
ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

УДК 681.586.5

І.В. ВІШТАК, О.Ю. КОНОНОВ

ОГЛЯД ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ БРЕГІВСЬКИХ ОПТИЧНИХ СЕНСОРІВ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НАНОКОМПОЗИТІВ В БІОІНЖЕНЕРІЇ

*Вінницький національний технічний університет, 21021, Хмельницьке шосе, 95,
м. Вінниця, Україна*

Анотація. Оцінювання механічних властивостей нанокompозитних матеріалів є важливою науково-технічною задачею у зв'язку з їх широким впровадженням у біомедицинській інженерії, енергетиці, авіакосмічній та автомобільній галузях. Забезпечення достовірного контролю деформацій, напружень, модуля пружності та процесів пошкодження на мікро- і нанорівнях потребує застосування високочутливих методів неруйнівного моніторингу, сумісних з матеріальною структурою об'єкта. У статті виконано систематичний огляд сучасних досліджень, присвячених застосуванню брегівських оптичних сенсорів (Fiber Bragg Gratings, FBG) для оцінювання механічних властивостей нанокompозитів. Розглянуто фізичні принципи роботи FBG, механізми передавання деформації від нанокompозитної матриці до оптичного волокна, а також методи інтеграції сенсорів у композиційні матеріали. Особливу увагу приділено порівняльному аналізу FBG, реалізованих у скляних та полімерних оптичних волокнах, з акцентом на механічну сумісність, чутливість та стабільність вимірювань. Проаналізовано можливості використання FBG для визначення деформацій, напружень, модуля Юнга, коефіцієнта Пуассона, а також для моніторингу ініціації та розвитку пошкоджень у нанокompозитах. Показано, що брегівські оптичні сенсори мають суттєві переваги порівняно з традиційними тензометричними методами, зокрема електромагнітну нечутливість, можливість мультиплексування та довготривалу метрологічну стабільність. Особливо розглянуто перспективи застосування FBG у медицині та біоінженерії, включно з *in situ* та *in vivo* моніторингом механічних властивостей біосумісних і біорозкладних нанокompозитів. Визначено ключові напрями подальших досліджень, пов'язані з розвитком полімерних і функціоналізованих FBG, інтеграцією з методами розподіленого сенсорства та використанням цифрових двійників матеріалів.

Ключові слова: брегівські оптичні сенсори; Fiber Bragg Gratings; нанокompозити; механічні властивості; деформація; напруження; полімерні оптичні волокна; моніторинг; контроль.

Abstract. The assessment of the mechanical properties of nanocomposite materials is an important scientific and technical task due to their widespread implementation in biomedical engineering, energy, aerospace and automotive industries. Ensuring reliable control of deformations, stress, elastic modulus and damage processes at the micro- and nano-levels requires the use of highly sensitive non-destructive monitoring methods compatible with the material structure of the object. The article provides a systematic review of modern research on the use of Bragg optical sensors (Fiber Bragg Gratings, FBG) for assessing the mechanical properties of nanocomposites. The physical principles of FBG operation, mechanisms of strain transfer from the nanocomposite matrix to the optical fiber, as well as methods for integrating sensors into composite materials are considered. Special attention is paid to the comparative analysis of FBGs polymerized in glass and optical fibers, with an emphasis on mechanical compatibility, sensitivity and stability of measurements. The possibilities of using FBGs for determining deformations, stresses, Young's modulus, Poisson's ratio, as well as for monitoring the initiation and development of damage in nanocomposites are analyzed. It is shown that Bragg optical sensors have significant advantages compared to traditional strain gauge methods, in particular electromagnetic insensitivity, long-term multiplexing and metrological stability. The prospects for the application of FBGs in medicine and bioengineering are especially important, including *in situ* and *in vivo* monitoring of the mechanical properties of biocompatible and biodegradable nanocomposites. Key areas of further research related to the development of polymer and functionalized FBGs, integration with distributed sensing methods and the use of digital twins of materials are identified.

Keywords: Bragg optical sensors; fiber Bragg gratings; nanocomposites; mechanical properties; deformation; stress; polymer optical fibers; monitoring; control.

DOI: 10.31649/1681-7893-2026-51-1-243-258

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

ВСТУП

Оцінювання механічних властивостей нанокompatитів є однією з ключових задач сучасного матеріалознавства, з огляду на стрімке зростання застосувань цих матеріалів у біомедичній інженерії, енергетиці, авіакосмічній техніці та автомобілебудуванні. Надійний контроль таких параметрів, як модуль Юнга, деформація, залишкові напруження та пошкодження на мікро- і нанорівні, потребує використання високочутливих, стабільних і сумісних з матеріалом методів неруйнівного контролю. У цьому контексті волоконно-оптичні сенсори, зокрема бреггівські оптичні сенсори (Fiber Bragg Gratings, FBG), розглядаються як один із найбільш перспективних інструментів для моніторингу механічної поведінки нанокompatитів у реальному часі.

Традиційно FBG-сенсори реалізуються на основі скляних оптичних волокон, які характеризуються високою стабільністю оптичних властивостей та низькими втратами сигналу (~0,02 дБ/км) [1]. Водночас значна жорсткість і крихкість скляних волокон обмежує їхню механічну сумісність з полімерними та нанокompatитними матрицями, що може призводити до концентрації напружень, локальної делямінації та зниження точності вимірювань під час циклічних або великих деформацій. Ці обмеження стимулювали активний інтерес до полімерних оптичних волокон (Polymer Optical Fibers, POF) як альтернативної платформи для сенсорних систем.

Ринок полімерних оптичних волокон демонструє стабільне зростання з середнім річним темпом близько 11% у період 2010-2019 років, охоплюючи автомобільний, промисловий, медичний, військовий, офісний, житловий та архітектурний сектори [2]. Хоча основними застосуваннями POF залишаються передача даних та освітлення на короткі відстані, частка сенсорних застосувань поступово зростає, що підтверджується збільшенням кількості наукових публікацій за запитом «POF sensor» упродовж останніх років [3]. Особливо помітні сплески дослідницького інтересу у 2016-2017 та 2020-2021 роках, які пов'язують із впровадженням волоконно-оптичних технологій в автомобільну промисловість, розвитком адитивних технологій виготовлення волокон та розширенням медичних і біосенсорних застосувань [3,4].

Порівняно зі скляними волокнами, полімерні оптичні волокна зазвичай мають більший діаметр сердечника (від ~250 мкм до 1 мм), є багатомодовими та характеризуються вищим оптичним ослабленням (понад 0,1 дБ/м для PMMA (поліметилметакрилат (*polymethyl methacrylate*)) з мінімумом у спектральному діапазоні 600-700 нм [5]. Водночас ключовою перевагою POF є їхні механічні властивості – значно нижчий модуль Юнга, висока гнучкість і здатність до великих пружних деформацій. Саме ці характеристики роблять полімерні волокна особливо привабливими для інтеграції в нанокompatити, де механічна сумісність сенсора з матрицею є критично важливою для достовірного вимірювання напружено-деформованого стану [6,7].

Асортимент матеріалів для виготовлення POF постійно розширюється і включає як класичний полі (метилметакрилат) (PMMA) [5], так і фторовані полімери з низькими втратами (CYTOP) [8], циклічні олефінові полімери (TOPAS, ZEONEX) [9,10], ударостійкі та придатні до 3D-друку матеріали (полікарбонат) [11], а також біорозкладні полімери, зокрема полі-D,L-молочну кислоту (PDLLA) [12]. Розвиток таких матеріалів дозволяє цілеспрямовано адаптувати як оптичні, так і механічні властивості волокон під вимоги конкретних сенсорних і структурних застосувань, включно з вбудованими FBG.

На сьогодні полімерні оптичні волокна використовуються для реалізації різних типів сенсорів – інтенсивнісних [13], інтерферометричних [14], на основі бреггівських ґраток [15] та методів оптичної рефлектометрії часової області [16]. У контексті оцінювання механічних властивостей нанокompatитів особливий інтерес становлять саме бреггівські оптичні сенсори, оскільки вони забезпечують високу чутливість до деформації та температури, можливість мультиплексування та інтеграції без істотного порушення структури матеріалу. З огляду на це, систематичний огляд сучасного стану та тенденцій розвитку бреггівських оптичних сенсорів, зосереджений на їх застосуванні для аналізу механічних властивостей нанокompatитів, є актуальним і науково обґрунтованим завданням, якому й присвячено цю статтю.

1. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ БРЕГГІВСЬКИХ ОПТИЧНИХ СЕНСОРІВ

Ефективність бреггівських оптичних сенсорів (FBG) у вимірюванні механічних властивостей матеріалів ґрунтується на фундаментальних оптичних принципах, що описують взаємодію світла з періодично структурованим середовищем.

1.1. Принцип роботи оптичного волокна та FBG

Основою функціонування FBG є умова Брега, яка визначає довжину хвилі λ_B , що найбільш інтенсивно відбивається ґратками всередині оптичного волокна.

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

Основним конструктивним елементом оптоволоконних сенсорів (Optical Fiber Sensors, OFS) є оптичне волокно, яке виконує одночасно функції передавання оптичного сигналу та чутливого елемента. Типова будова оптичного волокна наведена на рисунку 1 і включає три концентричні шари: сердечник, оболонка та зовнішнє захисне покриття.

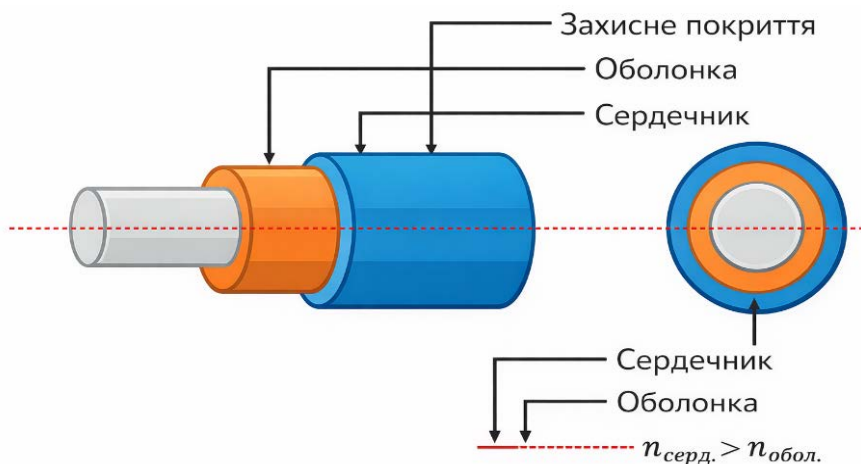


Рисунок 1 – Схематична будова оптичного волокна з умовою показника заломлення, необхідною для повного внутрішнього відбиття та спрямованого поширення світла

Сердечник являє собою центральну циліндричну область волокна, виготовлену переважно з легованого кремнезему або полімерних матеріалів, у якій відбувається поширення світлового випромінювання. Навколо сердечника розташоване облицювання, показник заломлення (n) якого є меншим за показник заломлення сердечника. Саме ця різниця показників заломлення створює умови для реалізації повного внутрішнього відбиття, що забезпечує ефективне спрямоване поширення світла вздовж волокна з мінімальними втратами.

Зовнішній шар – захисне покриття – зазвичай виконується з полімерних матеріалів і призначений для механічного захисту волокна від зовнішніх впливів, зокрема мікрозгинів, абразивного зношування та дії навколишнього середовища. Наявність цього шару також сприяє зменшенню додаткових оптичних втрат, пов'язаних із механічними деформаціями волокна під час експлуатації.

Принцип роботи оптоволоконних сенсорів ґрунтується на зміні оптичних характеристик світлового сигналу внаслідок впливу зовнішніх фізичних або хімічних факторів. До таких характеристик належать інтенсивність, фаза, поляризація або довжина хвилі випромінювання. Будь-яка зміна температури, деформації, тиску чи складу навколишнього середовища призводить до модифікації параметрів поширення світла в оптичному волокні, що може бути зафіксовано за допомогою відповідних інтерrogаторів.

Завдяки цим властивостям оптичне волокно виступає не лише як пасивний канал передавання сигналу, а як активний сенсорний елемент, що забезпечує високу чутливість, електромагнітну сумісність та можливість реалізації розподілених і мультиплексованих систем вимірювання. Саме ці особливості визначили широке поширення OFS у промислових, інженерних і біомедичних застосуваннях.

Окрім геометричної будови, оптичні волокна доцільно розрізняти за характером модового поширення випромінювання, що є визначальним чинником їх функціонування як чутливого елемента сенсорних систем [17]. У цьому контексті зазвичай виокремлюють одномодові (Single-Mode Fiber, SMF) та багатомодові (Multi-Mode Fiber, MMF) волокна, а також комбіновані або гібридні рішення, спеціально оптимізовані для задач оптичного сенсингу, зокрема конфігурації типу SMS (Single-Mode – Multi-Mode – Single-Mode), кожна з яких характеризується власним розподілом мод оптичного поля.

Одномодове оптичне волокно (SMF) має малий діаметр сердечника, зазвичай у межах 8-10 мкм, що забезпечує поширення лише однієї поперечної моди. Така особливість зумовлює мінімальний рівень модальної дисперсії та високу стабільність фазових і спектральних характеристик сигналу. Завдяки цьому SMF широко застосовується в сенсорних системах, орієнтованих на високоточні та високороздільні вимірювання, зокрема при реєстрації малих деформацій, температурних змін і показників заломлення середовища [18-21].

Багатомодове волокно (MMF), навпаки, характеризується значно більшим діаметром сердечника (50 або 62,5 мкм), що дозволяє одночасне поширення кількох світлових мод. Це спрощує оптичне

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

введення сигналу та підвищує ефективність захоплення світлової потужності, хоча супроводжується зростанням модальної дисперсії і, відповідно, зниженням просторової та спектральної роздільної

здатності. З огляду на ці властивості MMF знаходять застосування переважно у сенсорних системах ближньої дії, у конфігураціях із підвищеними вимогами до механічної надійності з'єднань, а також у випадках, коли критичною є інтенсивність сигналу, а не максимальна точність [22-27].

Окрему групу становлять гібридні волоконні структури типу SMS, у яких одномодове волокно використовується для збудження та зчитування сигналу, тоді як багатомодова ділянка виконує роль чутливого елемента з багатомодовою інтерференцією. Такі конфігурації дозволяють реалізувати специфічні спектральні та чутливісні характеристики і застосовуються в спеціалізованих сенсорних схемах, зокрема в експериментальних та мультипараметричних вимірювальних системах [24,28,29].

У гібридних волоконно-оптичних конфігураціях типу SMS ключову роль відіграють перехідні області між одномодовим і багатомодовим волокнами, які прийнято розглядати як інтерфейси оптичної невідповідності (рис. 2). У першій перехідній зоні, що відповідає стику SMF і MMF, одночасно відбувається різка зміна геометричних параметрів хвилеводу та стрибок показника заломлення ядра з рівня n_1 , характерного для одномодового волокна, до більшого значення n_2 , притаманного багатомодовій секції. Така невідповідність умов спричиняє руйнування одномодового режиму та збудження набору просторових мод у багатомодовому волокні.

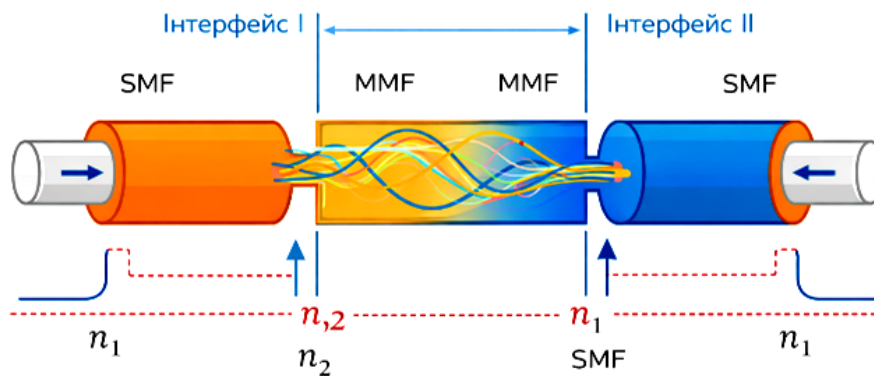


Рисунок 2 – Схема гібридних волоконно-оптичних конфігурацій типу SMS, де ключову роль відіграють перехідні області між одномодовим і багатомодовим волокнами, які прийнято розглядати як інтерфейси оптичної невідповідності

У межах MMF ці моди поширюються з різними фазовими швидкостями, що призводить до інтермодової інтерференції та формування складної просторово-спектральної структури оптичного поля. На другому інтерфейсі, при переході від MMF до вихідного SMF, спостерігається зворотний процес: діаметр ядра зменшується, а показник заломлення повертається від n_2 до n_1 . У результаті лише ті модальні компоненти, просторові характеристики яких узгоджуються з фундаментальним режимом одномодового волокна, ефективно з'єднуються з вихідним SMF. Саме цей механізм модального перетворення та рекомбінації лежить в основі сенсорних і спектральних властивостей SMS-структур.

Вибір конкретного типу оптичного волокна в сенсорних системах визначається не лише загальною архітектурою OFS, а насамперед фізичним механізмом перетворення вимірюваної величини в оптичний сигнал. Ключовими критеріями при цьому виступають необхідна просторово-часова роздільна здатність, допустима довжина сенсорної лінії, рівень чутливості та умови експлуатації. У зв'язку з цим детальне розуміння особливостей поширення світлових мод у різних типах волокон є фундаментальним етапом проектування високоєфективних і стабільних оптоволоконних сенсорних систем.

Поряд із режимом поширення випромінювання, суттєве значення має класифікація оптичних волокон за матеріально-структурними ознаками. Матеріал волокна та його внутрішня геометрія визначають комплекс механічних, хімічних і оптичних характеристик, які безпосередньо впливають на довговічність сенсора, діапазон вимірювань і можливість використання в агресивних або біосумісних середовищах. Незважаючи на відсутність єдиної стандартизованої класифікації в науковій літературі, більшість дослідників узгоджено розподіляють оптичні волокна на три узагальнені групи, що систематизовані та наведені в Таблиці 1.

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

Таблиця 1 – Типи оптичного волокна відповідно до матеріалу виробництва та внутрішньої структури

Тип волокна	Основні характеристики	Сфера застосування
Кремнеземні оптичні волокна (OF) [27, 30]	Стандартне оптичне волокно на основі кремнезему характеризується мінімальними оптичними втратами та високою стійкістю до температурних впливів. Його параметри повністю узгоджені з існуючою телекомунікаційною інфраструктурою, що забезпечує стабільну передачу сигналу та широкі можливості інтеграції з промисловими й науковими оптичними системами.	Такі волокна є базовими елементами волоконно-оптичних сенсорів для вимірювання деформацій, температури та тиску, широко застосовуються у структурному моніторингу інженерних споруд, енергетичних системах, авіаційно-космічній галузі, а також у телекомунікаційних мережах і розподілених сенсорних платформах великої протяжності.
Полімерні оптичні волокна (POF) [28, 31, 32]	Полімерні оптичні волокна характеризуються підвищеною механічною гнучкістю, нижчою вартістю виготовлення та збільшеним діаметром сердечника. Водночас для них притаманний вищий рівень оптичного загасання у порівнянні з кремнеземними волокнами.	Зазначені властивості зумовлюють доцільність використання таких волокон у системах короткодистанційного сенсорювання, простих вимірювальних пристроях, навчальних і лабораторних установках, а також у біомедичних і носимих сенсорних системах, де критичними є гнучкість, безпечність і зручність інтеграції, а не дальність передавання сигналу.
Спеціальні оптичні волокна (PCF [24,30,33,34-36], з порожнистою серцевиною [37-40], леговані [41], мікроструктуровані волокна [25,42,43])	Волоконні структури з ускладненою конструкцією, зокрема фотонні кристалічні волокна (PCF), волокна з порожнистою серцевиною, а також леговані й мікроструктуровані волокна. Додаткове нанесення функціональних покриттів, таких як полідиметилсилоксан, поліімід або графен, забезпечує цілеспрямоване керування оптичними та фізико-хімічними характеристиками волокна. Це відкриває можливості для тонкого налаштування дисперсійних властивостей, керування двозаломленням, а також підвищення чутливості до взаємодії з газовими та рідинними середовищами.	Широко використовуються у високочутливих сенсорних системах, зокрема для газового та хімічного аналізу, біомедичного моніторингу, структурного здоров'я матеріалів, а також у наукових експериментальних установках, де потрібен контроль над спектральними та модальними характеристиками світла. Крім того, такі волокна є перспективними для інтеграції в інтелектуальні сенсорні платформи, розподілені вимірювальні системи та мультипараметричні датчики нового покоління.

1.2. Класифікація оптоволоконних сенсорів

Різноманіття структур, принципів дії та сфер застосування оптоволоконних сенсорів зумовило необхідність їх систематизації. Найбільш уживаними в науковій літературі є класифікації за механізмом взаємодії світла з вимірюваним середовищем та за просторовим характером сенсорних елементів.

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

Особливу увагу приділено поділу OFS на внутрішні та зовнішні, а також на точкові й розподілені сенсорні системи.

1.2.1. Внутрішні та зовнішні оптоволоконні сенсори

Внутрішні (intrinsic) оптоволоконні сенсори характеризуються тим, що саме оптичне волокно одночасно виконує функцію передавання сигналу та чутливого елемента. Вплив зовнішнього фізичного або хімічного чинника безпосередньо змінює оптичні параметри волокна, такі як показник заломлення, довжина хвилі відбитого сигналу, фаза або інтенсивність випромінювання. До найбільш поширених конструкцій цього класу належать волоконні ґратки Бреґґа (FBG) [38,44], сенсори на основі розсіювання Рамана та Бріллюена [41,45], а також інтерферометричні [44] конфігурації типу Мах–Цендера [28,46], Фабрі-Перо [28,47], Мікельсона [30] та Саньяка [46,48]. Внутрішні сенсори вирізняються високою чутливістю, стійкістю до електромагнітних завад та можливістю мультиплексування, що робить їх особливо придатними для структурного моніторингу та біомедичних застосувань.

Зовнішні (extrinsic) оптоволоконні сенсори, на відміну від внутрішніх, використовують оптичне волокно переважно як засіб передавання світла до зони вимірювання та назад до приймального пристрою. У цьому випадку сенсорна взаємодія відбувається поза межами волокна, наприклад у мікромеханічних або мікрооптичних структурах. Типовими представниками цієї групи є сенсори на основі інтерферометрів Фабрі-Перо [28,46], де зміна вимірюваного параметра впливає на оптичну довжину резонатора. Зовнішні OFS забезпечують більшу свободу конструктивного проєктування та часто застосовуються в умовах, де необхідна інтеграція з макроскопічними вимірювальними елементами або агресивними середовищами.

1.2.2. Точкові та розподілені оптоволоконні сенсори

З погляду просторової локалізації вимірювань оптоволоконні сенсори поділяють на точкові та розподілені. Точкові (point-based) OFS здійснюють вимірювання в конкретних дискретних точках уздовж волокна. Кожен сенсорний елемент функціонує як окрема вимірювальна одиниця, що дозволяє досягти високої точності та локальної роздільної здатності. Типовим прикладом є системи на основі FBG, де кожна ґратка відповідає за контроль параметрів у заданій позиції. Такі сенсори широко використовуються у біомедичному моніторингу, зокрема для оцінювання механічних властивостей імплантів і протезів у процесах 3D-моделювання.

Розподілені (distributed) оптоволоконні сенсори забезпечують безперервний контроль параметрів уздовж усієї довжини волокна, використовуючи ефекти розсіювання світла, зокрема Рамана, Бріллюена або Релея. У таких системах кожен відрізок волокна виступає як сенсорний елемент, що дозволяє отримувати просторово розподілену інформацію про температуру, деформації або механічні напруження. Основною перевагою розподілених OFS є можливість моніторингу протяжних об'єктів і структур, однак це зазвичай супроводжується складнішою апаратурою та зниженням локальної точності порівняно з точковими системами.

Таким чином, вибір конкретного типу оптоволоконного сенсора визначається вимогами до просторової роздільної здатності, точності вимірювань, умов експлуатації та інтеграції з цифровими моделями. У сучасних дослідженнях дедалі частіше застосовуються гібридні підходи, що поєднують переваги внутрішніх і зовнішніх, а також точкових і розподілених OFS, особливо в задачах біомедичного моделювання та інтелектуального проєктування імплантів.

Внутрішні: сенсори на основі волокнистої решітки Bragg (FBGs)

Сенсор на основі FBG має періодичну модуляцію показника заломлення всередині ядра оптичного волокна, зазвичай досягається шляхом впливу волокна ультрафіолетового випромінювання [33,38,49]. Це модифіковане волокно функціонує як спектральний фільтр, відбиває певну довжину хвилі вхідного світла, відому як довжина хвилі Бреґґа (λ_B). Ця відбита довжина хвилі залежить від періоду ґратки та ефективного показника заломлення сердечника, які можуть залежати від механічної деформації, коливання температури або напружень. Відбита довжина хвилі Бреґґа (λ_B) описується рівнянням (1) [28,30,33,46,50]:

$$\lambda_B = 2 \cdot n_{eff} \cdot \Lambda, \quad (1)$$

де n_{eff} – ефективний показник заломлення сердечника волокна,

Λ – період ґратки. Період ґратки залежить від змін деформації, а ефективний показник заломлення – змінами температури.

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

Для коректної реалізації вимірювань за допомогою сенсорів на основі FBG необхідним є розділення впливів механічної деформації та температурних змін у світловоді. Одним із найбільш ефективних і технологічно простих рішень цієї задачі є застосування еталонної бреггівської решітки, що дозволяє здійснювати компенсацію паразитних температурних ефектів [33,46,49].

Функціонування FBG-сенсорних систем неможливе без використання спеціалізованого вимірювального вузла – інтеррогатора (демодулятора), призначеного для аналізу оптичних сигналів, відбитих або переданих сенсорними елементами. Оскільки вимірювальна інформація у таких системах закодована у положенні довжини хвилі Брега, інтеррогатор повинен забезпечувати високоточне визначення її спектрального зсуву та перетворення отриманих даних у фізичні параметри контрольованої зони [28,30,33,46]. На рисунку 3 представлено принцип дії FBG.

Пасивний характер, малі габарити та відсутність потреби у локальному живленні роблять FBG-сенсори особливо придатними для експлуатації в агресивних середовищах або в умовах обмеженого доступу. Додатковими перевагами таких сенсорів є можливість спектрального мультиплексування кількох чутливих елементів уздовж одного оптичного волокна, а також висока завадостійкість до електромагнітних впливів, що суттєво розширює сфери їх практичного застосування [25,33,38,49].

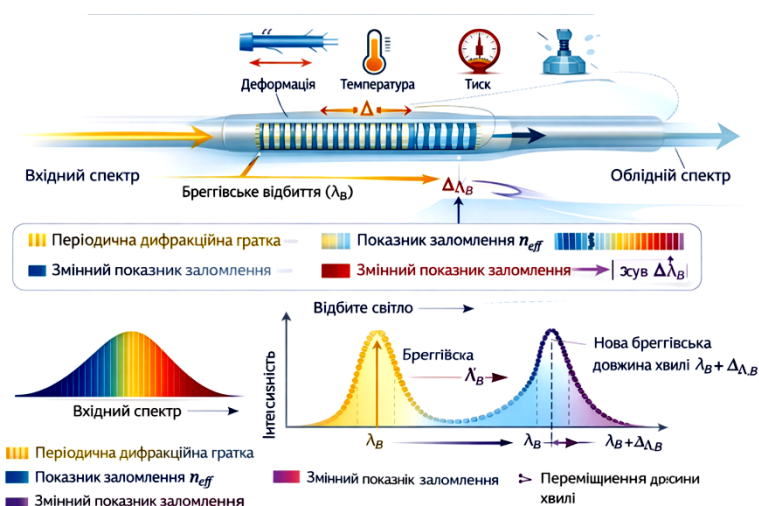


Рисунок 3 – Принцип дії волоконної бреггівської ґратки (FBG)

Серед класифікованих технологій, волоконні датчики на основі бреггівських ґраток є одним із перспективних рішень, зокрема для біомеханічної оцінки та інтеграції з робочими процесами 3D-моделювання.

Внутрішні: розподілені сенсори на основі дисперсії

Структурна концепція розподілених оптичних волоконних сенсорів (Distributed Optical Fiber Sensors, DOFS) базується на використанні одного оптичного волокна як суцільного чутливого елемента, здатного реєструвати параметри середовища по всій своїй довжині. На відміну від точкових сенсорних конфігурацій, у яких вимірювання здійснюються лише в задалегідь визначених зонах, DOFS реалізують безперервний просторовий моніторинг, що робить їх ефективним інструментом для контролю протяжних об'єктів і інфраструктур великої довжини [41,48,51-55].

Функціонування таких систем ґрунтується на спектральному аналізі зворотно розсіяного світла, яке виникає внаслідок поширення оптичного імпульсу вздовж волокна. Падаюче випромінювання з фіксованою початковою довжиною хвилі взаємодіє з мікроскопічними неоднорідностями та фізичними процесами в серцевині волокна, що призводить до появи відбитих компонентів. Частина світла повертається назад у вигляді сигналу Релея [48,51,53], тоді як інші складові зазнають спектрального зсуву в бік вищих або нижчих частот, формуючи нелінійні компоненти Рамана та Бріллюена. Саме ці зсуви несуть інформацію про локальні зміни температури, механічної деформації та інших зовнішніх впливів уздовж волокна [51,53,55].

Водночас ефективність і точність розподілених вимірювань поступово зменшуються зі збільшенням відстані від точки введення сигналу. Основними обмежувальними чинниками є оптичне затухання, зниження співвідношення сигнал/шум, а також технічні характеристики та чутливість оптичного інтеррогатора, що виконує аналіз зворотного розсіювання.

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

Релеївське розсіювання зумовлене флуктуаціями показника заломлення в матеріалі волокна, які мають молекулярну природу, та характеризується збереженням частоти початкового випромінювання. Бріллюєнове розсіювання виникає внаслідок взаємодії оптичної хвилі з акустичними коливаннями середовища, що супроводжують поширення світла у волокні [51,54,55]. Аналіз частотного зсуву Бріллюєна відносно падаючого сигналу дозволяє здійснювати просторово розподілене вимірювання температури та деформації на значних відстанях. Натомість раманівське розсіювання пов'язане з енергетичною взаємодією між оптичним випромінюванням і молекулярними коливаннями матеріалу волокна. Хоча цей механізм характеризується вищим порогом оптичної потужності порівняно з Бріллюєновим розсіюванням, він також широко застосовується в системах розподіленого волоконного сенсорювання [53-55].

2. НАНОКОМПОЗИТИ ЯК ОБ'ЄКТ МЕХАНІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

Наноккомпозити – це структуровані багатофазні матеріали, у яких одна з фаз має середній розмір частинок менше 100 нм. Зменшення розмірів фаз призводить до значного підвищення пружності, жорсткості та інших механічних характеристик у порівнянні з традиційними композитами, що робить їх привабливими для точного механічного моніторингу за допомогою оптичних сенсорів, включно з FBG. Введення нанонаповнювачів у полімерні матриці призводить до зростання модуля пружності й загальної механічної міцності через вдосконалення передачі навантаження між фазами композиту [56]. Аналогічно, дисперговані наночастинки та волокна сприяють підвищенню ударної в'язкості та тривалості служби матеріалів порівняно з неармованими матрицями [57]. У випадку карбонових наноккомпозитів ці покращення включають ефекти на механічну втомостійкість, жорсткість та інші ключові параметри, важливі для структурних застосувань [56,58].

2.1. Класифікація наноккомпозитних матеріалів

Наноккомпозити за типом матриці поділяють на полімерні наноккомпозити (PMNC, Polymer Matrix Nanocomposites), метал-матричні наноккомпозити (MMNC, Metal Matrix Nanocomposites) та керамо-матричні наноккомпозити (CMNC, Ceramic Matrix Nanocomposites), що визначає їх механічні та функціональні характеристики (рис. 4). Дана класифікація відображає фундаментальні відмінності у структурі, процесах виготовлення та властивостях наноккомпозитних систем, які суттєво відрізняються від традиційних композитів та мікрокомпозитів [59,60].



Рисунок 4 – Класифікація наноккомпозитів за типом матриці

Полімерні наноккомпозити (PMNC) базуються на полімерних матрицях, у які введено дисперсні нанофази для підвищення механічної та функціональної ефективності, причому вибір і розподіл нанонаповнювача впливає на жорсткість, міцність і пластичність матеріалу [61]. Завдяки великому співвідношенню площі поверхні наповнювача до об'єму, навіть невелика кількість нанофаз може істотно впливати на механічні властивості композиту. Так, наприклад, введення нанонаповнювача денсилу до багатокомпонентної полімерної матриці сприяє підвищенню модуля пружності матеріалу – в деяких

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

випадках за збільшення концентрації наповнювача значення модуля зростають за рахунок більш тісної взаємодії між компонентами матриці та наповнювача [61]. Такі системи широко досліджуються для застосувань у біомедичній, оптоелектронній та функціональній техніці.

Метал-матричні наноккомпозити (MMNC) характеризуються металевою матрицею, у якій наночастинки або наночастиці зміцнюють матеріал, що призводить до підвищеної міцності на розрив та зносостійкості за високих механічних та термічних навантажень [62]. Метал- та керамічні матриці, армовані нанорозмірними частинками або волокнами, прагнуть комбінувати високу жорсткість і міцність з пластичністю, характерною для металів, або стійкістю до високих температур – для керамік. Впровадження наповнювачів, таких як карбід кремнію, графен або наночастинки металів, дозволяє досягти помітного підвищення пружних і термічних характеристик матеріалів, що є критично важливим у авіаційній та енергетичній галузях [63,64].

Керамо-матричні наноккомпозити (CMNC) поєднують тверді керамічні матриці з наночастиками для досягнення високої твердості та термостійкості, але при цьому крихкість матеріалу зменшується завдяки ефективному армуванню нанорозмірними компонентами [65,66].

Функціональні наноккомпозити включають компоненти, що забезпечують додаткові фізичні або хімічні ефекти – наприклад, електропровідність, магнітну чутливість або самовідновлення. Такі системи можуть змінювати свої механічні властивості у відповідь на зовнішні стимули (температуру, поле, напругу) і стають перспективними для розробки адаптивних структурних елементів і сенсорних систем.

3. КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ В ЗАДАЧАХ FBG-МОНІТОРИНГУ НАНОКОМПЗИТІВ

Аналіз механічних властивостей композиційних матеріалів у контексті застосування бреггівських оптичних сенсорів є критично важливим етапом між синтезом наноккомпозиту та його експлуатаційним моніторингом. На відміну від традиційних методів випробувань, які забезпечують інтегральну оцінку механічних властивостей, FBG-сенсори дозволяють здійснювати локальні, розподілені та квазібезперервні вимірювання деформацій і напружень без порушення цілісності матеріалу [1–3].

Механічні властивості наноккомпозитів визначаються складною взаємодією між матрицею, нанопоповнювачами та міжфазною областю, що ускладнює інтерпретацію результатів класичних тензометричних методів. Саме тому інтеграція FBG-сенсорів безпосередньо в об'єм наноккомпозиту або на його поверхню розглядається як ефективний підхід до кількісної оцінки модулів пружності, залишкових напружень, втомних пошкоджень і процесів тріщиноутворення [4–6].

3.1. Теплово-механічні властивості та їх вплив на FBG-вимірювання

Теплові властивості наноккомпозитів мають безпосередній вплив на точність FBG-моніторингу, оскільки бреггівська довжина хвилі залежить як від механічної деформації, так і від температури:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \cdot [(1 - p_e)\varepsilon + (\alpha + \xi)\Delta T],$$

де p_e — ефективний фотоеластичний коефіцієнт,

ε — осьова деформація,

α — коефіцієнт теплового розширення матеріалу,

ξ — термооптичний коефіцієнт волокна [3,4].

У полімерних і полімер-матричних наноккомпозитах, які характеризуються низькою теплопровідністю (0,3 - 0,8 Вт/(м·К)), локальні температурні градієнти можуть спричинити паразитні зсуви спектра відбиття FBG, що вимагає температурної компенсації або використання диференціальних схем вимірювання [11].

Для метал- та керамо-матричних наноккомпозитів, навпаки, характерні високі значення теплопровідності та температури експлуатації, що висуває підвищені вимоги до термічної стабільності волоконно-оптичних ґраток і їх захисних покриттів [14-16]. Доведено, що невідповідність коефіцієнтів теплового розширення між наноккомпозитом і кварцовим волокном може призводити до накопичення залишкових напружень і деградації сенсорної чутливості під час термоциклювання [11,16].

3.2. Електричні та функціональні властивості наноккомпозитів у поєднанні з FBG

Сучасні наноккомпозити дедалі частіше поєднують механічні та електричні функції, що відкриває можливості для створення гібридних сенсорних систем, у яких FBG-сенсори доповнюють електричні або п'єзорезистивні методи вимірювання [58].

Вуглецеві нанопоповнювачі (CNT, графен) забезпечують електропровідність у широкому діапазоні – від діелектричного до металоподобного режиму – при порогах перколяції 0,5 - 3 мас. %.

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИБОРИ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

Водночас FBG-сенсори залишаються електромагнітно нейтральними, що дозволяє використовувати їх у середовищах із сильними електричними полями або радіочастотними завадами [58,61].

Комбіноване використання FBG і електричних вимірювальних каналів дає змогу розділяти внески механічної деформації, температури та структурної деградації, зокрема на ранніх стадіях росту мікротріщин або втрати міжфазної адгезії [58,62].

3.3. Критичний аналіз і перспективи FBG-характеризації нанокompозитів

Незважаючи на значний прогрес, більшість експериментальних досліджень нанокompозитів досі зосереджені на статичних механічних випробуваннях, тоді як часозалежні ефекти (повзучість, релаксація, втома) та їх вплив на спектральний відгук FBG вивчені недостатньо [62,64]. Крім того, у літературі обмежено представлені узгоджені дані щодо впливу мікроструктури нанокompозитів на передавання деформації від матриці до оптичного волокна (рис. 5)

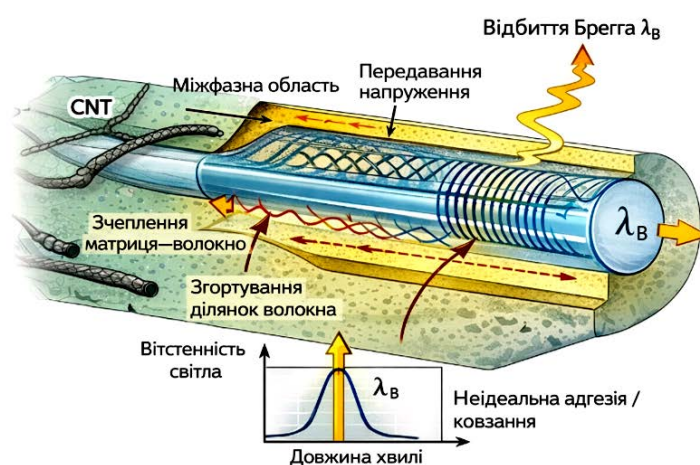


Рисунок 5 – FBG у нанокompозиті: механізм передавання деформації

На рисунку 5 показано вбудовану у нанокompозитну матрицю FBG та основні етапи передавання механічної деформації від матриці до оптичного волокна через міжфазну область. Зовнішнє навантаження викликає напружено-деформований стан матриці, який через адгезійне зчеплення передається на волокно, що призводить до зміни періоду ґратки та зсуву бреггівської довжини хвилі λ_B . Також ілюстровано вплив міжфазних ефектів (ковзання, мікрозгин, неоднорідність деформації) на спектральну характеристику відбиття, що є критичним для коректної інтерпретації результатів механічного моніторингу нанокompозитів.

Перспективним напрямом є формування багатопараметричних систем характеризування, у яких FBG-сенсори використовуються як джерело високоточної експериментальної інформації для калібрування чисельних моделей і алгоритмів машинного навчання, орієнтованих на прогнозування деградації властивостей нанокompозитів [67,68].

Таким чином, поєднання бреггівських оптичних сенсорів із сучасними методами характеризування нанокompозитів створює наукове підґрунтя для розвитку інтелектуальних матеріалів і конструкцій, що відповідає актуальним завданням оптико-електронних інформаційно-енергетичних технологій.

4. СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ FBG-СЕНСОРІВ ДЛЯ МЕХАНІЧНОГО МОНІТОРИНГУ НАНОКОМПОЗИТІВ

З огляду на стрімкий розвиток наноматеріалів і зростаючі вимоги до безпеки, надійності та інтелектуального моніторингу конструкційних систем, FBG дедалі частіше розглядаються як ключовий компонент сучасних систем Structural Health Monitoring (SHM) нанокompозитів. Сучасні наукові тенденції спрямовані на підвищення функціональності, чутливості та адаптивності FBG-технологій для вимірювання механічних параметрів, включно з деформацією, напруженням і розвитком пошкоджень у складних умовах навантаження (рис. 6).

Традиційні FBG виготовляються на базі кварцового одномодового волокна, що обмежує їх застосування в гнучких та еластичних нанокompозитах. Сучасні дослідження спрямовані на розробку

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

полімерних оптичних волокон з бреггівськими ґратками (Polymer Fiber Bragg Gratings, PFBG), які поєднують достатню оптичну чутливість зі значною механічною гнучкістю. Такі сенсори забезпечують кращу механічну сумісність зі структурно м'якими матрицями, дозволяють зменшити ефекти міжфазного розриву та краще передавати деформації без руйнування волокна [44-71].

Полімерні FBG демонструють також вищу толерантність до великих деформацій, порівняно з кремнієвими аналогами, що робить їх придатними для інтеграції у гнучкі нанокompозити (наприклад, у біомедичних імплантатах чи носимих сенсорних системах) [71]. Окрім того, полімерні FBG мають потенціал для прямого друку та 3D-вбудовування у складні геометрії, що сприяє розширенню областей їх застосування.

Другою важливою тенденцією є нанofункціоналізація оптичних волокон, при якій поверхню або серцевину FBG покривають наноматеріалами (графен, наночастинки металів, нанодіоксиди тощо). Такий підхід дозволяє:

- підвищити чутливість до локальних механічних та хімічних впливів;
- налаштувати селективність сенсорного відгуку;
- покращити адгезію між волокном і матрицею нанокompозиту [65-71].

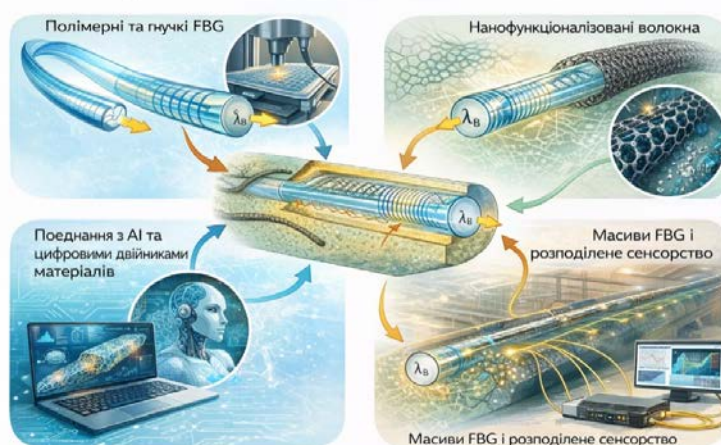


Рисунок 6 – Сучасні FBG-технологій для нанокompозитів

Традиційні FBG виготовляються на базі кварцового одномодового волокна, що обмежує їх застосування в гнучких та еластичних нанокompозитах. Сучасні дослідження спрямовані на розробку полімерних оптичних волокон з бреггівськими ґратками (Polymer Fiber Bragg Gratings, PFBG), які поєднують достатню оптичну чутливість зі значною механічною гнучкістю. Такі сенсори забезпечують кращу механічну сумісність зі структурно м'якими матрицями, дозволяють зменшити ефекти міжфазного розриву та краще передавати деформації без руйнування волокна [71].

Полімерні FBG демонструють також вищу толерантність до великих деформацій, порівняно з кремнієвими аналогами, що робить їх придатними для інтеграції у гнучкі нанокompозити (наприклад, у біомедичних імплантатах чи носимих сенсорних системах) [71]. Окрім того, полімерні FBG мають потенціал для прямого друку та 3D-вбудовування у складні геометрії, що сприяє розширенню областей їх застосування.

Другою важливою тенденцією є нанofункціоналізація оптичних волокон, при якій поверхню або серцевину FBG покривають наноматеріалами (графен, наночастинки металів, нанодіоксиди тощо). Такий підхід дозволяє:

- підвищити чутливість до локальних механічних та хімічних впливів;
- налаштувати селективність сенсорного відгуку;
- покращити адгезію між волокном і матрицею нанокompозиту [69-71].

Наприклад, інтеграція графену або карбонних нанотрубок у оболонку сенсора сприяє підвищенню механічної чутливості та допомагає у ранньому виявленні дрібномасштабних дефектів, що виникають під час циклічних навантажень [71]. Функціоналізовані FBG можуть бути використані для мультипараметричного моніторингу – одночасного вимірювання деформації, температури та навіть вологості або концентрації домішок.

Інтеграція FBG-моніторингу з методами штучного інтелекту (ШІ) та цифрових двійників матеріалів є одним із найперспективніших напрямів розвитку. Поеднання великої кількості даних з масивів FBG із алгоритмами машинного навчання дозволяє:

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

- підвищити точність інтерпретації механічних сигналів;
- передбачати поведінку нанокомпозитів під складними навантаженнями;
- виконувати проактивний прогноз залишкового ресурсу конструкції без надлишкових числових моделей [71].

Цифрові двійники, що інтегрують реальні дані з FBG-мережі з чисельними моделями (наприклад, методом скінченних елементів), дозволяють створювати адаптивні моделі, що точно відображають механічний стан матеріалу на різних етапах експлуатації [71]. Такі підходи вже застосовуються для моніторингу тріщиноутворення, ерозійних процесів та втомних пошкоджень у нанокомпозитах із жорсткими армуючими фазами.

Розвиток технологій мультиплексування та високошвидкісного зчитування дозволяє формувати масиви FBG-сенсорів для розподіленого контролю деформацій уздовж великомасштабних нанокомпозитних конструкцій. Масиви FBG забезпечують:

- одночасне вимірювання у сотнях точок без значного ускладнення апаратури;
- високороздільний просторовий профіль напружено-деформованого стану матеріалу;
- можливість виявлення локальних аномалій, таких як зародження мікротріщин або міжфазні розриви, до того, як вони стануть критичними [69-71].

Розподілені сенсорні масиви особливо корисні для довготривалого моніторингу в реальних умовах експлуатації – від аерокосмічних елементів до великих енергетичних конструкцій, де раннє виявлення дефектів є ключовою вимогою до безпеки, а також у біомедицині.

7. ВИСНОВКИ

У даній оглядовій роботі систематизовано сучасні наукові результати, присвячені застосуванню бреггівських оптичних сенсорів (FBG) для оцінювання механічних властивостей нанокомпозитних матеріалів. Показано, що FBG-сенсори є високочутливими, надійними та метрологічно стабільними інструментами для вимірювання деформацій, напружень, модуля пружності, коефіцієнтів Пуассона, а також для моніторингу ініціації пошкоджень, росту тріщин і втомної деградації в нанокомпозитах. Особливу увагу приділено фізичним основам роботи FBG, механізмам передавання деформації від нанокомпозитної матриці до оптичного волокна, методам інтеграції сенсорів та проблемам механічної сумісності, зокрема впливу міжфазних ефектів, деламінації та різниці модулів пружності.

Порівняльний аналіз із традиційними тензометричними методами показав, що FBG мають суттєві переваги для нанокомпозитних систем, зокрема електромагнітну нечутливість, можливість мультиплексування, довготривалу стабільність сигналу та здатність до вбудованого й розподіленого моніторингу. Це робить їх особливо перспективними для структурного моніторингу складних, багатофазних і функціонально навантажених матеріалів.

Окремо підкреслено перспективи застосування FBG у медицині та біоінженерії. Завдяки мініатюрності, біосумісності та можливості інтеграції у полімерні й біорозкладні нанокомпозити, FBG-сенсори можуть використовуватися для моніторингу механічних властивостей імплантів, тканинно-інженерних каркасів, протезів, гнучких медичних пристроїв і «розумних» біоматеріалів. У таких застосуваннях FBG дозволяють здійснювати *in situ* (безпосередньо в матеріалі або конструкції) та *in vivo* (у живих біологічних системах) контроль деформацій і напружень у реальному часі, що є критично важливим для оцінювання біомеханічної сумісності та довготривалої надійності медичних виробів.

Подальші дослідження у цій галузі доцільно спрямувати на кілька ключових напрямів. По-перше, актуальним є розвиток полімерних, гнучких та біосумісних FBG, а також нанофункціоналізованих оптичних волокон з покращеним передаванням деформації. По-друге, перспективним є поєднання масивів FBG із методами розподіленого сенсорства для просторово-часового аналізу механічного стану нанокомпозитів. По-третє, інтеграція даних FBG із алгоритмами штучного інтелекту та цифровими двійниками матеріалів відкриває нові можливості для прогнозування деградації, оптимізації конструкцій і персоналізованих біоінженерних рішень. Сукупність цих напрямів формує науково-технологічне підґрунтя для подальшого розвитку бреггівських оптичних сенсорів як ключового інструмента механічного моніторингу нанокомпозитів у високотехнологічних і медико-біоінженерних застосуваннях.

ПОДЯКИ

Дослідження виконано за підтримки проєкту (№ держреєстрації 0124U001134) Міністерства освіти і науки України

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Corning Incorporated. *SMF-28® optical fiber*. Product information sheet PI-1424-AEN [Електронний ресурс]. URL: <https://www.corning.com/media/worldwide/coc/documents/Fiber/product-information-sheets/PI-1424-AEN.pdf>
2. Kallweit J., Petzel M., Pursche F., Jabban J., Morobaid M., Gries T. A review of manufacturing methods for polymer optical fibers with side emission. *Textiles*. 2021. Vol. 1. P. 337–360. DOI: 10.3390/textiles1040023.
3. Google Scholar URL: <https://scholar.google.com/>
4. Cochrane C., Mordon S. R., Lesage J.-C., Koncar V. New design of textile light diffusers for photodynamic therapy. *Materials Science and Engineering: C*. 2013. Vol. 33, No. 3. P. 1170–1175. DOI: 10.1016/j.msec.2012.12.010.
5. Chu J. R., Zhong L. S., Wen X. M., Xu K. H. Study on surface fluorination for attenuation reduction of polymethyl methacrylate polymer optical fiber. *Journal of Applied Polymer Science*. 2005. Vol. 98, No. 6. P. 2369–2372. DOI: 10.1002/app.22387.
6. Chu F., Yang J. Plastic optical fiber coil-shaped sensor heads for TNT detection based on fluorescence quenching. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2012. Vol. 175. P. 43–46. DOI: 10.1016/j.sna.2011.12.022.
7. Xue P., Wu B., Bao G., Zheng J. Helical plastic optical fiber for refractive index sensing. *IEEE Sensors Journal*. 2020. Vol. 20, No. 10. P. 5237–5242. DOI: 10.1109/JSEN.2020.2967407.
8. Theodosiou A., Kalli K. Recent trends and advances of Bragg grating sensors in CYTOP polymer optical fibers. *Optical Fiber Technology*. 2020. Vol. 54. Art. 102079. DOI: 10.1016/j.yofte.2019.102079.
9. TOPAS Advanced Polymers GmbH. *TOPAS® COC cyclic olefin copolymer*. Product brochure URL: https://topas.com/wp-content/uploads/2023/05/TOPAS_Product-Brochure.pdf
10. ZEON Corporation. *ZEONEX® optical polymer*. Product information: <https://www.zeon.co.jp/en/business/enterprise/resin/pdf/200323391.pdf> (дата звернення: 07.02.2024).
11. Stajanca P., Marcos C., Nielsen K., Bang O., Stefani A., Krebber K., Fasano A., Woyessa G., Rasmussen H. K. Fabrication and characterization of polycarbonate microstructured polymer optical fibers for high-temperature-resistant Bragg grating strain sensors. *Optical Materials*. 2016. Vol. 60. P. 649–659. DOI: 10.1016/j.optmat.2016.08.020.
12. Orelma H., Hokkanen A., Leppänen I., Kammiovirta K., Kapulainen M., Harlin A. Optical cellulose fiber made from regenerated cellulose and cellulose acetate for water sensor applications. *Cellulose*. 2020. Vol. 27. P. 1543–1553. DOI: 10.1007/s10570-019-02840-6.
13. Chennamo N., Arcadio F., Marletta V., Baglio S., Zeni L., Andò B. Magnetic field sensor based on SPR-POF platforms and ferrofluids. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2021. Vol. 70. P. 1–10. DOI: 10.1109/TIM.2020.3038782.
14. Statkiewicz-Barabach G., Mergo P., Urbanczyk W. Fabry–Perot Bragg grating interferometer made of polymer optical fiber for enhanced resolution sensing. *Journal of Optics*. 2016. Vol. 19, No. 1. Art. 015609. DOI: 10.1088/2040-8978/19/1/015609.
15. Hu X., Chen Y., Gao S., Min R., Woyessa G., Bang O., Cui H., Wang G., Caucheteur C. Direct inscription of Bragg gratings in single-mode TOPAS/ZEONEX polymer optical fiber using 520 nm femtosecond pulses. *Photonics*. 2022. Vol. 9, No. 2. Art. 135. DOI: 10.3390/photonics9020135.
16. Dengler S. A., Roseau R. W., Luber G. M., Ziemann O., Engelbrecht R., Schmauss B. Performance evaluation of reference reflections in polymer optical fibers for strain sensing // *Proceedings of the 27th International Conference on Optical Fiber Sensors (OFS-27)*. Washington, DC : Optica Publishing Group, 2022.
17. Gerey A., Wagenende M., Filipkowski A., Sivitski B., Buchynski R., Tienpont G., Van Vlierberghe S., Hernaert T., Dubruel P., Bergmans F. *et al.* Poly(D,L-lactic acid) (PDLLA) biodegradable and biocompatible polymer optical fiber // *Journal of Lightwave Technology*. 2019. Vol. 37. P. 1916–1923. DOI: <https://doi.org/10.1109/JLT.2019.2891234>.
18. Badó M. F., Casas J. R. A review of distributed optical fiber sensors for structural health monitoring in civil engineering // *Sensors*. 2021. Vol. 21. Art. 1818. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21051818>.
19. Abdul Rahuman M. A., Kahathapitiya N., Amaran W. N., Wijenayake R. E., Silva B. N., Chong M., Kim J., Ravichandran N. K. Recent technological advances in fiber optic sensors for biomechatronics applications // *Technologies*. 2023. Vol. 11. Art. 157. DOI: <https://doi.org/10.3390/technologies11060157>.

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

20. Fu X., Ran R., Li K., Huang Z., Li D., Zhang R., Fu G., Jin W., Qi Y., Bi W. Multi-mode PDMS-filled temperature sensor based on Vernier effect // *IEEE Photonics Journal*. 2021. Vol. 13. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2021.3059874>.
21. Mumtaz F., Roman M., Zhang B., Abbas L. G., Ashraf M. A., Fias M. A., Dai Y., Huang J. Simple ultra-high sensitivity optical SPR sensor for dual-parameter measurement // *IEEE Photonics Journal*. 2022. Vol. 14. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2022.3147289>.
22. Hani S., Rezaei P. Plasmonic nanostructure-based optical sensors: A review // *Heliyon*. 2024. Vol. 10. Art. e40923. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40923>.
23. Zhang X., Zhu H., Jiang X., Broere W. Distributed fiber optic sensors for tunnel monitoring: A state-of-the-art review // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2024. Vol. 16. P. 3841–3863. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.01.012>.
24. Wang K., Dong X., Köhler M. H., Kienle P., Bian Q., Jacobi M., Koch A. W. Advances in multimode interference (MMI) based optical fiber sensors: A review // *IEEE Sensors Journal*. 2021. Vol. 21. P. 132–142. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3029876>.
25. Arcadio F., Del Prete D., Zeni L., Cennamo N., Seggio M. Optical sensor chips monitored by external optical fiber interrogation schemes // *IEEE Sensors Reviews*. 2025. Vol. 2. P. 179–198. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSENREV.2025.3341123>.
26. Janani R., Majumder D., Scrimshire A., Stone A., Wakelin E., Jones A. H., Wheeler N. V., Brooks W., Bingham P. A. From acrylates to silicones: A review of common optical fiber coatings for normal and harsh environments // *Progress in Organic Coatings*. 2023. Vol. 180. Art. 107557. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107557>.
27. Dabagh S., Singh R., Borri C., Chiavaioli F. Functional nanomaterial coatings on optical fibers: Toward enhanced biosensing performance // *IEEE Sensors Reviews*. 2025. Vol. 2. P. 157–169. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSENREV.2025.3339981>.
28. Roriz P., Silva S., Frazão O., Novais S. Optical temperature sensors and their biomedical applications // *Sensors*. 2020. Vol. 20. Art. 2113. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20072113>.
29. Wang K., Farrell G., Yan W. Investigation of single-mode–multimode–single-mode fiber structures // *Journal of Lightwave Technology*. 2008. Vol. 26. P. 512–519. DOI: <https://doi.org/10.1109/JLT.2007.915031>.
30. Ma S., Xu Y., Pang Y., Zhao H., Li Y., Qin Z., Liu Z., Lu P., Bao X. Optical fiber sensors for high-temperature monitoring: A review // *Sensors*. 2022. Vol. 22. Art. 5722. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22155722>.
31. Sokolovskiy P., Lubynskiy J., Wierzbicka P., Czubeck J., Miluski P., Janiak F., Guan S., Szczerska M. Polymer materials for U-shaped optical fiber sensors: A review // *Photonics*. 2025. Vol. 12. Art. 56. DOI: <https://doi.org/10.3390/photonics12010056>.
32. Tavares C., Silva J. O. E., Mendes A., Rebelo L., Domingues M. D., Alberto N., Lima M., Silva G. P., Antunes P. F. D. C. Instrumented office chair with low-cost plastic optical fiber sensors for posture monitoring and workplace optimization // *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 69063–69071. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3187745>.
33. Pendão C., Silva I. Optical fiber sensors and sensor networks: A review of main principles and applications // *Sensors*. 2022. Vol. 22. Art. 7554. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22207554>.
34. Gao X., Xu J., Xie S., Zhang W., Pei L., Zheng J., Li J., Ning T. Strain-insensitive temperature sensor based on few-mode fiber and photonic crystal fiber // *IEEE Photonics Journal*. 2022. Vol. 14. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2022.3149812>.
35. Nejad J. Y., Soroush M., Al-Shammari F. K., Alkhaier A. G. Highly sensitive and linear temperature sensor based on liquid-filled photonic crystal fiber // *Optical and Quantum Electronics*. 2024. Vol. 57. Art. 32. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11082-024-05732-6>.
36. Chen N., Guo W., Chen G., Ding X., Yang F., Zhu Y., Song M., Xu Y. Multifunctional polarization beam splitter in fiber based on liquid crystal-filled dual-core photonic crystal fiber with gold layers and its temperature sensing performance // *Optics & Laser Technology*. 2025. Vol. 191. Art. 113350. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.113350>.
37. Zhu K., Zheng G., Ma L., Yao Z., Liu B., Huang J., Rao Y. Advances in fiber-optic extrinsic Fabry–Perot physical and mechanical sensors: A review // *IEEE Sensors Journal*. 2023. Vol. 23. P. 6406–6426. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3258842>.
38. Zhang Y., Li Y., Guo Z., Li J., Ge X., Sun K., Yang Z., Li Z., Huang Y. Health monitoring using optical fiber sensor technology for batteries // *eScience*. 2024. Vol. 4. Art. 100174. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esci.2024.100174>.

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

39. Galende M., Silska A., Ertman S. Scalable refractive index and liquid level sensors based on multimode interference in hollow-core small-core fibers // *Measurement*. 2025. Vol. 248. Art. 116977. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.116977>.
40. Xu J., Huang K., Zheng J., Li J., Pei L., Ti G., Ning T. Magnetic field sensor with enhanced sensitivity based on hollow-core Fabry–Perot interferometer and Vernier effect // *IEEE Photonics Journal*. 2022. Vol. 14. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2022.3154427>.
41. Katrenova Z., Alisherov S., Abdol T., Molardi S. State and future development of distributed optical fiber sensors for biomedical applications // *Sensors and Biosensors Research*. 2024. Vol. 43. Art. 100616. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sbsr.2024.100616>.
42. Leffers L., Lockmelis J., Bremer K., Roth B., Overmeyer L. Optical bending sensor based on eccentrically microstructured multimode polymer optical fibers // *IEEE Photonics Journal*. 2021. Vol. 13. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2021.3074416>.
43. Li K., Yang W., Wang M., Yu X., Fan J., Xun Y., Yang Y., Li L. Review of coating materials used to enhance the performance of optical fiber sensors // *Sensors*. 2020. Vol. 20. Art. 4215. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20154215>.
44. Zhang X., Wang K., Zheng T., Wu G., Wu K., Wang Y. Wearable optical fiber sensors in medical monitoring: a review. *Sensors*. 2023. Vol. 23. Art. 6671. DOI: 10.3390/s23156671.
45. Zhu L., Sun G., Bao W., Ti Z., Meng F., Dong M. Structural deformation monitoring of aircraft based on optical fiber sensing technology: a review and future prospects. *Engineering*. 2022. Vol. 16. P. 39–55. DOI: 10.1016/j.eng.2021.10.019.
46. He R., Shen L., Wang Z., Wang G., Qu H., Hu X., Min R. Optical fiber sensors for heart rate monitoring: a review of mechanisms and applications. *Optics Results*. 2023. Vol. 11. Art. 100386. DOI: 10.1016/j.rio.2023.100386.
47. Li J. Review: Development of novel fiber-optic platforms for volume and surface refractive index sensing. *Sensors and Actuators Reports*. 2020. Vol. 2. Art. 100018. DOI: 10.1016/j.snr.2020.100018.
48. Chen S., Wang J., Zhang K., Li M., Li N., Wu G., Liu Y., Peng W., Song Y. Monitoring the condition of marine structures using optical fiber sensors: a review. *Sensors*. 2023. Vol. 23. Art. 1877. DOI: 10.3390/s23041877.
49. Jean-Ruel H., Albert J. Recent advances and current trends in optical biosensors based on tilted fiber Bragg gratings. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2024. Vol. 174. Art. 117663. DOI: 10.1016/j.trac.2024.117663.
50. Anjana K., Gerat M., Epaarachchi J. Optical fiber sensors for geo-hazard monitoring: a review. *Measurement*. 2024. Vol. 235. Art. 114846. DOI: 10.1016/j.measurement.2024.114846.
51. Bao X., Wang Y. Recent advances in distributed fiber sensors based on Rayleigh scattering. *Advanced Devices & Instrumentation*. 2021. Vol. 2021. Art. 8696571. DOI: 10.34133/2021/8696571.
52. Tosi D., Molardi C., Sypabekova M., Blanc W. Advanced distributed optical sensors based on backscattering: tutorial and review. *IEEE Sensors Journal*. 2021. Vol. 21. P. 12667–12678. DOI: 10.1109/JSEN.2021.3071765.
53. Mizuno Y., Theodosiou A., Kalli K., Lier S., Li H., Nakamura K. Distributed polymer optical fiber sensors: a review and outlook. *Photonics Research*. 2021. Vol. 9. P. 1719–1733. DOI: 10.1364/PRJ.427018.
54. Zheng G., Zhang J., Guo N., Zhu T. Distributed optical fiber sensor for dynamic measurement. *Journal of Lightwave Technology*. 2021. Vol. 39. P. 3801–3811. DOI: 10.1109/JLT.2021.3064871.
55. Lu P., Lalam N., Badar M., Liu B., Chorpene B. T., Buric M., Ogodnik P. R. Distributed optical fiber sensing: review and perspective. *Applied Physics Reviews*. 2019. Vol. 6. Art. 041302. DOI: 10.1063/1.5113959.
56. Karabanova L. V., Bondaruk O. M., Voronin E. F. Nanocomposites based on multicomponent polymer matrix and nanofiller densil: relaxation properties and morphology. *Himija, Fizyka ta Tehnologija Poverhni*. 2020. Vol. 11. P. 235–249.
57. Резанова В. Г., Вільцанюк О. А., Резанова Н. М. Програмне забезпечення для оптимізації складу багатокомпонентних сумішей : монографія. Київ : АртЕк, 2022. 315 с.
58. Gavrylyuk N. A., Prykhod'ko G. P., Kartel M. T. Odderzhannia ta vlastyosti nanokompozytiv na osnovi termoplastychnykh polimeriv, napovnenykh vuhletsevymy nanotrubbkamy (ohliad). *Poverkhnia*. 2014. No. 6(21). P. 206–240. URL: <https://surfacezbir.com.ua/index.php/surface/article/view/550> (дата звернення: 27.02.2024).

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИБРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

59. El Hawary A., Hasan S., El Sttar R. A., Mohamed S., Bassyouni M. A review on processing and applications of nanocomposites. *Journal of Composites and Biodegradable Polymers*. 2019. Vol. 7. P. 40–50. DOI: 10.12974/2311-8717.2019.07.6.
60. Gemachu L. Y., Bogale R. F. A review on the three types of nanocomposites synthesis, characterization and their applications in different areas. *Preprints*. 2024. DOI: 10.20944/preprints202401.1201.v1.
61. Kosnikov G., Figovsky O., Eldarkhanov A. Metal matrix micro- and nanostructural composites (review). *Chemistry & Chemical Technology*. 2015. Vol. 9, No. 2. P. 165–170. URL: <https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/28314> (дата звернення: 27.02.2024).
62. Faris A. H. Advances in composite materials: preparation, characterization, and applications in various industries: a review. *Anbar Journal of Engineering Science*. 2025. Vol. 16, No. 2. P. 143–165.
63. Sharma D. K., Mahant D., Upadhyay G. Manufacturing of metal matrix composites: a state of review. *Materials Today: Proceedings*. 2021. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.445.
64. Güler Ö., Bağcı N. A short review on mechanical properties of graphene reinforced metal matrix composites. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.01.050.
65. Harasim, D.; Kisała, P. Application of Cascaded TFBG for Wavelength-Shift-Based SRI Measurement with Reduced Polarization Cross-Sensitivity. *Sensors* **2025**, *25*, 1831. <https://doi.org/10.3390/s25061831>.
66. Cao, C.; Hao, W.; Ge, Y.; Chen, J.; Wang, W.; Xu, C. Shape monitoring method of submarine cable based on fiber Bragg grating. *Opt. Fiber Technol.* **2023**, *77*, 103255.
67. Leal-Junior, A.; Frizzera-Neto, A. Chapter 8—Smart structures and textiles for gait analysis. In *Optical Fiber Sensors for the Next Generation of Rehabilitation Robotics*; Elsevier Inc.: Amsterdam, The Netherlands, 2022; pp. 175–200.
68. Chen, Y.T.; Liao, Y.Y.; Chen, C.C.; Hsiao, H.H.; Huang, J.J. Surface plasmons coupled two-dimensional photonic crystal biosensors for Epstein-Barrvirus protein detection. *Sens. Actuators B-Chem.* **2019**, *291*, 81–88.
69. Kisała, P.; Skorupski, K.; Cięższyk, S.; Panas, P.; Klimek, J. Rotation and twist measurement using tilted fibre bragg gratings. *Metrol. Meas. Syst.* **2018**, *25*, 429–440.
70. Cięższyk, S.; Kisała, P.; Mroczka, J. New Parameters Extracted from Tilted Fiber Bragg Grating Spectra for the Determination of the Refractive Index and Cut-Off Wavelength. *Sensors* **2019**, *19*, 1964.
71. Harasim, D.; Kisała, P.; Yeraliyeva, B.; Mroczka, J. Design and Manufacturing Optoelectronic Sensors for the Measurement of Refractive Index Changes under Unknown Polarization State. *Sensors* **2021**, *21*, 7318.

Дата надходження: 9.03.2026

Дата прийняття до друку після рецензування: 20.04.2026

Дата публікації: 18.06.2026

Ця робота ліцензується відповідно до
[Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

ВИШТАК ІННА ВІКТОРІВНА - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри безпеки життєдіяльності та педагогіки безпеки, Вінницький національний технічний університет, **e-mail: innavish322@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5646-4996>**

КОНОНОВ ОЛЕКСІЙ ЮРІЙОВИЧ – аспірант кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, **e-mail: akonokhov@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-5779-5963>**

Inna VISHTAK, Oleksii KONOKNOV

**REVIEW AND PROSPECTS OF THE APPLICATION OF BRAGG OPTICAL SENSORS FOR
ASSESSING THE MECHANICAL PROPERTIES OF NANOCOMPOSITES IN BIOENGINEERING**

Vinnitsia National Technical University