УДК 620.22 DOI: 10.18372/0370-2197.3(112).21635

А. В. БАЛАЛАЄВ, О. Ю. БУСЛЮК

Національний університет «Київський авіаційний інститут», м. Київ, Україна

КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ НОВОГО ПОКОЛІННЯ: СТАЛИЙ РОЗВИТОК, БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНІСТЬ ТА АДАПТИВНІСТЬ. ЧАСТИНА 1

У роботі проведено критичний огляд останніх досягнень у галузі композиційних матеріалів. Визначені шість тенденцій - перероблювані та сталі композити, самовідновлювані, самочутливі, структурні акумуляторні, 3D-друковані та AI-спроєктовані композити - відображають основні напрями сучасної трансформації галузі. Майбутнє композиційних матеріалів пов'язане не лише з підвищенням міцності та зменшенням маси, а з інтеграцією функціональності, автономності, цифрового проєктування та сталого розвитку. Водночас широке практичне впровадження нових композитів потребує вирішення проблем масштабування виробництва, вартості, довговічності, стандартизації, переробки та підтвердження надійності в реальних умовах експлуатації. Перспективним напрямом подальших досліджень є комбінування розгляну-тих концепцій в одному матеріалі, наприклад створення 3D-друкованих, самовідновлюваних і самочутливих композитів із можливістю ШІ-оптимізації їхньої структури та одночасного забезпечення екологічної сталості.

Ключові слова: *композит, сталі композити, самовідновлювані композити, самочутливі композити, екологічно стійкі композити*

Вступ. Останні роки ознаменувалися фундаментальним переломом у концепції розробки композитних матеріалів. Якщо раніше основним завданням матеріалознавства було виключно підвищення механічної міцності та зниження маси, то сьогодні вектор досліджень змістився в бік створення інтелектуальних поліфункціональних систем. Цей перелік відображає сучасний зсув парадигми в матеріалознавстві — від «пасивних» структур до багатофункціональних систем («матеріал + пристрій в одному»).

Постановка завдання. Метою роботи є критичний огляд останніх досягнень у галузі композиційних матеріалів.

Для систематизації та глибокого аналізу найновіших наукових досягнень огляд тенденцій в області композитних матеріалів побудований довкола шести основних концептуальних тенденцій:

Екологічно стійкі композиційні матеріали, що підлягають вторинній переробці *(recyclable & sustainable composites)* - розробка перероблюваних і біобазованих композитів на основі динамічної хімії вітримерів для переходу до циркулярної економіки.

Самозагоювальні композити (*self-healing composites)* - створення матеріалів із функцією автономного або стимульованого самовідновлення для автономної ліквідації прихованих внутрішніх дефектів.

Розумні або самочутливі композити (*smart/self-sensing composites*) - інтеграція сенсорних функцій безпосередньо в структуру матеріалу для моніторингу його стану в реальному часі (Structural Health Monitoring).

Конструкційні акумуляторні композити (*structural battery composites)* - поєднання несучих механічних функцій із накопиченням електроенергії («безмасова» енергетика).

Композити, виготовлені методом 3D-друку та адитивного виробництва *(3D-printed & additively manufactured composites)* - адитивне виготовлення складних геометрій із точним орієнтуванням безперервного волокна.

Адаптивні композити, розроблені за допомогою ШІ *(AI-designed & adaptive composites)* - генеративний дизайн мікроструктур за допомогою штучного інтелекту та розробка адаптивних (4D) метаматеріалів.

В даній роботі, яка є першою з двох частин огляду, представлено розвиток технологій екологічно стійких композиційних матеріалів, самозагоювальних композитів та розумних або самочутливі композитів.

Концептуальні тенденції сучасного розвитку композитів. Екологічно стійкі композиційні матеріали, що підлягають вторинній переробці (**recyclable & sustainable composites**), є революційним класом матеріалів, розробленим для подолання глобальної кризи пластикових відходів та мінімізації антропогенного впливу на довкілля протягом усього їхнього життєвого циклу. Традиційні волокнисто-армовані полімери, які отримали колосальне поширення в авіабудуванні, автомобільній індустрії та вітроенергетиці, мають один критичний недолік - через свою надзвичайну міцність та зшиту структуру матриці їх практично неможливо класично утилізувати. Як наслідок, переважна більшість відпрацьованих композитів після завершення терміну їхньої служби опиняється на звалищах або спалюється, що створює велике екологічне навантаження [1].

Для розв'язання цієї проблеми сучасна індустрія переходить до концепції екологічної стійкості, де фундаментальним етапом стає проектування матеріалів з урахуванням повного життєвого циклу (whole-life design) [1]. Справжня циклічність починається задовго до етапу утилізації — ще на стадії розробки та вибору компонентів, які згодом можна буде легко ідентифікувати, розділити та повернути у виробничий цикл. Важливим елементом цього підходу є поступова заміна синтетичного армування природними біорозкладними волокнами, такими як льон, коноплі або джут. Окрім того, виробники активно впроваджують у нові матеріали вторинну сировину, наприклад, побічні продукти промислового виробництва скловолокна, що дозволяє різко знизити загальну енергомісткість та вуглецевий слід кінцевого продукту без залучення первинних ресурсів. Головною перешкодою на шляху до повноцінного рециклінгу традиційних композитів є термореактивні смоли, які при затвердінні утворюють незворотні ковалентні зв'язки і більше не можуть бути розплавлені. Сучасна наука долає цей бар'єр за допомогою використання термопластичних матриць, таких як поліпропілен, нейлон, поліетилентерефталат чи високопродуктивний поліефіреферкетон, які здатні розм'якшуватися під дією високої температури для повторного формування. Іншим перспективним напрямком є створення рецикльованих реактопластів, зокрема вітримерів та систем із розщеплюваними зв'язками. Ці унікальні полімери поєднують у собі високі механічні та хімічні властивості класичних термореактивних смол із можливістю хімічної деполімеризації або термічного перероблення за контрольованих умов [1].

Сьогодні виділяють три основні технологічні шляхи вторинної переробки таких інноваційних композиційних матеріалів. Найбільш простим є механічний метод, який передбачає подрібнення відходів, проте він неминуче супроводжується деградацією волокон та зниженням їхнього механічного потенціалу. Більш глибоку регенерацію забезпечує термічний рециклінг (зокрема піроліз), під час якого під впливом високих температур випалюється смола, вивільняючи армувальні волокна для повторного використання. Найбільш перспективним з погляду збереження первинних властивостей є хімічний

сольволіз, що використовує м'які хімічні розчинники для селективного розділення та повного відновлення як високоякісних волокон, так і полімерної смоли з мінімальними пошкодженнями структури [1].

Найвищу ефективність у переході до екологічного виробництва демонструє гібридний підхід, який передбачає комбінування природних волокон льону чи конопель із відновленим промисловим скловолокном. Рослинні волокна від природи мають низьку термічну стабільність та високу схильність до поглинання вологи, що суттєво обмежує їхню довговічність. Інтеграція шарів переробленого скловолокна у таку структуру створює надійний бар'єрний ефект, який усуває ці природні вади, кардинально підвищуючи міцність матеріалу, стримуючи проникнення вологи через капілярні канали та покращуючи загальну термічну стійкість гібридного композиту під час експлуатації. Наприклад, в роботі, [1] розглянуто характеристики 5 типів 6-ти шарових композитів — F6 (6 шарів льону), H6 (6 шарів конопель), G6/6G (6 шарів вторинного скловолокна), F4G2 (гібрид з 4 шарів льону та 2 шарів скловолокна в середині) та H4G2 (гібрид з 4 шарів конопель та 2 шарів скловолокна в середині). Показано, що гібридизація збільшує міцність на 88%. Додавання шарів вторинного скловолокна (G) в середину структури композитів з натуральних волокон (F4G2 та H4G2) призвело до збільшення міцності на розрив на 88% та модуля пружності (жорсткості) на 45% порівняно з чистими композитами на основі натуральних волокон (6F, 6H). Також, чисті натуральні композити втрачають 22-25% своєї міцності після 25 днів занурення у воду через гідрофільну природу рослинних волокон. Введення шарів скловолокна діє як бар'єр, знижуючи втрати міцності до 19% (для Flax/Glass) та 21% (для Hemp/Glass). До того ж введення скловолокна підвищує максимальну температуру термічного розкладу композиту до 369.98 °C (для 6G) та знижує загальну втрату маси, покращуючи опір матеріалу високим температурам. Використання вторинного скловолокна дозволяє отримати механічні характеристики матеріалу, порівнянні з первинним скловолокном, але з суттєво меншим екологічним слідом. Це вирішує дозволить вирішити такі проблеми як зниження енергомісткості та баланс характеристик. Виробництво первинного скловолокна вимагає величезної кількості енергії (13–32 МДж/кг). Використання відходів виключає ці витрати й запобігає утворенню вторинного сміття. Натуральні волокна є відновлюваними та мають низький рівень викидів CO_2, але страждають від низької вологостійкості. Гібридизація з вторинним склом нівелює ці слабкі сторони, забезпечуючи матеріалу довговічність для застосування в будівництві (наприклад, для зміцнення залізобетонних балок) [1].

Виготовлення композиційних матеріалів супроводжується проблемою токсичності, вироби із композитів мають певні труднощі із ремонту та досить складні в переробці. Одним із цікавих рішень цих проблем запропонували автори роботи [2] - повністю біологічна епоксидна смола-вітример, яка дозволяє створювати вуглепластики, що одночасно є міцними, здатними до самовідновлення та легкого хімічного рециклінгу. Трансформація традиційних вуглепластиків у біорозкладні та придатні до переробки матеріали передбачає фундаментальну заміну їхньої хімічної основи. Здобутком у цьому напрямі став синтез нового біо-мономера на основі похідної лігніну. Цей крок дозволив повністю відмовитися від токсичного нафтохімічного бісфенолу. Отримана смола відрізняється низькою в'язкістю, що суттєво спрощує процес вакуумного інфузійного формування композитних конструкцій і виключає потребу у використанні додаткових екологічно шкідливих розчинників. Функціональність нового матеріалу забезпечується впровадженням динамічної хімії вітримерів.

Завдяки використанню адипінової кислоти та наявності гнучких пропільних ланцюгів у молекулярній структурі, полімерна сітка набуває здатності до внутрішньої перебудови. При нагріванні вище критичної температури в матеріалі активується реакція трансестерифікації (переетерифікації). Цей механізм дозволяє полімеру ефективно знімати внутрішні механічні напруження та перегруповувати ковалентні зв'язки без втрати загальної структурної цілісності. Завдяки такій молекулярній архітектурі розроблений біо-мономер демонструє механічні характеристики, рівноцінні класичним комерційним аналогам на основі нафти, міцність на розрив досягає 543 МПа, а на вигин - 414 МПа. При цьому матеріал набуває виражених властивостей самовідновлення. Під час нагрівання до 220 °С вітример демонструє надшвидку релаксацію напружень (менше 30 секунд) і повністю усуває близько 90% поверхневих подряпин за 30 хвилин.

Вирішальною перевагою розробки є її придатність до лагідної хімічної переробки. На відміну від традиційних реактопластів, цей композит легко розщеплюється у середовищі етиленгліколю при температурі 160 °С протягом 5 годин. У процесі переробки розчиняється лише смола - матриця, тоді як коштовні вуглецеві волокна вилучаються абсолютно неушкодженими, повністю зберігаючи свою поверхневу морфологію, хімічну структуру та механічні властивості для повторного використання у нових циклах виробництва.

Отже, автори роботи [2] пропонують готове рішення для «зеленого» матеріалознавства — біо-композит, який за міцністю не поступається традиційним, але піддається термічному ремонту та безпечній переробці. Однак, треба відмітити певні недоліки розробленого біо-композиту - високі енергетичні витрати під час його обслуговування та переробки. Для активації ефекту самовідновлення потрібне нагрівання до високих 220 °С, а процес хімічної переробки вимагає тривалої витримки (5 годин при 160 °С), що складно реалізувати для великогабаритних конструкцій. Крім того, велика кількість естерних зв’язків у структурі вітримеру робить матрицю вразливою до деградації через гідроліз при тривалій експлуатації у вологому середовищі, а сам синтез мономера з лігніну все ще поступається нафтохімічному аналогу за собівартістю та легкістю масштабування.

Проблема неможливості переробки, складності ремонту та токсичності сировини під час виготовлення стосується не лише жорстких конструкційних вуглепластиків, а й еластомерних композитних матеріалів. Якщо у випадку епоксидних матриць головною перешкодою є сшита структура полімеру, то для каучуків аналогічним бар'єром виступає незворотна сітчаста структура, яка утворюється під час традиційної вулканізації сіркою. Автори роботи [3] запропонували рішення - біо-композитний вітример на основі натурального каучуку, підсилений нанокристалами целюлози, який легко переробляється і ремонтується за рахунок динамічних ангідрид-епоксидних зв'язків.

Проблема утилізації еластомерних та гумотехнічних композитів обумовлена незворотною сітчастою структурою, яка утворюється під час традиційної вулканізації сіркою. Для вирішення цього завдання було розроблено екологічно сталий біо-композитний вітример на основі натурального каучуку. Автори замінили класичну вулканізаційну сітку на динамічну ковалентну мережу, сформовану завдяки реакції між епоксидованим каучуком та ангідридними зшиваючими агентами. Такий підхід дозволив зберегти еластичність гуми за нормальних умов, надавши їй здатності до термопластичного повторного формування при підвищених температурах. Для забезпечення високих механічних характеристик, необхідних для промислового застосування, матрицю

матеріалу було підсилено відновлюваними нанокристалами целюлози. Введення відновлюваними нанокристалами целюлози створило щільну сітку міжфазних взаємодій через водневі та ковалентні зв'язки, що призвело до зростання модуля пружності матеріалу майже у 10 разів порівняно з неущільненою матрицею. При цьому композит зберіг високу ударну в'язкість та стійкість до розриву. Завдяки термічно зворотним ангідрид-епоксидним зв'язкам розроблений каучуковий біо-композит демонструє замкнений цикл переробки. Зношені або пошкоджені деталі з цього матеріалу можуть бути подрібнені та повторно відформовані шляхом гарячого пресування без додавання нових реагентів. Експериментально доведено, що навіть після трьох послідовних циклів переробки та відновлення композит зберігає понад 92% своїх вихідних фізико-механічних показників.

Попри високі показники рециклінгу, розроблений каучуковий вітример має низку експлуатаційних обмежень - висока гідрофільність нанокристалів целюлози робить матеріал вразливим до набухання та втрати міжфазної міцності у вологому середовищі, а низька температура активації вітримерної релаксації (140–160 °C) обмежує його використання в умовах високих робочих температур. Крім того, технологічний процес ускладнюється схильністю наноцелюлози до агломерації, що вимагає коштовних методів диспергування для забезпечення однорідності композиту.

Якщо розробка еластомірних вітримерів орієнтована на гнучкі вироби, то для аерокосмічної та автомобільної промисловості важливим є створення високотермостійких матриць, здатних витримувати високі механічні навантаження. Відповіддю на цей виклик стала розробка біобазованих епоксидних композитів із динамічною ковалентною мережею (Dynamic Covalent Network), представлена в роботі [4]. Вчені синтезували епоксидну матрицю, повністю виготовлену з рослинної сировини (похідних ваніліну та ванілінового спирту), що дозволило відмовитися від нафтохімічних компонентів і створити екологічну альтернативу промисловим смолам.

Формування динамічної сітки в цьому матеріалі реалізовано за рахунок реакції переетерифікації, яка прискорюється внутрішніми третинними аміногрупами, вбудованими безпосередньо в структуру матриці. Це виключило потребу у додаванні зовнішніх металевих каталізаторів, які зазвичай вимиваються з часом і погіршують термічну стабільність. Отриманий армований вуглеволокном композит показав високу температуру склування > 130°C, високий модуль пружності та стійкість до агресивних хімічних розчинників за нормальних умов експлуатації.

Завдяки зворотності динамічних зв'язків при підвищеній температурі, даний композит демонструє повну замкнену переробку. При нагріванні у спиртовому розчині полімерна матриця повністю деградує до олігомерів без пошкодження структури вуглецевого волокна. Вилучене волокно та регенерована смола можуть бути використані повторно для формування нових конструкційних деталей із збереженням понад 90% початкових механічних характеристик.

Головними недоліками цієї розробки є складність багатостадійного синтезу біо-мономерів із ваніліну, що підвищує підсумкову вартість матеріалу, а також відносно висока температура, необхідна для ініціювання рециклінгу та релаксації напружень (понад 180 °C). Крім того, наявність третинних аміногруп і гідроксильних фрагментів підвищує водопоглинання композиту при тривалому перебуванні у вологому середовищі, що може призводити до поступового зниження температури склування.

Перехід від непереробляваних смол до сталих матеріалів на основі динамічної хімії - це впевнені кроки для декарбонізації та впровадження циркулярної економіки в матеріалознавстві. Завдяки впровадженню вітримерів та біосировини (похідних лігніну, ваніліну й каучуку) вдалося замінити токсичний бісфенол А та забезпечити замкнений цикл переробки як для жорстких вуглепластиків, так і для еластомерів [1-4]. Попри високу собівартість синтезу та енергоємність відновлення, використання динамічних ковалентних мереж є вирішальним кроком до циркулярної економіки та декарбонізації промисловості.

Самозагоювальні композити (**Self-healing composites**) - це матеріали (переважно композити з полімерною матрицею), які здатні самостійно й передчасно усувати дефекти, що виникають внаслідок зовнішніх пошкоджень. Вони здійснюють ремонт автономно, без ручного втручання, відновлюючи свою цілісність і початкові функціональні властивості (такі як міцність, електропровідність чи біомедичні характеристики), що імітує природні біологічні системи регенерації. Крім компонентів для самовідновлення, ці матеріали можуть містити наповнювачі для покращення інших характеристик, наприклад, армуючі волокна. Технологія орієнтована на боротьбу з мікроскопічними та макроскопічними дефектами, що утворюються під час виробництва або в процесі експлуатації. Якщо такі дефекти не виявити вчасно, вони розростаються і можуть призвести до катастрофічного руйнування всієї конструкції. Самовідновлення допомагає усувати мікротріщини та мікророзшарування (delamination) між армуючими волокнами та полімерною матрицею; пошкодження та тріщини, викликані механічним зносом; наслідки зовнішнього впливу - удари, високий тиск, а також механічні та термічні навантаження; дефекти, спричинені корозією, фотодеградацією (руйнуванням під дією світла) чи хімічним стиранням [5].

Більшість сучасних високоміцних композитів виготовляють на основі термореактивної матриці, ремонт якої є дуже складним, особливо у випадках прихованих внутрішніх мікротріщин. Вчені виділяють два основних підходи до створення таких матеріалів - внутрішнє (intrinsic) та зовнішнє (extrinsic) відновлення. Внутрішнє (intrinsic) відновлення відбувається завдяки зворотним хімічним реакціям або фізичним взаємодіям усередині самих полімерних ланцюгів матеріалу (наприклад, через водневі зв'язки чи динамічні нековалентні взаємодії). Для запуску процесу зазвичай потрібен зовнішній стимул, наприклад, тепло чи ультрафіолетове випромінювання. Зовнішнє (extrinsic) відновлення базується на введенні в структуру композиту спеціальних сторонніх агентів загоєння (healing agents), оскільки сама матриця матеріалу не здатна відновлюватися. Цей підхід є універсальним для багатьох типів матеріалів і реалізується через додавання спеціальних резервуарів в склад композиту - рідкі речовини для ремонту (мономери, епоксидні смоли, затверджувачі) зберігаються всередині матеріалу у мікрокапсулах, порожнистих волокнах або мікросудинних мережах. Коли виникає тріщина, вона руйнує резервуар, речовина вивільняється, заповнює дефект і твердне. Інший метод передбачає вбудову в матрицю термопластів у вигляді мікрочастинок, плівок чи волокон. При нагріванні вони плавляться, дифундують у тріщини та зв'язуються з поверхнею дефекту, відновлюючи структуру після охолодження. Ефективність самозагоєння суттєво залежить від швидкості реакції речовин, часу релаксації матеріалу та умов навколишнього середовища. Проблемою, з якою зіткнулись дослідники є те, що введення агентів самовідновлення зазвичай погіршує початкові механічні властивості композиту. Тому при проектуванні таких систем завжди шукають баланс між збереженням міцності матеріалу та його здатністю до регенерації [5].

Розробка композитів із функцією самовідновлення є одним із важливих напрямків сучасних досліджень для подовження терміну служби конструкцій, які зазнають циклічних навантажень і вразливі до прихованого міжшарового розшарування. Значним досягненням у цьому напрямі стала розробка повністю біобазованих функціональних композитів із динамічними хімічними мережами, представлених в роботі [6]. Дослідники синтезували полімерну матрицю з відновлюваної рослинної сировини, інтегрувавши в її структуру зворотно-ковалентні зв'язки (зокрема шиффові основи та дисульфідні містки). Це дозволило поєднати екологічну сталість із високою здатністю до автономного регенерування.

Механізм заліковування дефектів базується на локальній обмінній реакції ковалентних зв'язків, яка активується при утворенні тріщини або під дією помірного термічного стимулу (60–80 °C). Під час виникнення мікропошкоджень динамічна мережа у місці розриву ініціює молекулярну дифузію, що призводить до «зашунтування» тріщини та відновлення суцільності матриці. Армування матеріалу натуральними або вуглецевими волокнами забезпечує високі механічні характеристики, запобігаючи втраті жорсткості при багаторазових циклах відновлення. Експериментальні тести [6] показали, що розроблений біо-композит здатен відновлювати до 92–95% початкової міцності на розрив та міжшарового зсуву вже після першого циклу заліковування. Більше того, завдяки збереженню рухливості динамічних зв'язків матеріал демонструє здатність до багаторазового самовідновлення в одній і тій самій зоні пошкодження, що робить його перспективним для використання в елементах інтер'єру автомобілів, вітроенергетиці та захисних покриттях.

Однак, недоліками розробленого біо-композиту є потреба в зовнішньому термічному стимулі для швидкого заліковування (автономне відновлення за кімнатної температури триває занадто довго) та зниження ефективності регенерації за наявності забруднень чи вологи всередині тріщини. Крім того, динамічні дисульфідні та шиффові зв'язки мають відносно низьку термічну стабільність, що обмежує максимальну робочу температуру експлуатації матеріалу межею у 100–120 °C.

Якщо використання динамічних полімерних мереж вимагає зовнішнього термічного чи світлового впливу для активації заліковування, то для багатьох аерокосмічних і транспортних конструкцій досить важливим є саме автономне реагування матеріалу в момент виникнення пошкодження. Для вирішення цього завдання було розроблено вуглепластики із капсульованою системою автономного самовідновлення [7]. Дослідники рівномірно розподілили в епоксидній матриці мікрокапсули на основі сечовино-формальдегідної оболонки, наповнені реакційноздатним мономером (дициклопентадієном), а також тверді частки каталізатора Граббса.

Механізм функціонування матеріалу базується на механічній активації. При утворенні внутрішньої мікротріщини чи міжшарового розшарування передній край тріщини розриває оболонку мікрокапсул. Рідкий загоювальний агент під дією капілярних сил витікає у порожнину дефекту, де вступає в контакт із розсіяними часточками каталізатора. Це ініціює швидку реакцію метатезисної полімеризації з відкриттям кільця, яка перетворює рідкий монор у міцний зшитий полімер за кімнатної температури протягом кількох годин, ефективно «склеюючи» тріщину зсередини. Проведені випробування [7] на міжшарову в'язкість руйнування довели, що дана система здатно автономно відновлювати до 80–85% в'язкості руйнування після виникнення первинного розшарування.

Важливо, що введення мікрокапсул оптимального розміру (50–100 мкм) та концентрації (до 10% за масою) не призвело до суттєвого погіршення початкових статичних механічних характеристик композиту, забезпечуючи надійний захист від втомного руйнування при циклічних навантаженнях.

Треба відзначити, що незважаючи на суттєвий прорив у вирішенні проблеми внутрішнього розшарування та мікротріщин у важконавантажених вуглепластиках без потреби у зовнішньому нагріванні, основним недоліком капсульованих систем є одноразовість дії - після розриву капсули в конкретній зоні повторне утворення тріщини на тому самому місці вже не підлягає заліковуванню через вичерпання запасу агента. Крім того, присутність мікрокапсул може знижувати локальну міцність міжфазного контакту при підвищених концентраціях, а самі вивільнені мономери та каталізатори Граббса є досить дорогими і схильними до поступової втрати активності (деактивації) при тривалому зберіганні матеріалу під впливом кисню та вологи.

Отже, головне обмеження мікрокапсульних систем (їхня одноразовість) спонукало дослідників до створення більш досконалих біоміметичних архітектур, здатних відновлювати матеріал багаторазово в одній і тій самій зоні. Для вирішення цієї проблеми було розроблено конструкційні композити з інтегрованою судинною мережею[8]. Автори роботи [8] сформували всередині матриці композиту розгалужену систему порожнистих мікроканалів за допомогою технології вимивання жертовних волокон. Це дозволило створити внутрішню «кровоносну» систему для постійної доставки реакційноздатних компонентів. Функціонування судинного композиту базується на двокомпонентній подачі рідких смол під тиском. При виникненні макропошкоджень або міжшарового розшарування тріщина перетинає мікроканали, що спричиняє заповнення пошкодженого об'єму рідкими носіями (епоксидною смолою та затверджувачем) безпосередньо з зовнішнього або внутрішнього резервуара. Змішування компонентів у порожнині тріщини ініціює полімеризацію, яка повністю монолітизує пошкоджену ділянку без необхідності демонтажу конструкції.

Експериментальні дослідження, представлені в роботі [8], підтвердили, що судинний підхід дозволяє ліквідовувати не лише мікротріщини, а й масштабні внутрішні delamination-дефекти площею в кілька квадратних сантиметрів. Використовуючи оптимізовану схему доставки загоювального агента, було досягнуто десяти циклів руйнування та загоєння з відновленням, в середньому, від 55% до 95% початкової швидкості вивільнення критичної енергії деформації.

Однак, такий склад композиту також не позбавлено недоліків, особливістю судинного підходу є необхідність наявності зовнішнього обладнання (насосів, резервуарів та систем контролю тиску) для подачі загоювального агента, що значно ускладнює та підвищує вагу конструкції. Крім того, самі порожнисті мікроканали діють як додаткові концетратори напружень, що може призводити до зниження початкової статичної міцності композиту на стиск та згинання до 10–15%.

Розвиток композитів із функцією самовідновлення демонструє еволюцію від пасивного очікування деградації до активної регенерації структури. Завдяки комбінації динамічних ковалентних мереж, капсулювання та судинних (васкулярних) систем вдалося досягти ефективного усунення як мікротріщин, так і масштабних міжшарових розшарувань із відновленням 80–95% механічної міцності [5-8]. Попри наявні обмеження - потребу в зовнішніх стимулах, одноразовість дій капсул та ускладнення архітектури судинними каналами -

самовідновлювані композити є однією із проривних технологій для суттєвого подовження ресурсу та безпеки аерокосмічних і транспортних конструкцій.

Розумні або самочутливі композити (smart/self-sensing composites) - це клас передових конструкційних матеріалів, які мають внутрішню здатність відчувати та реагувати на зміни власного стану, як-от механічне напруження (деформація), поява тріщин, пошкодження, а також коливання температури або вологості. На відміну від традиційних систем моніторингу, які покладаються на прикріплені ззовні чи інтегровані дискретні датчики, самочутливі композити самі виступають у ролі сенсорів. Це дозволяє вести безперервний моніторинг стану конструкцій у реальному часі без необхідності встановлення зовнішнього вимірювального обладнання. В основі роботи самочутливих матеріалів лежить явище п'єзорезистивності - зміна електричного опору (або провідності) під дією механічних деформацій. При навантаженні, деформації або закритті й відкритті мікротріщин змінюються внутрішні контакти та відстані між провідними частинками в матеріалі, що призводить до вимірюваної зміни електричного опору всієї системи. Щоб надати композитному матеріалу чутливості, у його діелектричну матрицю (наприклад, цементне тіло або полімерну смолу) в невеликій кількості вводять спеціальні електропровідні наповнювачі. Найчастіше для цього використовують вуглецеві нанотрубки, сажу, похідні графену, а також сталеві чи вуглецеві волокна. Вони утворюють у мікроструктурі матеріалу безперервну провідну мережу, чутливу до будь-яких зрушень. Забезпечення надійності складних конструкцій із композитів вимагає не лише здатності матеріалів до регенерації, а й можливості своєчасно виявляти приховані внутрішні пошкодження на ранніх стадіях. Відповіддю на цей виклик стала розробка "розумних" композитів із функцією самодіагностики для систем моніторингу стану конструкцій (Structural Health Monitoring, SHM) [9-11, 5].

Дослідження зв'язку між використовуваними матеріалами, провідними наповнювачами, механічною міцністю та їхнім спільним впливом на електричний опір, провідність і метрику чутливості отриманих систем у галузі самочутливих цементних композитів для інтелектуальної дорожньої інфраструктури представлено в роботі [9]. Автори аналізують біоміметичні принципи проектування, структурні та сенсорні характеристики, а також методи вимірювання й інтерпретації сигналів у цементних та асфальтових сумішах. Це дозволяє окреслити перспективи створення екологічно ефективних, надійних і довговічних дорожніх покриттів нового покоління. Результати роботи [9] демонструють широкі можливості інтеграції самочутливих цементних композитів у транспортну інфраструктуру для вирішення завдань структурного моніторингу (SHM), динамічного зважування і контролю інтенсивності руху. Матеріали здатні детектувати механічні напруження, деформації, тріщини, а також фіксувати зміни температури, вологості чи утворення льоду на поверхні. Дослідження підтверджує, що чутливість матеріалу керується п’єзорезистивним ефектом і досягає максимуму поблизу порогу електричної перколяції. Окрім узагальнення глобальних емпіричних даних, де порівнюються характеристики різних типів наповнювачів (таких як вуглецеві нанотрубки, сажа, графіт та металеві волокна), автори обґрунтовують переваги гібридних систем. Поєднання нановуглецю з короткими сталевими волокнами дозволяє одночасно підвищити чутливість, в'язкість руйнування та укладальність суміші. У статті також доведено перевагу вимірювань на змінному струмі високої частоти (зокрема за допомогою методу імпедансної спектроскопії) над постійним струмом. Це

дозволяє нівелювати дрейф сигналу через ємнісне заряджання та відокремити вплив вологості від безпосереднього механічного відгуку матриці.

Попри значний потенціал, автори роботи [9] виділяють серйозні матеріалознавчі та експлуатаційні бар'єри, які стримують масштабування технології на реальні об'єкти. Головною проблемою матеріалів залишається складність рівномірного диспергування провідних наноматеріалів у польових умовах через їхню природну схильність до агломерації. На етапі впровадження першочерговим є температурно-вологий дрейф навколишнього середовища та наявність звичайної сталевої арматури в залізобетоні, що суттєво спотворює корисні електричні сигналі та ускладнює калібрування сенсорів. Крім того, довгострокова довговічність таких композитів, зокрема вплив наповнювачів на швидкість корозії арматури та стійкість до проникнення хлоридів, залишається маловивченою. Це вимагає додаткових тривалих випробувань на карбонізацію, вологопроникність та усадку. На практичному рівні розгортання інфраструктури основними викликами є висока вартість матеріалів, складність замішування й укладання великих об'ємів суміші, а також низька довговічність з'єднувальних дротів та електродів під впливом динамічних навантажень важкого транспорту та клімату. Наостанок, у галузі повністю відсутні загальноприйняті стандарти проектування, встановлення та уніфіковані інженерні протоколи інтерпретації сигналів.

Дослідженню інтелектуальних самочутливих композиційних матеріалів для застосування в галузі цивільного будівництва з метою підвищення безпеки та експлуатаційних характеристик інфраструктурних об'єктів присвячена робота [10]. Основною метою цієї праці є надання детального огляду різних систем самочутливих композитів, які використовують для моніторингу стану конструкцій. Автори аналізують композити на основі різних форм вуглецевих добавок - коротких волокон, безперервних волокон, мікрочастинок, а також наноструктур (нановолокон та нанотрубок). У центрі уваги дослідження перебуває принцип п'єзорезистивності, за допомогою якого матеріал отримує унікальну здатність одночасно виконувати як несучу (зміцнюючу), так і чутливу (сенсорну) функції. Це дозволяє відмовитися від встановлення традиційних зовнішніх датчиків, інтегруючи систему моніторингу безпосередньо в структуру матеріалу. Результати роботи розкривають фізико-механічні закономірності та методичні підходи до оцінки стану самочутливих систем. Автори роботи [10] класифікують методи вимірювання електричного опору (поверхневий, наскрізний та косий/діагональний), зазначаючи, що саме косе вимірювання є найбільш ефективним для одночасного виявлення розриву волокон та міжшарового розшарування композиту. Емпірично доведено, що введення коротких вуглецевих волокон у кількості 0,5 мас.% надає цементним матрицям вираженої п'єзорезистивності, дозволяючи фіксувати накопичення втомних пошкоджень через незворотне збільшення залишкового опору під дією циклічних навантажень. Для безперервних волокон показано можливість створення гібридних стрижнів (вуглеволокно-скловолокно), які генерують чіткий «сигнал тривоги» (різкий стрибок опору) у момент руйнування вуглецевого ядра, проте такі системи мають незадовільну чутливість за малих деформацій (до 0,6%). Цю проблему низької початкової чутливості вдається подолати шляхом використання вуглецевих часток замість волокон, застосування плетених композитних стрижнів з контрольованим зміщенням волокон або впровадження вуглецевих нанотрубок та нановолокон, які за рахунок нанорозмірної провідної мережі реєструють мікронапруження та зародження тріщин на ранніх стадіях. Практичне

застосування таких рішень підтверджено успішною інтеграцією датчиків на основі суміші цементу й вуглецевих нановолокон у дорожнє покриття, де вони продемонстрували вищу точність фіксації осей автомобілів порівняно з комерційними тензодатчиками. Водночас автори огляду критично окреслюють фундаментальні матеріалознавчі та експлуатаційні прогалини, які потребують вирішення для практичного впровадження технології. По-перше, серйозним викликом залишається розробка самочутливих систем, здатних не просто фіксувати факт деформації чи появи тріщини, а й точно визначати просторові координати (локалізацію) пошкодження всередині конструктивного елемента. По-друге, використання найбільш чутливих вуглецевих наноматеріалів суттєво обмежується їхньою високою вартістю та вираженими технологічними складнощами, пов'язаними з агломерацією частинок і необхідністю досягнення їхнього рівномірного диспергування в матриці. По-третє, у чинній науковій літературі практично відсутні систематизовані дані про довгостроковий вплив кліматичних факторів (коливань температури, вологості, агресивних середовищ) на чутливість та стабільність електричного сигналу композитів у процесі тривалої експлуатації. З огляду на це, автори вказують на гостру потребу в подальших дослідженнях, спрямованих на здешевлення електропровідних компонентів та розробку методів захисту сенсорних систем від зовнішніх впливів.

Серед наноматеріалів, що використовуються як добавки для виробництва самочутливих матеріалів у малих кількостях, вуглецеві нанотрубки мають найбільшу кількість застосованість, за ними йдуть вуглецеве волокно і сталеве волокно. У роботі [11] представлено порівняльний аналіз різних сенсорних матеріалів для Health Monitoring Systems.

Таблиця 1 [11]

Метод	Переваги	Недоліки
Оптоволоконні сенсори	Висока точність, довговічність	Висока вартість, потреба в джерелах живлення
П'єзоелектричні сенсори	Помірна чутливість, простота інтеграції	Обмежені можливості для використання на великих площах, середня вартість
Вуглецеві нанотрубки	Висока електропровідність, хороша гнучкість	Складність забезпечення рівномірного диспергування, висока вартість
Вуглецеві волокна	Висока механічна міцність, мала маса	Відносно висока вартість, складність диспергування
Сталеві волокна	Висока механічна міцність, легкість введення в бетонні матриці	Велика маса, можуть впливати на властивості основного матеріалу
Графенові нанопластинки	Висока електропровідність, відмінні механічні властивості	Складність великомасштабного виробництва, висока вартість
Графітовий порошок	Низька вартість, хороша електропровідність	Нижча чутливість, можливе агломерування
Наночастинки технічного вуглецю	Велика питома поверхня, хороша електропровідність	Складність забезпечення рівномірного диспергування, змінна вартість

Як зазначають автори, кожен метод має свої характеристики та ідеальні застосування. Наприклад, волоконно-оптичні датчики є точними та довговічними, але їхня вартість висока, і вони потребують додаткових джерел живлення. П'єзоелектричні датчики, з іншого боку, мають помірну чутливість та легко інтегруються, але вони мають обмеження щодо великих площ та середню вартість. Крім того, вуглецеві нанотрубки забезпечують високу електропровідність та гнучкість, але вони стикаються з труднощами з рівномірним розсіюванням та є дорогими.

У дослідженні [12] вивчалися характеристики самочутливих цементних матеріалів, виготовлених шляхом вбудовування самочутливих цементних композитів, надрукованих на 3D-принтері, з метою забезпечення можливості оцінки стану компонентів, виготовлених методом адитивного виробництва. Самочутливий композит складався з цементної суміші, легованої графеном та целюлозно-волокнистим полімером, що використовується для досягнення електричної перколяції та забезпечення високого п'єзорезистивного ефекту. Розроблено стандартизований протокол виготовлення як самочутливих кубічних зразків, і балкових зразків, функціоналізованих вбудованими чутливими вузлами. В цілому, це дослідження демонструє можливість вбудовування локалізованих самочутливих шарів у 3D-друковані структурні елементи з використанням цементних композитів, функціоналізованих наповнювачами, що містять вуглецю. Розроблений підхід пропонує масштабований та довговічний метод інтеграції можливостей вимірювання деформації у надруковані на 3D-принтері цементні компоненти з можливим застосуванням для оцінки стану 3D-друкованих цементних компонентів та конструкцій. Він також пропонує рішення для створення самочутливих бетонів, які важко виготовити за наявності заповнювачів.

Отже, самочутливі композити (smart/self-sensing composites) - це матеріали, здатні одночасно виконувати конструктивну функцію та самостійно контролювати свій стан, зокрема деформації, навантаження та пошкодження. Головною перевагою таких композитів є можливість інтегрувати функцію сенсора безпосередньо в конструкційний матеріал, зменшуючи потребу в окремих датчиках. Це робить їх перспективними для моніторинг технічного стану конструкцій, зокрема для моніторингу бетонних, цементних і 3D-друкованих конструкцій.

Висновки. Розвиток композиційних матеріалів спрямований на перехід від традиційних пасивних матеріалів до багатофункціональних, інтелектуальних, адаптивних та екологічно орієнтованих систем. Визначені шість тенденцій - перероблювані та сталі композити, самовідновлювані, самочутливі, структурні акумуляторні, 3D-друковані та ШІ-спроєктовані композити - відображають основні напрями сучасної трансформації галузі. В першій частині представлено особливості розвитку перероблюваних та сталих композитів, самовідновлюваних та самочутливих. Майбутнє композиційних матеріалів пов’язане не лише з підвищенням міцності та зменшенням маси, а з інтеграцією функціональності, автономності, цифрового проєктування та сталого розвитку. Водночас широке практичне впровадження нових композитів потребує вирішення проблем масштабування виробництва, вартості, довговічності, стандартизації, переробки та підтвердження надійності в реальних умовах експлуатації.

Список літератури

1. Lin, H., Dong, K., Luan, J., Li, C., Zhao, D., Zhao, C., & Li, X. Repairable, Degradable and Recyclable Carbon Fiber-Reinforced Bio-Based Epoxy Vitrimer Composites

Enabled by Facile Transesterification. Polymers, 2025, 17(17), 2387. https://doi.org/10.3390/polym17172387

2. Ohaka, T., & Mekonnen, T. H. Recyclable and Sustainable Natural Rubber Biocomposite Vitrimers Induced by Dynamic Anhydride–Epoxy Bonds. ACS Applied Polymer Materials, 2025, 7(3), 1347–1360. https://doi.org/10.1021/acsapm.4c03054

3. Salman, M., Ashraf, R., & Wang, X. Sustainably Sourced Dynamic Covalent Network Epoxy Thermosets and Composites: Synthesis, Performance, and Applications. Safety Science and Technology, 2026, 1(2), e70019. https://doi.org/10.1002/sst3.70019

4. Nadim, E., Major, I., Devine, D., & Paraskar, P. Biobased self-healing functional composites and their applications. Journal of Materials Science: Composites, 2025, 6(1), 3. https://doi.org/10.1186/s42252-025-00065-x

5. Xie, J., Han, L., Luo, Z., Li, Q., & He, J. Microcapsule-Based Autonomous Self-Healing of Electrical Damage in Dielectric Polymers Induced by In Situ Generated Radicals. ACS Applied Materials & Interfaces, 2023, 15(8), 11185–11192. https://doi.org/10.1021/acsami.3c00520

6. Hart, K. R., Lankford, S. M., Freund, I. A., Patrick, J. F., Krull, Brett. P., Wetzel, E. D., Sottos, N. R., & White, S. R. Repeated healing of delamination damage in vascular composites by pressurized delivery of reactive agents. Composites Science and Technology, 2017, 151, 1–9. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.07.027

7. Mohamed, S. M., Rashid, S., & Hanif, A. Self-Sensing Cementitious Composites for Smart Road Infrastructure. Procedia Structural Integrity, 2026, 83, 72–78. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2026.07.009

8. Rana, S., P, S., Fangueiro, R., Gomes Correia, A., & 1 Fibrous Materials Research Group, University of Minho, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal. A review on smart self-sensing composite materials for civil engineering applications. AIMS Materials Science, 2016, 3(2), 357–379. https://doi.org/10.3934/matersci.2016.2.357

9. Vasconcelos, A. R. C., De Matos, R. A., Silveira, M. V., & Mesquita, E. Applications of Smart and Self-Sensing Materials for Structural Health Monitoring in Civil Engineering: A Systematic Review. Buildings, 2024, 14(8), 2345. https://doi.org/10.3390/buildings14082345

10. Chaudhary, R., Xu, J., Xia, Z., & Asp, L. E. Unveiling the Multifunctional Carbon Fiber Structural Battery. Advanced Materials, 2024, 36(48), 2409725. https://doi.org/10.1002/adma.202409725

11. Danzi, F., Salgado, R. M., Oliveira, J. E., Arteiro, A., Camanho, P. P., & Braga, M. H. Structural Batteries: A Review. Molecules, 2021, 26(8), 2203. https://doi.org/10.3390/molecules26082203

12. Moyer, K., Meng, C., Marshall, B., Assal, O., Eaves, J., Perez, D., Karkkainen, R., Roberson, L., & Pint, C. L. Carbon fiber reinforced structural lithium-ion battery composite: Multifunctional power integration for CubeSats. Energy Storage Materials, 2020, 24, 676–681. https://doi.org/10.1016/j.ensm.2019.08.003

Отримано: 09 вересня 2026

Прийнято: 29 вересня 2026

Опубліковано: 18 жовтня 2026

A. V. BALALAIEV, O. Y. BUSLIUK

WEAR RESISTANCE OF ELECTRIC-SPARK COATINGS, OBTAINED FROM POWDER WIRE, IN CONTACT WITH WOOD. PART 1

This paper provides a critical review of recent advances in composite materials. This review of current research demonstrates that the development of composite materials is moving away from traditional passive materials toward multifunctional, intelligent, adaptive, and environmentally oriented systems. Six identified trends - recyclable and sustainable composites, self-healing, self-sensing, structural battery-powered, 3D-printed, and AI-engineered composites -reflect the main directions of the industry's current transformation. The future of composite materials is associated not only with increased strength and reduced weight but also with the integration of functionality, autonomy, digital design, and sustainability. At the same time, widespread practical implementation of new composites requires addressing issues of production scalability, cost, durability, standardization, processing, and reliability verification under real-world operating conditions. A promising direction for further research is the combination of these concepts in a single material, for example, the creation of 3D-printed, self-healing, and self-sensing composites with the possibility of AI-assisted optimization of their structure while simultaneously ensuring environmental sustainability.

Keywords: composite, stable composites, self-healing composites, self-sensing composites, environmentally sustainable composites.

References

1. Lin, H., Dong, K., Luan, J., Li, C., Zhao, D., Zhao, C., & Li, X. Repairable, Degradable and Recyclable Carbon Fiber-Reinforced Bio-Based Epoxy Vitrimer Composites Enabled by Facile Transesterification. Polymers, 2025, 17(17), 2387. https://doi.org/10.3390/polym17172387

2. Ohaka, T., & Mekonnen, T. H. Recyclable and Sustainable Natural Rubber Biocomposite Vitrimers Induced by Dynamic Anhydride–Epoxy Bonds. ACS Applied Polymer Materials, 2025, 7(3), 1347–1360. https://doi.org/10.1021/acsapm.4c03054

3. Salman, M., Ashraf, R., & Wang, X. Sustainably Sourced Dynamic Covalent Network Epoxy Thermosets and Composites: Synthesis, Performance, and Applications. Safety Science and Technology, 2026, 1(2), e70019. https://doi.org/10.1002/sst3.70019

4. Nadim, E., Major, I., Devine, D., & Paraskar, P. Biobased self-healing functional composites and their applications. Journal of Materials Science: Composites, 2025, 6(1), 3. https://doi.org/10.1186/s42252-025-00065-x

5. Xie, J., Han, L., Luo, Z., Li, Q., & He, J. Microcapsule-Based Autonomous Self-Healing of Electrical Damage in Dielectric Polymers Induced by In Situ Generated Radicals. ACS Applied Materials & Interfaces, 2023, 15(8), 11185–11192. https://doi.org/10.1021/acsami.3c00520

6. Hart, K. R., Lankford, S. M., Freund, I. A., Patrick, J. F., Krull, Brett. P., Wetzel, E. D., Sottos, N. R., & White, S. R. Repeated healing of delamination damage in vascular composites by pressurized delivery of reactive agents. Composites Science and Technology, 2017, 151, 1–9. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.07.027

7. Mohamed, S. M., Rashid, S., & Hanif, A. Self-Sensing Cementitious Composites for Smart Road Infrastructure. Procedia Structural Integrity, 2026, 83, 72–78. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2026.07.009

8. Rana, S., P, S., Fangueiro, R., Gomes Correia, A., & 1 Fibrous Materials Research Group, University of Minho, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal. A review on smart self-sensing composite materials for civil engineering applications. AIMS Materials Science, 2016, 3(2), 357–379. https://doi.org/10.3934/matersci.2016.2.357

9. Vasconcelos, A. R. C., De Matos, R. A., Silveira, M. V., & Mesquita, E. Applications of Smart and Self-Sensing Materials for Structural Health Monitoring in Civil Engineering: A Systematic Review. Buildings, 2024, 14(8), 2345. https://doi.org/10.3390/buildings14082345

10. Chaudhary, R., Xu, J., Xia, Z., & Asp, L. E. Unveiling the Multifunctional Carbon Fiber Structural Battery. Advanced Materials, 2024, 36(48), 2409725. https://doi.org/10.1002/adma.202409725

11. Danzi, F., Salgado, R. M., Oliveira, J. E., Arteiro, A., Camanho, P. P., & Braga, M. H. Structural Batteries: A Review. Molecules, 2021, 26(8), 2203. https://doi.org/10.3390/molecules26082203

12. Moyer, K., Meng, C., Marshall, B., Assal, O., Eaves, J., Perez, D., Karkkainen, R., Roberson, L., & Pint, C. L. Carbon fiber reinforced structural lithium-ion battery composite: Multifunctional power integration for CubeSats. Energy Storage Materials, 2020, 24, 676–681. https://doi.org/10.1016/j.ensm.2019.08.003

Балалаєв Антон Валерійович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів Національного університету «Київський авіаційний інститут», an@com.edu.ua, https://orcid.org/0000-0003-3603-4512.

Буслюк Олег Юрійович – аспірант кафедри електричної інженерії та енергетичного машинобудування Національного університету «Київський авіаційний інститут», 4099851@stud.kai.edu.ua, https://orcid.org/0009-0007-8418-9822.

Anton Balalaiev – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National University "Kyiv Aviation Institute".

Oleh Busliuk – PhD student, Department of Electrical Engineering and Power Engineering, National University "Kyiv Aviation Institute".