polymers, 15(12), 2596. <https://doi.org/10.3390/polym15122596>

29. Kwon, Y. W., & Darcy, J. (2017). Failure criteria for fibrous composites based on multiscale modeling. Multiscale and Multidisciplinary Modeling Experiments and Design, 1(1), 3. <https://doi.org/10.1007/s41939-017-0002-8>

30. Canal, L. P., González, C., Segurado, J., & LLorca, J. (2012). Intraply fracture of fiber-reinforced composites: Microscopic mechanisms and modeling. Composites Science and Technology, 72(11), 1223. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.04.008>

31. Pavan, R. C., Creus, G. J., & Maghous, S. (2009). A simplified approach to continuous damage of composite materials and micromechanical analysis. Composite Structures, 91(1), 84.

<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.04.044>

32. Kaddaha, M. A., Younès, R., & Lafon, P. (2021). Homogenization Method to Calculate the Stiffness Matrix of Laminated Composites. *Eng—Advances in Engineering*, 2(4), 416. <https://doi.org/10.3390/eng2040026>

33. Dubynyak T., Nevozhai V., Remez A., Poshvyak M., Mykulyk P. (2024) Formation of reflective shells by electric arc spraying and application of composite material to the punch. *Scientific Journal of TNTU*, (vol. 114, no. 2, pp. 119–134). https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2024.02.119

34. Tabiei, A., & Ivanov, I. (2002). Materially and geometrically non-linear woven composite micro-mechanical model with failure for finite element simulations. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 39(2), 175. [https://doi.org/10.1016/s0020-7462\(02\)00067-7](https://doi.org/10.1016/s0020-7462(02)00067-7)

35. Johnson, A., & David, M. (2011). Failure Mechanisms and Energy Absorption in Composite Elements under Axial Crush. *Key Engineering Materials*, 638. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.488-489.638>

36. Deliou, A., & Bouchoucha, B. (2022). Mechanical behavior of unidirectional composites according different failure criteria. *Frattura Ed Integrità Strutturale*, 16(60), 30. <https://doi.org/10.3221/igf-esis.60.03>

37. Zreid, I., & Kaliske, M. (2014). Regularization of microplane damage models using an implicit gradient enhancement. *International Journal of Solids and Structures*, 51, 3480. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2014.06.020>

38. Nerilli, F., Tarquini, L., Marino, M., & Vairo, G. (2015). Numerical modeling of failure modes in bolted composite laminates. *AIP Conference Proceedings*, 1648, 570019. <https://doi.org/10.1063/1.4912805>

39. Gandhi, B., & Raghava, N. S. (2022). Graphene and graphene nanohybrid composites-based electrodes for physiological sensing applications. *Biomedical Microdevices*, 24(3). <https://doi.org/10.1007/s10544-022-00630-2>

40. Lou, C., Li, R., Li, Z., Liang, T., Wei, Z., Run, M., Yan, X., & Liu, X. (2016). Flexible Graphene Electrodes for Prolonged Dynamic ECG Monitoring. *Sensors*, 16(11), 1833. <https://doi.org/10.3390/s16111833>

41. L. Mosiy, A. Sverstiuk. Methods of modeling and classification of electrocardiograms. *Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production*. 2025. No. 58. P. 104–115. DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-58-12>

42. Abubakar, S. A., Sverstyuk, A. (2024). Analytical review of publications on machine learning methods in oncology and approach to evaluating their quality. In *Computer systems and information technologies* (Issue 1, pp. 6–16). Khmelnytskyi National University. <https://doi.org/10.31891/csit-2024-1-1>

43. Cho, J.-R. (2022). Numerical Evaluation of Stress Intensity Factors in Functionally Graded CNTRC Plates. In *KSCE Journal of Civil Engineering* (Vol. 26, Issue 11, pp. 4563–4572). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1007/s12205-022-1237>

44. Wen, L., Hu, W., Pang, B., Luo, Q., & Gao, S. (2024). Spoof Surface Plasmon Polariton-Based Antenna and Array by Exciting Both Even- and Odd-Mode Resonances. In *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (Vol. 72, Issue 2, pp. 1593–1602). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <https://doi.org/10.1109/tap.2023.3335840>

45. Sun, H.-H., Ding, C., Zhu, H., Jones, B., & Guo, Y. J. (2019). Suppression of Cross-Band Scattering in Multiband Antenna Arrays. In *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (Vol. 67, Issue 4, pp. 2379–2389). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <https://doi.org/10.1109/tap.2019.2891707>

46. Christofi, I., Hadjiloizi, D. A., Kalamkarov, A. L., & Georgiades, A. V. (2021). Micromechanical analysis of thermoelastic and magnetoelectric composite and reinforced shells. In *Composite Structures* (Vol. 259, p. 113426). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113426>

47. Biron, M. (2018). Future Prospects for Thermoplastics and Thermoplastic Composites. In *Thermoplastics and Thermoplastic Composites* (pp. 1083–1126). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102501-7.00009-6>

48. Nigam, S., Mahapatra, S. S., & Patel, S. K. (2018). Study of Various Aspects of Copper Coating on ABS Plastic by Electric Arc Spraying. In *Materials Today: Proceedings* (Vol. 5, Issue 2, pp. 8446–8453). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.540>

49. Kang, T. W., Lee, J., Kwon, Y., Lee, Y. J., & Yeo, W. (2024). Recent Progress in the Development of Flexible Wearable Electrodes for Electrocardiogram Monitoring During Exercise. *Advanced NanoBiomed Research*, 4(8). <https://doi.org/10.1002/anbr.202300169>

References

1. Lee, E. K., Baruah, R. K., Bhamra, H., Kim, Y.-J., & Yoo, H. (2021). Recent advances in electrode development for biomedical applications. *Biomedical Engineering Letters*, 11(2), 107–115. <https://doi.org/10.1007/s13534-021-00189-6>
2. Stauffer, F., Thielen, M., Sauter, C., Chardonens, S., Bachmann, S., Tybrandt, K., Peters, C., Hierold, C., & Vörös, J. (2018). Skin Conformal Polymer Electrodes for Clinical ECG and EEG Recordings. *Advanced Healthcare Materials*, 7(7). <https://doi.org/10.1002/adhm.201700994>
3. Monzheran D. Monitoring of the bearing capacity of bridge structures during operation / Monzheran D., Sikorskyi O.,

Kovalenko Y. // Herald of Khmelnytskyi national university, Issue 2, 2025 (349) – S. 272–277. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-349-40>

4. Dorofieiev O. Mathematical modeling of the interaction of machine elements and mechanisms with the discrete environment / Dorofieiev O., Bahrii O., Dorofieiev Y. // Herald of Khmelnytskyi national university, Issue 2, 2025 (349) – S. 144–149. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-349-21>
5. Melentiev, R., Yudhanto, A., Tao, R., Vuchkov, T., & Lubineau, G. (2022). Metallization of polymers and composites: State-of-the-art approaches. In *Materials & Design* (Vol. 221, p. 110958). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110958>
6. Celik, N., Manivannan, N., Strudwick, A., & Balachandran, W. (2016). Graphene-Enabled Electrodes for Electrocardiogram Monitoring. *Nanomaterials*, 6(9), 156. <https://doi.org/10.3390/nano6090156>
7. Kolodziej, L., Iwaszńska-Kowalska, O., Wróblewski, G., Giżewski, T., Jakubowska, M., & Lekawa-Raus, A. (2024). Hydrogels and Carbon Nanotubes: Composite Electrode Materials for Long-Term Electrocardiography Monitoring. *Journal of Functional Biomaterials*, 15(5), 113. <https://doi.org/10.3390/jfb15050113>
8. Lou, C., Li, R., Li, Z., Liang, T., Wei, Z., Run, M., Yan, X., & Liu, X. (2016). Flexible Graphene Electrodes for Prolonged Dynamic ECG Monitoring. *Sensors*, 16(11), 1833. <https://doi.org/10.3390/s16111833>
9. Gandhi, B., & Raghava, N. S. (2022). Graphene and graphene nanohybrid composites-based electrodes for physiological sensing applications. *Biomedical Microdevices*, 24(3). <https://doi.org/10.1007/s10544-022-00630-2>
10. Supar, K., & Ahmad, H. (2017). XFEM Modelling of Multi-holes Plate with Single-row and Staggered Holes Configurations. *MATEC Web of Conferences*, 103, 2031. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710302031>
11. Attahu, C. Y., Yang, J., Wong, K. H., & Thein, C. K. (2022). Flexural and shear strength properties of unidirectional carbon fiber reinforced polymer composite interleaved with recycled carbon fiber and short virgin aramid fiber non-woven mats. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 1225(1), 12005. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1225/1/012005>
12. Caliman, R. (2016). Friction Behaviour of Polymeric Composite Materials Mixed with Carbon Fibers Having Different Orientations Layout. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 133, 12009. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/133/1/012009>
13. Dubyniak T., Nevozhai V., Remez A., Bukhovets V., Senyk A. (2024) Analysis of the accuracy, stiffness, and stability of antennas using simulation modeling. *Scientific Journal of TNTU*, (vol 115, no 3, pp. 30–43). https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2024.03.030
14. Rauf, S., Bilal, R. M., Li, J., Vaseem, M., Ahmad, A. N., & Shamim, A. (2024). Fully Screen-Printed and Gentle-to-Skin Wet ECG Electrodes with Compact Wireless Readout for Cardiac Diagnosis and Remote Monitoring. *ACS Nano*, 18(14), 10074–10087. <https://doi.org/10.1021/acsnano.3c12477>
15. Joutsen, A., Cömert, A., Kaappa, E., Vanhatalo, K., Riistama, J., Vehkaoja, A., & Eskola, H. (2024). ECG signal quality in intermittent long-term dry electrode recordings with controlled motion artifacts. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56595-0>
16. Hossain, Md. M., Li, B. M., Sennik, B., Jur, J. S., & Bradford, P. D. (2022). Adhesive free, conformable and washable carbon nanotube fabric electrodes for biosensing. *Npj Flexible Electronics*, 6(1). <https://doi.org/10.1038/s41528-022-00230-3>
17. Romero, F. J., Castillo, E., Rivadeneyra, A., Toral-Lopez, A., Becherer, M., Ruiz, F. G., Rodriguez, N., & Morales, D. P. (2019). Inexpensive and flexible nanographene-based electrodes for ubiquitous electrocardiogram monitoring. *Npj Flexible Electronics*, 3(1). <https://doi.org/10.1038/s41528-019-0056-2>
18. Amsalu, C., Negasa, D., & Merga, A. (2024). Numerical analysis of fiber reinforced composite material for structural Component Application. *Heliyon*, 10(18). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37698>
19. Huang, Z. (2019). Micromechanical Failure Analysis of Unidirectional Composites. In *IntechOpen eBooks*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.80807>
20. M, M., Sagadevan, S., E, B., Fatimah, I., Lett, J. A., Moharana, S., Garg, S., & Al-Anber, M. A. (2024). Enhancing biocompatibility and functionality: Carbon nanotube-polymer nanocomposites for improved biomedical applications. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 99, 105958. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2024.105958>
21. Naito, T., Urushiyama, Y., & Bruyneel, M. (2015). Strength Analysis of CFRP Composite Material Considering Multiple Fracture Modes. *SAE Technical Papers on CD-ROM/SAE Technical Paper Series*. <https://doi.org/10.4271/2015-01-0693>
22. Ye, J., Qiu, Y., Chen, X., He, Y., & Zhai, Z. (2015). A Study of Failure Strength for Fiber-Reinforced Composite Laminates with Consideration of Interface. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, 1. <https://doi.org/10.1155/2015/158578>
23. Satija, U., Ramkumar, B., & Manikandan, M. S. (2018). A Review of Signal Processing Techniques for Electrocardiogram Signal Quality Assessment. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, 11, 36–52. <https://doi.org/10.1109/rbme.2018.2810957>
24. Albaba, A., Simões-Capela, N., Wang, Y., Hendriks, R. C., De Raedt, W., & Van Hoof, C. (2021). Assessing the signal quality of electrocardiograms from varied acquisition sources: A generic machine learning pipeline for model generation. *Computers in Biology and Medicine*, 130, 104164. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2020.104164>
25. Zhang, L., & Liu, J. (2021). Research Progress of ECG Monitoring Equipment and Algorithms Based on Polymer Materials. *Micromachines*, 12(11), 1282. <https://doi.org/10.3390/mi12111282>
26. Todor, M., Bulei, C., Heput, T., & Kiss, I. (2018). Consolidated Composites with Natural Textile Fabrics. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 416, 12098. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/416/1/012098>
27. Tsai, S. W., & Hahn, H. T. (2018). Introduction to Composite Materials. In *Routledge eBooks*. Informa. <https://doi.org/10.1201/9780203750148>
28. Vu, Q. T. L., Seon, G., Ghaffari, S., Makeev, A., Lachaud, F., Charlotte, M., & Gourinat, Y. (2023). Evaluating Residual Stress in Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP) at Microscale Using Fiber Push-Out Experiment and Finite Element Modeling. *Polymers*, 15(12), 2596. <https://doi.org/10.3390/polym15122596>
29. Kwon, Y. W., & Darcy, J. (2017). Failure criteria for fibrous composites based on multiscale modeling. *Multiscale and Multidisciplinary Modeling Experiments and Design*, 1(1), 3. <https://doi.org/10.1007/s41939-017-0002-8>
30. Canal, L. P., González, C., Segurado, J., & LLorca, J. (2012). Intraply fracture of fiber-reinforced composites: Microscopic mechanisms and modeling. *Composites Science and Technology*, 72(11), 1223. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.04.008>
31. Pavan, R. C., Creus, G. J., & Maghous, S. (2009). A simplified approach to continuous damage of composite materials and micromechanical analysis. *Composite Structures*, 91(1), 84. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.04.044>
32. Kaddaha, M. A., Younès, R., & Lafon, P. (2021). Homogenization Method to Calculate the Stiffness Matrix of Laminated Composites. *Eng—Advances in Engineering*, 2(4), 416. <https://doi.org/10.3390/eng2040026>
33. Dubyniak T., Nevozhai V., Remez A., Poshvyak M., Mykulyk P. (2024) Formation of reflective shells by electric arc spraying and application of composite material to the punch. *Scientific Journal of TNTU*, (vol. 114, no. 2, pp. 119–134). https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2024.02.119
34. Tabiei, A., & Ivanov, I. (2002). Materially and geometrically non-linear woven composite micro-mechanical model with failure for finite element simulations. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 39(2), 175. [https://doi.org/10.1016/s0020-7462\(02\)00067-7](https://doi.org/10.1016/s0020-7462(02)00067-7)
35. Johnson, A., & David, M. (2011). Failure Mechanisms and Energy Absorption in Composite Elements under Axial Crush. *Key Engineering Materials*, 638. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.488-489.638>

36. Deliou, A., & Bouchouicha, B. (2022). Mechanical behavior of unidirectional composites according different failure criteria. *Frattura Ed Integrità Strutturale*, 16(60), 30. <https://doi.org/10.3221/igf-esis.60.03>
37. Zreid, I., & Kaliske, M. (2014). Regularization of microplane damage models using an implicit gradient enhancement. *International Journal of Solids and Structures*, 51, 3480. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2014.06.020>
38. Nerilli, F., Tarquini, L., Marino, M., & Vairo, G. (2015). Numerical modeling of failure modes in bolted composite laminates. *AIP Conference Proceedings*, 1648, 570019. <https://doi.org/10.1063/1.4912805>
39. Gandhi, B., & Raghava, N. S. (2022). Graphene and graphene nanohybrid composites-based electrodes for physiological sensing applications. *Biomedical Microdevices*, 24(3). <https://doi.org/10.1007/s10544-022-00630-2>
40. Lou, C., Li, R., Li, Z., Liang, T., Wei, Z., Run, M., Yan, X., & Liu, X. (2016). Flexible Graphene Electrodes for Prolonged Dynamic ECG Monitoring. *Sensors*, 16(11), 1833. <https://doi.org/10.3390/s16111833>
41. L. Mosiy, A. Sverstiuk. Methods of modeling and classification of electrocardiograms. *Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production*. 2025. No. 58. P. 104–115. DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-58-12>
42. Abubakar, S. A., Sverstyuk, A. (2024). Analytical review of publications on machine learning methods in oncology and approach to evaluating their quality. In *Computer systems and information technologies* (Issue 1, pp. 6–16). Khmelnytskyi National University. <https://doi.org/10.31891/csit-2024-1-1>
43. Cho, J.-R. (2022). Numerical Evaluation of Stress Intensity Factors in Functionally Graded CNTRC Plates. In *KSCE Journal of Civil Engineering* (Vol. 26, Issue 11, pp. 4563–4572). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1007/s12205-022-1237>
44. Wen, L., Hu, W., Pang, B., Luo, Q., & Gao, S. (2024). Spoof Surface Plasmon Polariton-Based Antenna and Array by Exciting Both Even- and Odd-Mode Resonances. In *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (Vol. 72, Issue 2, pp. 1593–1602). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <https://doi.org/10.1109/tap.2023.3335840>
45. Sun, H.-H., Ding, C., Zhu, H., Jones, B., & Guo, Y. J. (2019). Suppression of Cross-Band Scattering in Multiband Antenna Arrays. In *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (Vol. 67, Issue 4, pp. 2379–2389). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <https://doi.org/10.1109/tap.2019.2891707>
46. Christofi, I., Hadjiloizi, D. A., Kalamkarov, A. L., & Georgiades, A. V. (2021). Micromechanical analysis of thermoelastic and magnetoelectric composite and reinforced shells. In *Composite Structures* (Vol. 259, p. 113426). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113426>
47. Biron, M. (2018). Future Prospects for Thermoplastics and Thermoplastic Composites. In *Thermoplastics and Thermoplastic Composites* (pp. 1083–1126). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102501-7.00009-6>
48. Nigam, S., Mahapatra, S. S., & Patel, S. K. (2018). Study of Various Aspects of Copper Coating on ABS Plastic by Electric Arc Spraying. In *Materials Today: Proceedings* (Vol. 5, Issue 2, pp. 8446–8453). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.540>
49. Kang, T. W., Lee, J., Kwon, Y., Lee, Y. J., & Yeo, W. (2024). Recent Progress in the Development of Flexible Wearable Electrodes for Electrocardiogram Monitoring During Exercise. *Advanced NanoBiomed Research*, 4(8). <https://doi.org/10.1002/anbr.202300169>