

ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ТА ОБРОБКИ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

TECHNOLOGIES OF OBTAINING AND PROCESSING OF CONSTRUCTION MATERIALS

УДК 620.1-419:629.73.002

- Сергій Беліков д-р техн. наук, професор, професор кафедри транспортних технологій Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: belikov@zpu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-9510-8190
- Валерій Вініченко канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри фізичного матеріалознавства Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: valeryi_v@ukr.net, ORCID: 0009-0001-7631-9822
- Олександр Коробко старший викладач кафедри охорони праці і навколишнього середовища Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: sany.kor.17@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9461-7762
- Вадим Шаломєєв д-р техн. наук, професор, проректор з наукової роботи Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: shalomeev@zntu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-6091-837X
- Дмитро Пархісенко аспірант НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: aviardi@gmail.com ORCID: 0009-0004-2100-8201
- Анатолій Єршов д-р техн. наук, професор, професор кафедри фізики Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: eav.nuzp@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9485-4896

СТАН ПИТАННЯ ЩОДО МОЖЛИВОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ КОМПОЗИТІВ

Мета роботи. Складання науково-технічного огляду про стан, досягнення та перспективи розвитку у галузі створення композитів для застосування у авіакосмічній промисловості та розробки технологій їх виробництва. Узагальнення, і критичний аналіз відомих результатів досліджень з питань розробки та використання композитів у аерокосмічній промисловості. Виявлення областей, в яких актуально проведення подальших досліджень. Вказати авторитетні джерела щодо результатів досліджень в області застосування композитів.

Методи дослідження. Було проведено пошук відомостей щодо вуглець-вуглецевих, керамічних та металоматричних КМ, що були опубліковані за останні 15 років. Статті були знайдені за допомогою пошуку в Інтернеті в базах даних, зокрема, Scopus, Web of Science та Google Scholar. Для збору, організації та цитування дослідних матеріалів була використана програма Zotero.

Отримані результати. Систематизовано та проаналізовано стан, досягнення та перспективи розвитку у галузі створення високотемпературних композитів та розробки технологій їх виробництва. Розглянуто перспективні, на сьогодні, можливості підвищення робочих температур композитів високотемпературного призначення. Обґрунтовано вибір основних напрямків сучасних досліджень щодо застосування композитів в аерокосмічній галузі.

Наукова новизна. Розширені відомості щодо перспектив створення високотемпературних композитів з підвищеною робочою температурою та розробки технологій, які дозволять підвищити їх робочу температуру і знизити технологічні витрати енергії при виробництві з них деталей теплових двигунів.

Практична цінність. Відомості, наведені в даному науково-технічному огляді можуть бути використані як для розробки нових високотемпературних композитів, так і для вдосконалення складів та технологій виробництва відомих систем композитів, обґрунтованого вибору їх фазових складових, а також аспірантами при виборі теми дисертаційної роботи; допомогти сформулювати цілі дисертаційного дослідження, вибрати сучасні методи проведення досліджень.

Ключові слова: високотемпературні композити, матриця, волокна, технологія формування, подовжувачі сопла.

Вступ

Вторгнення росії в Україну вимагає прискорення проведення наукових досліджень щодо розробки військової техніки. В даних умовах надзвичайно важливо задіяти увесь науковий потенціал заради перемоги та захисту життя українських воїнів, а також для забезпечення розвитку нових технологій, таких як будуть сприяти економічному розвитку України. Оборонні технології тісно пов'язані із прогресом в машинобудуванні, енергетиці, електроніці, який в свою чергу, потребує, зокрема, підвищення ефективності теплових двигунів. Тобто, підвищення їх коефіцієнта корисної дії (ККД).

Щодо вказаної характеристики рідинних ракетних двигунів (РРД), то її підвищують застосуванням подовжувача сопла, тобто соплового насадку, часто радіаційного охолодження, який являє собою тонкостінну фасонну оболонку [1]. Приклади деяких демонстраційних деталей показані на рис. 1, а–е [2]. Застосування вказаних деталей дозволяє підвищити величину питомого імпульсу тяги, особливо у космосі, при зниженні загальної маси двигуна [3].

На даний момент вказаний спосіб підвищення ККД є ефективним і успішно реалізується на двигунах Atlas V, Delta IV, Falcon 9 та Ariane 5 [2].

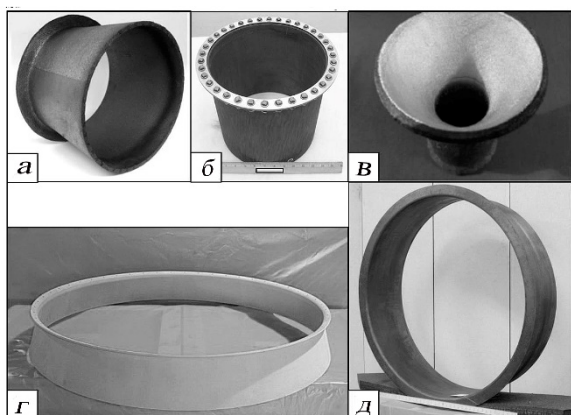


Рисунок 1. Подовжувачі сопла ракетних двигунів [3]:

а – 2D-гібрид C-ZrC/C-C на основі ПАН, виготовлений компаніями C-CAT та Ultramet, діаметр вихідної площини 11 дюймів; б – радіальний 2D евольвентний насадок виробництва Orbital ATK колишньої американської аерокосмічної та оборонної компанії, діаметр вихідної площини 11 дюймів; в – інтегральна 2D евольвентна камера згоряння/сопло з іридієвим покриттям, виготовлена компанією Orbital ATK, діаметр вихідної площини 3 дюйма; г – насадок 2D, виготовлений компанією C-CAT, з використанням покриття отриманого методами «високо-температурного розплаву» та пакетної цементації, діаметр фланця кріплення 44 дюйма; д – насадок 2D виробництва C-CAT, діаметр циліндра 42 дюйма

Ряд підходів до створення матеріалів, придатних для виготовлення подібних деталей, досліджувався SBIR (Small Business Innovation Research) и STTR

(Small Business Technology Transfer) та ін. На сьогодні, границя робочої температури подовжувача сопла становить приблизно 1100 °С, що вже не задовольняє вимоги конструкторів. Є сподівання, що розробка нових матеріалів дасть можливість підвищити робочу температуру приблизно до 2200 °С без значних втрат матеріалу внаслідок окислення, абляції тощо. В даній статті розглядається перспективність застосування армування вуглецевих, керамічних та металевих матриць різними типами волокон з метою підвищення вказаної температури.

Мета роботи

Метою статті є складання науково-технічного огляду про стан, досягнення та перспективи розвитку у галузі створення композитів та розробки технологій їх виробництва.

Матеріал і методика досліджень

Для досягнення вказаної мети в даній роботі було проведено дослідження літератури щодо композиційних матеріалів (КМ) з метою встановлення випадків їх доцільного використання в теплових двигунах. Було проведено пошук відомостей щодо вуглець-вуглецевих, керамічних та металоматричних КМ, що були опубліковані за останні 15 років.

Результати досліджень та їх обговорення

На сьогодні швидко поширюється застосування КМ, які набули великої популярності в багатьох областях промисловості завдяки своїм високим властивостям.

Важливою перевагою КМ порівняно з ізотропними матеріалами є те, що їх застосування дає можливість фахівцям цілеспрямовано створювати дані матеріали під конкретний виріб, у відповідності з діючими навантаженнями і особливостями його експлуатації. Для них характерно те, що вони служать конкретним завданням конструктора і демонструють бажані властивості в різних умовах експлуатації, головним чином, в аерокосмічній та автомобільній промисловостях внаслідок високого співвідношення міцності та ваги, яке вище, ніж у інших видів матеріалів.

Проте використання деяких КМ пов'язане і з певними складнощами. Це висока вартість виробництва, ускладнена переробка і утилізація, проблеми при з'єднанні різнорідних матеріалів, а також відмінності в міцнісних характеристиках. Крім того, оскільки композитні матеріали, як правило, мають анізотропні властивості, кількісний аналіз процесів, що відбуваються при формуванні та експлуатації в таких матеріалах, є досить складним.

З метою полегшення обгрунтованого вибору високотемпературних КМ для конкретних виробів їх класифікують, зокрема, за типом матриці на наступні види:

- композити з вуглецевими матрицями ВВКМ;
- композити з керамічними матрицями ККМ;

- композити з металевими матрицями МКМ;

Проаналізуємо властивості та приклади доцільного застосування кожного із вказаних видів КМ.

Композити системи вуглець-вуглець (C/C), на теперішній час, мабуть найбільше використовуються як матеріали для виготовлення деталей теплових двигунів. Це сучасні матеріали, відомі своєю високою міцністю та стійкістю до високих температур, внаслідок чого ідеально підходять для потреб аерокосмічної промисловості. Наприклад, автори роботи [4] дійшли висновку, що ВВКМ доцільно використовувати для виготовлення подовжувачів сопел для великомасштабного рідинного ракетного двигуна.

Проте вказаний матеріал має і недоліки. Основним із них це те, що він піддається окисленню за температури вище 350 °С, і швидкість окислення швидко збільшується з температурою. Це означає, що композити C/C потребують захисту поверхні, щоб запобігти окисленню, ерозії матеріалу і забезпечити тим самим довготривалу роботу.

Щоб визначити можливості розширення області застосування даних матеріалів, на сьогодні, проводяться дослідження щодо вивчення їх структури, механічних та теплових властивостей, розробляються покриття, які можуть захищати композит, що розглядається, в залежності від факторів навколишнього середовища, таких як УФ-випромінювання, окислення та ерозія.

Зокрема, вуглецеві волокна (ВВ) мають низьку стійкість до окислення в повітряному середовищі за високої температури. Тому, щоб розширити їх застосування для виготовлення деталей, що працюють у подібних умовах, важливо покращити їх антиокислювальну здатність. Ефективним методом підвищення стійкості до окислення ВВ є нанесення захисних покриттів (екранування). Воно може запобігти прямому контакту підкладки ВВ з киснем. Тип покриття може бути різним, наприклад, металеве покриття; оксидне покриття, нітридне покриття, карбідне покриття та композитне покриття [5–16]. Серед них найбільш перспективними є керамічні покриття, оскільки вони набагато легші і мають кращу змочуваність, що може знизити дифузію та реакцію на межі поділу.

Поширеними способами виготовлення керамічних покриттів є осадження з парової фази, інфільтрація прекурсорів, піроліз та золь-гель метод [17–19].

Достатньо однорідні та щільні покриття отримують хімічним або фізичним осадженням з парової фази. Слід відмітити, що при осадженні з парової фази при більш низькій температурі, добру адгезію покриття на різних підкладках отримують за

допомогою плазмової обробки [20, 21]. Зокрема, для поліпшення шорсткості поверхні, структури та механічних властивостей ВВ застосовуються обробки водневою та кисневою плазмами. Поліпшення адгезії до матриці пояснюється тим, що відбувається зміна щільності функціональних груп та зміни у вуглецевих зв'язках [22]. При цьому як морфологія, так і структура покриттів піддаються контролю. Проте низька швидкість осадження та порівняно з іншими способами висока вартість роблять процес осадження з парової фази не завжди практичним [23].

Набагато більше дослідників [24–31] для нанесення вказаних покриттів досліджували можливість золь-гель методу. Він від попереднього способу відрізняється більшою економічністю, нижчою температурою ущільнення (<1000 °С) та невеликою усадкою, що знижує напруження між покриттями та матрицею.

Зокрема, автори роботи [32] для підвищення антиокислювальних властивостей вуглецевих волокон в умовах високих температур та забезпечення належної взаємодії між волокнами і покриттям запропонували модифікований ними золь-гель метод. Його сутність полягає в покритті ВВ діоксидом кремнію (SiO₂) та карбідом кремнію (SiC). Дане модифіковане покриття SiO₂/SiC було успішно нанесено на ВВ і показало підвищення антиоксидантної ефективності порівняно з ВВ без покриття. Проте механічні властивості ВВ з покриттям SiC/SiO₂ лише незначно відрізнялися від властивостей ВВ без покриття при температурах нижче 1000 °С.

Ще однією проблемою щодо застосування даних КМ є їх низька міцність при міжшаровому зсуві. Вирішити дану проблему намагались автори роботи [33] шляхом нанесення на вуглецеву тканину вуглецевих нанотрубок (ВНТ) методом електрофоретичного осадження. Вони встановили, що зі збільшенням вмісту ВНТ міцність на міжшаровий зсув 2D композитів C/C значно зростає, а потім зменшується, причому вказаний показник досягає максимальних значень близько 13,6 МПа, коли вміст електрофоретично осаджених вуглецевих нанотрубок становить 0,54 %, що в 2,27 рази більше за базовий рівень. Автори, вказаної роботи вважають, що таке покращення характеристик C/C композитів головним чином зумовлене підвищеною когезією матриці, що спричинено здатністю ВНТ рафінувати вуглеводневу матрицю та індукувати багатшарові мікроструктури, які значно підвищують опір розповсюдженню тріщин внаслідок механізмів їх блокування та відхилення.

Складною проблемою виробництва подібних деталей з даних матеріалів є і те, що технології отримання передбачають суттєві витрати енергії, що сильно обмежує можливість їх масового виробництва. Тому, продовжуються дослідження щодо зниження

технологічних витрат енергії при виробництві подібних деталей.

Керамічні матеріали привернули увагу дослідників і своїми високотемпературними властивостями. Зокрема тим, що вони мають здатність тривалий час зберігати свої механічні властивості при температурах до 3000 С, а їх густина нижча, ніж багатьох металів. Завдяки цьому їх застосування в теплових двигунах може дозволити зменшити вагу конструкції, підвищити температуру робочого газу на вході та зменшити витрати на активне охолодження.

Проте кераміка занадто крихка і маломіцна, що не дозволяє виготовляти вироби малого поперечного перерізу. Тому тільки вирішення вказаної проблеми, а саме, підвищення міцності та в'язкості руйнування дозволить реалізувати принципово новий рівень температурних характеристик у сучасних машинах та механізмах. Підвищення міцності подібних матеріалів може бути досягнуте шляхом введення в них пластичної фази, внаслідок збільшення ефективної енергії руйнування, подрібнення зерна, створенням внутрішніх напружень стиску на шляху пересування тріщини, армуванням волокнами. Останній метод реалізується створенням керамічних композиційних матеріалів (ККМ).

Керамічні композитні матеріали були розроблені, щоб вирішити проблему крихкості широко використовуваної кераміки, наприклад, карбід-кремнієвої, оксид-алюмінієвої, нітрид-кремнієвої, нітрид-алюмінієвої та діоксид-цирконієвої керамік [34]. На сьогодні, щоб підвищити механічні властивості вказаних матеріалів досліджують можливості армування волокнами [35, 36], зокрема, металевими. В цьому випадку опір розтягуванню зростає незначно, зате істотно підвищується опір тепловим ударами, через що керамічний матеріал менше розтріскується при швидкому нагріванні. Властивості одержуваного таким шляхом ККМ залежать від співвідношення коефіцієнтів термічного розширення його матриці та наповнювача. Тому у випадку застосування металевих волокон перевагу мають дроти із вольфрамових сплавів.

З метою полегшення вибору оптимального складу для конкретних умов експлуатації ККМ доцільно розділити на дві категорії: оксидні і безоксидні.

Неоксидні ККМ цікаві своїми високим механічними та термічними властивостями. Вони можуть стати новим перспективним конструкційним матеріалом тому, що кераміка на основі тугоплавких сполук (боридів, карбідів, нітридів, силіцидів та інших) не виявляє помітної високотемпературної повзучості аж до температур 0,5–0,8 від температури плавлення, що значно перевершує показник металевих конструкційних матеріалів.

Найбільшу кількість безоксидних матеріалів становить технічна кераміка, яку відносять до неорганічних, неметалічних матеріалів. В останні роки було реалізовано підвищення властивостей кераміки шляхом армування її волокнами. В результаті отриманий матеріал виявився більш стійким до розтріскування, та термічного удару. Він був використаний в аерокосмічній промисловості, що дозволило виготовляти деталі більш стійкими в екстремальних умовах, в наслідок підвищених їх в'язкості руйнування, а до того ж даний матеріал виявився легшим, порівняно зі звичайними кераміками [36].

Такі частини, як внутрішня поверхня випускного сопла, де потік ракетного палива прискорюється до надзвукових швидкостей, є критично важливими місцями, оскільки в них спостерігається найбільша дія теплових потоків. Ці умови призводять до абляційного руйнування внаслідок проходження гетерогенних реакції між гарячим газом і внутрішніми поверхнями випускного сопла, що в свою чергу, призводить до необхідності зменшення тяги двигуна. Шляхом застосування ККМ в аерокосмічному секторі були вирішені подібні проблеми з проектування та виготовленням деталей двигунів, які б витримували високі температури та термохімічні середовища горіння без використання системи охолодження [37].

До вказаних матеріалів відносяться і композити систем C/SiC і SiC/SiC. Вони вважаються багаторазовими матеріалами через їх високу твердість і низьку ерозію. Крім того під час окислення вони утворюють на поверхні шар кварцового скла, який запобігає подальшому окисненню внутрішніх шарів. Проте за певної для кожного композиту температури відбувається активне окислення матриці карбиду кремнію до газоподібного монооксиду кремнію, що призводить до неконтрольованої ерозії. З цієї причини композити типу C/SiC та SiC/SiC використовуються тільки до температур на рівні 1200°C ÷ 1400 °C.

На сьогоднішній день ведуться дослідження на шляху використання безоксидних ККМ в новому поколінні газових турбін, які можуть працювати при 1700°C. Прикладом є сопла турбін, що одержані зі спрямовано кристалізованих злитків [38].

У відповідності до результатів роботи [39] боридні евтектики на основі гексабориду лантану можуть бути матеріалами для виготовлення таких елементів як термоемісійні катоди. Застосування спрямовано армованих композитів системи LaB₆-MeIVB₂ дає можливість значно підвищити механічні властивості таких елементів і розширити області їх застосування. У вказаній роботі, зокрема, досліджувався вплив швидкості кристалізації на густину струму термоемісії евтектичного композиту системи LaB₆-ZrB₂. При цьому показано, що щільність

струму композиту підвищується зі збільшенням швидкості кристалізації від 20 мм/год. до 100 мм/год. Найбільша щільність струму 36,24 А/см² спостерігалася при температурі 1873 К. Попередні дослідження [40, 41] показали, що на щільність струму евтектичного композиту LaB₆-MeB₂ також впливає підвищення швидкості дифузії атомів лантану вздовж границі розділу LaB₆/MeB₂.

Для отримання подібних сплавів Демірським та ін. було розроблено метод одержання керамічних спрямовано кристалізованих евтектичних сплавів з застосуванням установок для іскро-плазмового спікання [42–46]. Проте їх застосування може бути обмеженим, оскільки спрямовано армовані композити мають невеликі розміри і помітну анізотропію властивостей. Тому у роботі [38] була розроблена технологія одержання евтектичних сплавів на основі тугоплавких сполук методами порошкової металургії. У вказаній роботі повідомляється про успішне застосування розробленого металокерамічного композиту на основі титану з евтектичними включеннями V₄C-TiB₂ для виготовлення конструкційних елементів для авіаційної техніки.

З метою досягнення мінімальних розмірів та максимальної кількості волокон армувальної фази було проаналізовано механізми зародження і росту фазових складових спрямовано закристалізованих евтектичних сплавів (СЗЕС) [47]. Для цього були використані результати робіт [48–50]. В результаті було встановлено, що для керування структурою, а відповідно і властивостями СЗЕС є доцільним накладання механічних коливань на систему розплав/кристал з метою інтенсифікації перемішування розплаву на фронті росту кристалу та зменшення концентрації компонентів, що відтісняються в розплав перед фронтом росту кристаллу [44].

Крім того, було проаналізовано можливість легування добавками кремнію, вуглецю та алюмінію з метою розбавлення розплаву поблизу фронту росту кристалу і зменшення величини концентраційної складової мінімального переохолодження, необхідного для зародження та росту волокон та збільшення температурного градієнту шляхом подрібнення розплаву і інтенсифікації процесу теплообміну між розплавом і кристалічної фази композиту [38].

В результаті вказаного аналізу автори вирішили, що доцільно з метою підвищення властивостей композитів системи LaB₆-ZrB₂ провести дослідження впливу механічних коливань на однорідність їх евтектичної структури. Для реалізації цього проводилось вирощування спрямовано армованих композитів без накладання механічних коливань і з накладанням механічних коливань [51, 52]. При

порівнянні мікроструктур композитів, вирощених в умовах впливу механічних коливань і без, спостерігали зміни у морфології волокон – їхня бокова поверхня стала звивистою. За допомогою кількісного металографічного аналізу мікроструктури встановлено, що композити, одержані з накладанням механічних коливань, мають більш однорідний розподіл за розмірами включень і густиною кристалів, в порівнянні з кристалізованим композитом без накладання механічних коливань. В результаті цих даних автори дійшли висновку, що звивистість обумовлена зміною концентраційного профілю атомів, що відтісняються перед фронтом кристалізації фаз гексабориду лантану та дибориду цирконію внаслідок утворення пор розміром 1–2 мкм на поверхні фронту кристалізації [50, 53]. Зменшення площі фронту кристалізації композиту призводить до збільшення концентрації атомів металу, що і спричиняє більш однорідний розподіл волокон із дибориду за розмірами. При цьому встановили, що введення в розплав механічних коливань сприяє пригніченню процесу формування колоній при помірних параметрах кристалізації, завдяки додатковому перемішуванню і вирівнюванню концентрації домішок по всьому об'єму розплаву.

Крім того, у роботі [51] відмічено, що помітним є вплив механічних коливань на рівномірність розподілу волокон по поперечному перетину. Зокрема, що у композитах, вирощених з застосуванням механічних коливань, диборидні включення розміщені більш рівномірно по поперечному перетину. За думкою авторів, це є наслідком активованих механічними коливаннями додаткового перемішування розплаву, яке мінімізує вплив концентраційного переохолодження, вирівнює концентраційний профіль та сприяє формуванню плоского фронту кристалізації і сумісному росту евтектичних фаз. Дані дослідження показали, що міцність на стиснення композитів, вирощених з застосуванням механічних коливань, можна підвищити майже вдвічі до 1530 МПа внаслідок покращення однорідності структури.

У зв'язку з перспективністю даних матеріалів було проведено дослідження впливу домішок кремнію на мікроструктуру та механічні властивості композиту V₄C-TiB₂, одержаного методом зонної плавки [50,53]. В даній роботі автори дійшли висновку, що легування спрямовано закристалізованого евтектичного сплаву V₄C-TiB₂ кремнієм сприяє подрібненню його структури, а відповідно підвищенню його механічних властивостей. Зокрема, міцність на згин легованого кремнієм композиту збільшується майже в 2 рази в порівнянні з нелегованим і досягає 460 МПа при температурі 20 °С та 487 МПа при 1600 °С.

Таким чином, спрямовано закристалізовані евтектичні сплави є цікавими їх багатоконпонентним

характером, який спонукає до пошуку взаємно підсилюючих ефектів, що обумовлені комбінацією різних властивостей в одному матеріалі, а також високотемпературними унікальними механічними властивостями і хімічною стійкістю, особливо при підвищених температурах. Дослідження впливу природи, кристалографічної орієнтації та кінетичних параметрів спрямованої кристалізації на формування структури та фізико-механічні властивості показало, що зменшення розмірів та збільшення кількості армувальних включень у вигляді дискретних волокон призводить до значного підвищення міцності, твердості та тріщиностійкості спрямовано армованих композитів.

Ефективним методом подрібнення структури у спрямовано закристилізованих евтектичних сплавах є введення додаткових фаз у евтектичну структуру. Часто це приводить до зменшення поперечних розмірів фаз в евтектиці. Використання даного підходу дозволило Опері зі співробітниками отримати СЗЕС потрібної системи $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-YAG-YSZ}$ з міжфазною відстанню близько 100 нм. При цьому міцність даного матеріалу на згин становила близько 4,7 ГПа [55].

З метою подрібнення структури шляхом отримання квазі потрібних безоксидних СЗЕС досліджували формування мікроструктури та властивостей в системах $\text{V}_4\text{C-TiB}_2$ з додаванням третього нерозчинного компонента SiC в роботах [56, 57] та розчинного NbB_2 в системі $\text{Mo-Mo}_3\text{Si-Mo}_5\text{SiB}_2$ в [58–62]. Слід відмітити, що недолік вказаного методу полягає в тому, що потрібно ретельно підібрати компоненти з точки зору їх термодинамічної сумісності, а це часто обмежує можливості застосування високотемпературних речовин.

Застосування евтектичних порошків обумовлене їх підвищеними мікромеханічними характеристиками, а саме, мікротвердістю та тріщиностійкістю в порівнянні з чистими компонентами, що спонукало авторів робіт [63–68] вивчати закономірності ущільнення композиційних порошків $\text{V}_4\text{C-TiB}_2$ та авторів робіт [69, 70], що досліджували порошки $\text{LaB}_6\text{-TiB}_2$ з метою формування ізотропного армованого керамічного матеріалу та з'ясування механізмів формування ізотропної мікроструктури композиту в умовах іскро-плазмового спікання.

З метою збільшення ступеня ізотропії матеріалу, порошки доцільно отримувати способом розпилення розплаву евтектичного складу методом відцентрового розпилення, що характеризується значною простотою процесу [71–74]. Основною особливістю такого методу є те, що він являється саморегулюючим і дозволяє одержувати порівняно невелику різницю в гранулометричному складі частинок порошку. Крім того, можливість точного виконання умов розпилення стержня забезпечує високу однорідність одержаних

сферичних частинок. Використання як джерела нагріву високотемпературної плазмової дуги дозволяє одержувати порошки з частинками сферичної форми із матеріалів з високою температурою плавлення. При цьому, плазмова дуга також проявляє рафінуючу дію на розплави [71].

Метод відцентрового розпилення забезпечує вищі швидкості охолодження, до $105^\circ\text{C}/\text{сек}$, в порівнянні з методом безтигельної зонної плавки ($102^\circ\text{C}/\text{c}$) [75]. Вищі швидкості охолодження закономірно приводять до значно вищих температурних градієнтів, що, в свою чергу, сприяє подрібненню мікроструктури евтектичних сплавів, а відповідно вищих значень властивостей.

Вплив атмосфери спікання (азоту і аргону) на міцність композитів $(\text{V}_4\text{C-TiB}_2)\text{-V}_4\text{C}$ досліджували автори робіт [76, 77]. Вони дійшли висновку, що міцність композитів $(\text{V}_4\text{C-TiB}_2)\text{-V}_4\text{C}$, спечених в атмосфері азоту, на 16 % вище міцності зразків, спечених в атмосфері аргону. Цей результат вони пояснили утворенням нітридних фаз, що створюють ефект жорсткості.

Також в зразках, спечених в середовищі азоту, в деяких областях мікроструктури спостерігали зменшення розміру зерен карбіду бору, що також підтверджується даними робіт [76, 77]. Ця обставина вносить вклад у зміцнення композиту по зернограничному механізму. Крім того на поверхні руйнування матриці у спечених композитах $(\text{V}_4\text{C-TiB}_2)\text{-V}_4\text{C}$ після випробувань спостерігали двійникові утворення. Поява двійників у кераміці на основі карбіду бору є відомим ефектом [76, 77] і також вносить певний вклад у зміцнення композиту внаслідок створення бар'єру на шляху поширення тріщин.

Важливим питанням щодо застосування керамічних композитів є виникнення в них внутрішніх залишкових напружень внаслідок невідповідності теплового розширення між фазами. Крім того, при охолодженні матеріалу внутрішні залишкові напруження не можуть бути суттєво зниженими, внаслідок неможливості проходження пластичної деформації в кераміці. Це призводить до генерування високих значень внутрішніх теплових залишкових напружень, які можуть знижувати механічні властивості композиційного матеріалу в цілому. Особливо напруження розтягу в крихкій керамічній фазі можуть сприяти поширенню крихких тріщин [78].

З метою зниження рівня залишкових напружень у спрямовано закристилізованому евтектичному сплаві $\text{V}_4\text{C-TiB}_2$, було проведено дослідження впливу термічної обробки при нагріванні до 1400°C у вакуумі [79]. При цьому результати даного дослідження свідчать про те, що у термічно обробленому при температурі 1400°C матеріалі спостерігається

зниження рівня напружень і наближення стану матричної фази спрямовано закристилизованого евтектичного сплаву V_4C-TiB_2 до рівноважного стану.

Крім того, авторами робіт [80–82] теж було проведене дослідження щодо можливостей застосування відпалу. В роботі [82] було встановлено, що відпал при температурах 1000–1600 °C спрямовано закристилизованого евтектичного сплаву LaB_6-TiB_2 приводить до підвищення механічних властивостей композиту на величину, пропорційну величині, на яку зменшуються залишкові напруження в матричній та армувальній фазах. Таким чином, застосовуючи вказані способи, є можливість довести значення механічних властивостей даних матеріалів до необхідних, які дозволяють виготовляти з них гарячі деталі теплових двигунів.

ККМ на основі оксидів, як правило, складаються з оксидного волокна та оксидної матриці. Найпоширенішими з оксидних матричних матеріалів є кераміки з оксиду алюмінію, берилію, церію та цирконію. Вони є стійкими до окислення матеріалами і використовуються в окислювальних середовищах, зокрема, в гарячих частинах теплових двигунів. На рис. 2 показано частини двигуна які виготовляються із ККМ [83].

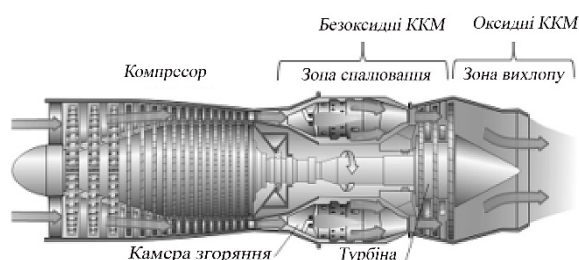


Рисунок 2. Частини двигуна, що виготовляються із ККМ [83]

Найбільш використовуваними оксидними композитними матеріалами є оксид алюмінію (глинозем) та алюмосилікати. ККМ на основі глинозему має високу твердість, високу міцність на стиск, хорошу хімічну та термічну стабільність [83]. Рисунок 3 ілюструє зростаючий інтерес до подібних ККМ.

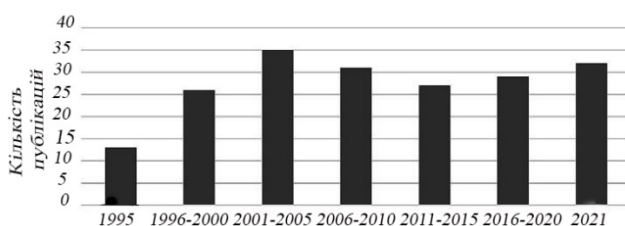


Рисунок 3. Кількість публікацій за роками з 1995 до 2021 р. [83]

Як видно, дані ККМ викликають постійний інтерес з 90-х років. Таким чином за останнє десятиліття властивості ККМ ініціювали вчених до проведення додаткових досліджень цього типу композитного матеріалу.

Однак застосування подібних ККМ як конструкційного матеріалу, поки що обмежено їх низькою в'язкістю та міцністю на розтяг. Це обумовлено тим, що тріщини легко поширюються в даних матеріалах і тому деталі можуть непередбачувано вийти з ладу під час експлуатації або обслуговування [84, 85]. З метою підвищення властивостей ККМ на основі глинозему, він може поєднуватись з карбідом бору, нітридом кремнію, карбідом титану та діоксидом титану.

Відомо [86], що підвищення властивостей глиноземної матриці було досягнуто шляхом армування її волокнами карбіду бору, що дозволило створити стійкий до високих температур і високого тиску ККМ. Зокрема авторами роботи [87] зазначено, що додавання 10–40 % об. ниткоподібних кристалів V_4C дозволяє отримати високі якісні показники механічних властивостей ККМ. Так, вказані композити з додаванням 10–20 об.% ниткоподібних кристалів V_4C показали підвищення в'язкості руйнування до $6,2 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$.

Завдяки високій твердості і в'язкості руйнування композити з матрицею з оксиду алюмінію (Al_2O_3), армованою волокнами із карбід бору (V_4C), були запропоновані для використання у високотемпературних двигунах, проте тільки для виготовлення окремих деталей, що в процесі експлуатації не піддаються значним динамічним навантаженням.

КМ з металевою матрицею (ММК), на сьогодні, є поширеними високотемпературними матеріалами. Часто це армовані волокнами сплави на основі нікелю, титану та алюмінію. Проте як матрицю уже використовують ніобієві, молібденові та вольфрамові сплави. На рис. 4 показано, в яких потенційних місцях застосовуються металоматричні композити (ММК).

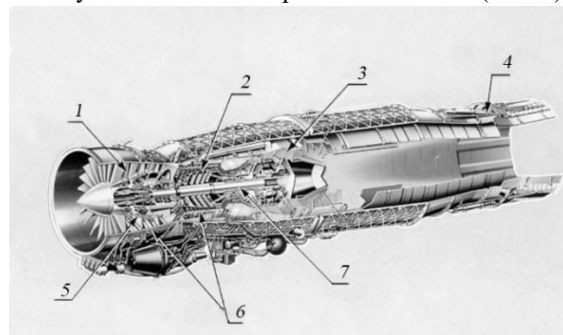


Рисунок 4. Потенційні місця застосування металоматричного композиту в двигуні EJ200, [88]:

- 1 – лопатки компресора, 2 – компресорні кільця,
- 3 – турбінні кільця, 4 – стійкі приводу, 5 – компресорні ущільнювачі, 6 – корпус компресора, 7 – вал

Для армування металевих КМ часто використовують безперервні волокна. зокрема, вуглецеві (BB), борні (B), з оксиду алюмінію (Al_2O_3), карбіду кремнію (SiC), карбіду бору (B_4C), нітриду бору (BN), дибориду титану (TiB_2), оксиду кремнію (SiO_2). Також, як волокна, застосовують металевий тонкий дріт, отриманий методом волочіння зі сталі, W, Ti, Mo і Be. Рідше використовують ниткоподібні, спеціально вирощені кристали різних матеріалів.

Оксидні волокна добре сумісні з нікелевою матрицею і є перспективними до застосування [88], проте проблему становить технологія виготовлення полікристалічних оксидних волокон, яка, зокрема, полягає у внутрішній кристалізації оксидів у каналах матриці і відбувається з порівняно низькою швидкістю. Крім того, жароміцність таких композиційних матеріалів залежить від міцності границі оксидного волокна і нікелевої матриці, регулювати яку в процесі створення виробів досить складно.

З метою регулювання міцності з'єднання та ступеню взаємодії волокон з матрицею на їх поверхню можуть наноситися покриття. Так, крім звичайного волокна карбіду кремнію промисловість виготовляє волокно карбіду кремнію SCS-2, покрите вуглецевим захисним шаром товщиною 1 мкм [89]. Проте таке рішення не є універсальним. В цій же роботі відзначається, що вивчення опору повзучості композиту з матрицею із сплаву ЖС-32 і евтектичним оксидним волокном $Al_2O_3-Al_5Y_3O_{12}$ при температурі 1150 °C показало, що при збільшенні об'ємної частки волокон більше деякої критичної величини міцність межі поділу зменшується, і відповідно знижується жароміцність композитного матеріалу в цілому. Тому, в кожному конкретному випадку потрібно проводити відповідні дослідження, що ускладнює технологію виробництва.

Досить доцільним є застосування, як волокон, дроту із вольфрамових сплавів, оскільки вони мають високі значення показників міцності та модулю пружності у широкому діапазоні температур, проте не мають достатньої міцності у поперечному напрямку, тобто волокна із вказаних сплавів схильні до розшарування. Цю проблему вирішували автори роботи [90], які показали, що схильність до розшарування пов'язана з технологією їх виготовлення і вирішити проблему запропонували шляхом використання для отримання волокон заготовок (штабиків) з частинками порошку менше за 200 нм і підбору оптимальної швидкості нагрівання їх при високотемпературному спіканню.

Цікавим є композиційний матеріал з шаруватою ніобій-титановою матрицею, зміцненою вольфрамовим дротом. Його процес формування досліджувався авторами роботи [91]. Композит формувався з

застосуванням технології контактного зварювання. Задача полягала в отриманні монолітного матеріалу з одночасним збереженням міцнісних характеристик армувального дроту і була вирішена застосуванням технології, що складається з двох етапів. На першому етапі, який характеризується «м'якими» режимами зварювання, здійснювали заповнення матеріалом матриці проміжків між волокнами внаслідок плинності матеріалу матриці, а на другому – з застосуванням «жорстких» режимів зварювання формували остаточні зони проплавлення, що повністю обволікали волокна. Таким чином, вдалося уникнути зменшення армувальних волокон і отримати монолітний ММК.

Великі перспективи мають нікелеві дисперсно-зміцнені сплави, які теж відносять до ММК, оскільки частинки зміцнювальної фази в них вводяться штучно. Їх матриця, що являє собою, наприклад, – γ - твердий розчин у нікелі 20 % хрому, або 15 % молібдену служить основним конструктивним елементом, який витримує навантаження, а дисперсні частинки гальмують рух дислокацій. Особливість дисперсно-зміцнених металевих композиційних матеріалів полягає у тому, що вони ізотропні за властивостями. Оптимальний ефект досягається при розмірі частинок 10...500 нм і відстані між ними – 100...500 нм при рівномірному розподілі їх у матриці. Автори дійшли висновку, що введення у матрицю тонкодисперсних порошоків діоксидів торію (ThO_2) або цирконію (ZrO_2) дозволяє підвищити робочу температуру жаростійких деталей двигуна з 1000 °C до 1200 °C [92].

Композиційні матеріали на металевій основі можуть також використовуватися як покриття деталей авіадвигунів, які працюють при високих температурах. Так, у роботі [93] як перспективний розглядається композит на металевій основі з використанням дибориду титану-хрому ($TiCrB_2$). Сам диборид титану-хрому становить твердий розчин хрому у дибориді титану, відрізняється високими жаро- та зносостійкістю і достатньо низькою густиною ($4,5 \text{ г/см}^3$). Його недоліком є висока крихкість. Але як компонент композиту з металевією матрицею він може суттєво підвищити жаростійкість матричного матеріалу. Показано, що перспективною матрицею для дибориду титану-хрому є хромонікелевий сплав з додаванням алюмінію (NiAlCr). Він добре змочує наповнювач і не взаємодіє з ним. Як покриття кращу жаростійкість показав композит $TiCrB_2 + 50 \% NiAlCr$. Це пояснюється тим, що збільшення частки металевією фази покращує фізико-механічні властивості.

Важливою проблемою є розробка вольфрамових матеріалів для складних енергетичних систем, зокрема, таких як термоядерний реактор. Відомо [94], що основними недоліками вольфраму, який обмежує його застосування в подібних конструкціях, є його крихкість при помірних температурах і схильність до

окрихчення під час експлуатації, наприклад при дії нейтронного опромінення.

Зробити вольфрам більш стійким до негативних впливів можна шляхом використання композитного підходу. Вольфрамові композити, армовані вольфрамовими волокнами (Wf/W), успішно розробляються для подолання властивої вольфраму крихкості при звичайних температурах (20 °C) та його чутливості до крихкості під час експлуатації. Цей матеріал був успішно виготовлений і випробуваний протягом останніх років, і тепер увага приділяється технологічній реалізації його для використання в плазмових термоядерних пристроях. Випробування зразків даного ММК на удар за Шарпі показали підвищену енергію руйнування, в основному, внаслідок пластичної деформації вольфрамових волокон. Використання ММК Wf/W може значно розширити застосування вольфраму та усунути проблеми глибокого розтріскування, яке зазвичай виникає під час циклічного навантаження високим тепловим потоком [95–97]. З метою отримання вказаного композитного матеріалу були розроблені технології отримання вольфраму, армованого вольфрамовим волокном (Wf/W) з застосуванням процесу порошкової металургії [98]. У цьому дослідженні було розроблено новий тип Wf/W з пористою матрицею. У порівнянні зі звичайним Wf/W, розроблені технології дозволили зменшити взаємодію на границі волокно-матриця, що спростило виробничий процес. Механічні випробування показали, що даний композит Wf/W з пористою матрицею проявляє псевдопластичну поведінку з підвищеною в'язкістю руйнування порівняно з чистим вольфрамом.

Таким чином можна вважати, що наведені результати є доказом перспективності проведення досліджень КМ з металевою матрицею.

Доцільність армування металевих матриць вуглецевими волокнами. Стрімкий розвиток нанотехнологій останніми роками дозволяє розробляти передові нанокомпозити з металевою матрицею для структурної інженерії та функціональних пристроїв. В останні роки вуглецеві наноматеріали, включаючи графен та вуглецеві нанотрубки (ВНТ), стали важливим класом нових матеріалів для структурної інженерії та функціональних пристроїв завдяки їхньому надзвичайно високому модулю пружності та механічній міцності, а також високій електро- та теплопровідності. У поєднанні з їх високими характеристиками співвідношення довжини до діаметра або довжини до товщини графен і ВНТ вважаються найбільш ефективними армувальними наповнювачами для виготовлення композитних матеріалів.

Успішне застосування ВНТ в полімерних матеріалах (ПКМ) обумовило інтерес до використання їх як армувальної фази в композитах з металевою матрицею. У порівнянні з ПКМ, МКМ, що армовані ВНТ, мають ряд переваг таких як внутрішня стабільність при підвищеній температурі, висока міцність і жорсткість, чудова електро- і теплопровідність.

У відповідності з думкою авторів роботи [99], графен, завдяки своїм високим властивостям, (він має міцність на розрив до 1060 ГПа, модуль Юнга біля 1100 ГПа і низьку густину, яка становить 1,06 г/см³) на сьогодні, вважається ідеальним зміцнювачем для метало-матричних композитів. На даний момент це підтверджується результатами досліджень наведеними в багатьох роботах [100–105]. Зокрема, автори вказаних робіт зазначають, що графен може зміцнювати КМ за такими механізмами як зеренне зміцнення, дислокаційне зміцнення, а також зміцнення за механізмом Орована, завдяки чому є перспективним до застосування.

Це, зокрема, підтверджено результатами роботи [106], автори якої досліджували застосування одновимірних вуглецевих нанотрубок та двовимірних графенових нанолістів, як армувальних елементів у композитах з металевою матрицею. Автори вказаної роботи зазначають, що порівняно з керамічним армуванням, вуглецеві волокна та графітові частинки є привабливими армувальними матеріалами завдяки своїй високій теплопровідності і низькому коефіцієнту теплового розширення.

Слід відмітити, що вуглецеві волокна демонструють високу міцність на розрив (~3,10–4,07 ГПа), але при відносно низькому модулі (~231–248 ГПа). Підвищити модуль пружності до ~480 ГПа можна шляхом їх графітізації. Пояснюється вказане підвищення модуля пружності утворенням високоорієнтованих графітових шарів, проте міцність при цьому дещо знижується. Армування високомодульними волокнами надає значної розмірної стабільності. Дані МКМ особливо підходять для використання в космічному середовищі з екстремальними умовами, такими як вакуум, іонізуюче випромінювання та плазма [106].

Проте щодо застосування вказаних матеріалів існують проблемні питання, які потребують рішень. Зокрема, досить складно вводити ВНТ в метали, оскільки вони мають тенденцію агломеруватись у кластери всередині матриці. Інша проблема виникає через погане змочування ВНТ розплавленими металами внаслідок великої різниці в поверхневому натягу вуглецевих нанотрубок і металів; також утворення продуктів міжфазних реакцій та проблем, пов'язаних з гальванічною корозією. Тому, незважаючи на наведені переваги, комерційне

використання армованих ВНТ-ММК обмежене порівняно з їх аналогами з полімерних композитів ще й через високу вартість виробництва.

Компроміс між високою міцністю і певним рівнем в'язкості часто є важкою дилемою при виборі конструкційних матеріалів. Наприклад, композит Nb/Nb₅Si₃ вважається критично важливим конструкційним матеріалом для заміни суперсплавів на основі нікелю в авіаційних двигунах через його високу робочу температуру (близько 1400 °C), добру стійкість до окислення, високу жорсткість, низьку густину і високу міцність. Однак низька в'язкість композиту Nb/Nb₅Si₃ при кімнатній температурі ускладнює його застосування. В роботах [107–110] наголошено, що композит Nb/Nb₅Si₃ має високу робочу температуру, низьку густину, високу жорсткість, відмінну стійкість до окислення та високотемпературну міцність, і вважається заміником існуючих високотемпературних сплавів на основі нікелю в галузі авіаційних двигунів. Але низька міцність композиту Nb/Nb₅Si₃ при кімнатній температурі перешкоджає його застосуванню в авіаційних двигунах [111–114], і на сьогодні є важливим питанням саме підвищення в'язкості даного композиту при кімнатній температурі. Як показано в багатьох роботах [115–124], зазвичай, ударну в'язкість подібних матеріалів підвищували за рахунок принесення в жертву їх міцності, що звичайно не бажано.

Наприклад, для підвищення в'язкості композиту Nb/Nb₅Si₃ при кімнатній температурі широко використовується метод легування [125–127]. Проте застосуванням вказаного методу досить важко задовольнити вимоги до рівня в'язкості, міцності та стійкості до окислення внаслідок суперечливих вимог до вказаних характеристик [127].

Поліпшення міцності та ударної в'язкості композитів Nb/Nb₅Si₃ іншим шляхом, а саме, додаванням в їх структуру графену досліджували автори роботи [128]. Позитивний вплив внаслідок додавання графену автори вказаної роботи пояснили тим, що при такому модифікуванні границі середньої невідповідності у вказаному КМ трансформуються в мультиграниці низької невідповідності Nb-Nb₄C₃-Nb₅Si₃ через включення графену та утворення нанорозмірних фаз Nb₄C₃ на границях зерен. Ці границі низької невідповідності перетворюють конструкційні матеріали у матеріали з чудовим поєднанням міцності та в'язкості. В даній роботі повідомляється про те, що з метою вирішення проблеми компромісу між міцністю та ударною в'язкістю було запропоновано кілька методів. Наприклад, налаштування міжфазної когерентності з використанням нанозерна-двійника та перехідної нанофазы, що дає змогу дислокаціям ковзати уздовж

меж зерен-двійників або переміщатися в сусідніх зернах і таким чином підвищити пластичність.

Ще один шлях вирішення вказаної проблеми дослідили автори роботи [129]. Вони, з метою виготовлення композиту Nb/Nb₅Si₃, армованого вуглецевими волокнами, застосували метод іскрового плазмового спікання. Ними було досліджено вплив температур спікання (1450 °C, 1500 °C і 1550 °C) на мікроструктуру поверхні поділу між матрицею та волокнами і механічні властивості композитів, включаючи твердість, пластичність та в'язкість руйнування. В результаті було досягнуто 99%-ї густини і майже рівномірного розподілу практично не пошкоджених коротких вуглецевих волокон по всьому композиту. На межі поділу між вуглецевим волокном і матричним сплавом була виявлена фаза, що відповідає хімічній формулі Nb₄C₃, завдяки якій волокна достатньо міцно з'єднувались з матрицею. У відповідності з результатами даного дослідження, найкращі механічні властивості були у композита, виготовленого при температурі спікання 1500 °C завдяки своїй високій густині, низькому пошкодженню волокон і задовільній міцності з'єднання між матрицею і волокнами. При підвищенні температури спікання до 1550°C механічні властивості композиту погіршувались, що автори пояснили пошкодженням вуглецевих волокон, яке відбувалось внаслідок реакції на межі поділу.

У відповідності до результатів роботи [130], графен був використаний для покращення механічних властивостей композиту Nb/Nb₅Si₃, який є кандидатом у наступне покоління високотемпературних конструкційних матеріалів для авіаційних двигунів. Авторами вказаної роботи системно досліджено мікроструктуру та механічні властивості зміцнених графеном композитів Nb/Nb₅Si₃ з міжфазною нанофазою Nb₄C₃. Зміцнений графеном композит Nb/Nb₅Si₃ із видатною в'язкістю руйнування та міцністю на стиск при кімнатній температурі був успішно виготовлений за допомогою іскрового плазмового спікання. Показано, що мікроструктура цього композиту змінюється від шаруватої морфології до рівномірно розподіленої рівноважної мікроструктури з підвищенням температури виготовлення від 1450 °C до 1550 °C. Високу міцність на стиск композитів Nb/Nb₅Si₃, зміцнених графеном, пояснено передачею навантаження на графен, і вказано, що ця ефективність передачі навантаження посилюється завдяки ефекту зчеплення міжфазної нанорозмірної фази Nb₄C₃. Високу міцність даного композиту пояснили можливістю висмикуванням графену при руйнуванні, а також відхиленням і перекриттям тріщин, що спричиняється графеном. Чудове поєднання міцності та в'язкості композитів Nb/Nb₅Si₃, зміцнених графеном, підтверджує, що

даний шлях успішно допоможе вирішити проблему компромісу між міцністю та в'язкістю подібних матеріалів.

Подібні результати наведено також у роботі [131]. В ній повідомляється, що компроміс між міцністю та в'язкістю є важкою проблемою в конструкційних матеріалах. Автори даної роботи пропонують стратегію синергічного підвищення міцності та в'язкості композитів Nb/Nb₅Si₃ шляхом введення високоефективного графену для адаптації когерентності міжфазної границі та зміцнення матриці. Виготовлений зміцнений графеном композит Nb/Nb₅Si₃ виділяється серед відомих подібних матеріалів підвищеними властивостями. Міжфазна границя Nb-Nb₅Si₃ із середньою невідповідністю за параметром ґратки перетворюється на мультиграницю Nb-Nb₄C₃-Nb₅Si₃ з низькою невідповідністю за параметром ґратки через додавання графену та утворення нанорозмірної фази Nb₄C₃ на границі між графеном і матрицею, що приводить до чудового поєднання міцності та в'язкості. Важливо відзначити, що низька невідповідність границь Nb₄C₃-Nb і Nb₄C₃-Nb₅Si₃ є корисною для формування міцного зв'язку між вказаними фазами, що сприяє передачі навантаження від матриці до графену. Також автори відзначають, що механізмами зміцнення в цьому композиті є відхилення від напрямку поширення та перекриття тріщин та мікротріщин. Таким чином, це дослідження розкриває стратегію вирішення проблеми компромісу між міцністю та в'язкістю в композитах Nb/Nb₅Si₃ шляхом додавання високоефективного графену для покращення когерентності міжфазної границі та зміцнення матриці.

Застосування графену з різною об'ємною часткою (0, 0,25 %, 0,50 %, 0,75 % та 1,0 %) для армування МКМ з матрицею Gr/Nb-Si, досліджували автори роботи [113]. Використання сучасної техніки, зокрема, сканувального електронного мікроскопа з польовою емісією HITACHI S4800 з енергодисперсійним спектрометром (FESEM/EDS); рентгівівської дифракції (XRD) D8; електронної мікроскопії, що просвічує (HRTEM) JEM-2100F дозволило встановити, що не було суттєвих змін у розмірі та морфології фази Nb₄C₃ зі збільшенням об'ємної частки графену, проте об'ємна частка фази Nb₄C₃ збільшувалась. Показано, що фаза Nb₄C₃ має стрижнеподібну морфологію. Примітно, що одна сторона фази Nb₄C₃ міцно зв'язана з графеном, а інша сторона вбудована міцно в матрицю МКМ. На думку авторів, ця форма зв'язку сприяє формуванню ефекту закріплення, тим самим підвищує міцність міжфазного зв'язку внаслідок зменшення міжфазної невідповідності та формування ефекту якоріння. Авторами даного дослідження було встановлено, що зі збільшенням об'ємної частки графену до 0,75 % міцність на стиск композиту

безперервно підвищується, проте з подальшим збільшенням об'ємної частки графену до 1,0% вона починає зменшуватись. Міцність на стиск та деформація композиту 0,75об. % Gr/Nb-Si становлять 2692 МПа та 9,87% відповідно, що приблизно на 41% і приблизно на 32% більше у порівнянні з неармованим композитом Nb/Nb₅Si₃. Це говорить про те, що міцнісні властивості композитів Gr/ Nb-Si можуть бути значно покращені шляхом введення відповідних кількостей графену.

Зниження міцнісних властивостей КМ при 1,0 об. % графену у КМ Gr/Nb-Si пояснено агломерацією графену. Шари в агломерованому графені зв'язані фізичними силами Ван-дер-Ваальса, які набагато нижчі за міцність ковалентного зв'язку між атомами вуглецю у графені, тому агломерація графену призводить до розриву між листами графену при досить низьких напруженнях, що, в свою чергу, призводить до зниження міцнісних властивостей КМ.

Крім того, авторами даної роботи було показано, що тенденція зміни в'язкості руйнування майже відповідає його міцностним властивостям. Середня в'язкість руйнування (38,25 МПа·м^{1/2}) композиту з 0,75об. % Gr/Nb-Si збільшується приблизно на 67% та на 32% порівняно з неармованим композитом Nb/Nb₅Si₃ (22,88 МПа·м^{1/2}) та композитом 0,25 об.% Gr/Nb-Si (28,88 МПа·м^{1/2}) відповідно. Ці результати показують, що введення графену в композити Gr/Nb-Si може ефективно покращити їх в'язкість руйнування.

На сьогодні рішеннями вказаних проблем зацікавлено багато дослідників. Наприклад, в роботі [132] широко представлено сучасний стан технології ВНТ-МКМ від їхнього синтезу до безлічі потенційних застосувань для кінцевого використання. У вказаній роботі розглядаються методи обробки, що використовуються для синтезу та виготовлення ВНТ-МКМ. При цьому наголошується на методах диспергування ВНТ в металевих системах, що є ключовим викликом для успішної та широкої реалізації ВНТ-МКМ. Представлено методи кількісної оцінки та покращеного контролю розподілу ВНТ. Розглянуто методи характеристики (сучасні методи визначення характеристик матеріалів та областей їх застосування), які унікально підходять для опису цих нанорозмірних матеріалів та їх численних хімічних і фізичних взаємодій з металевою матрицею, включаючи характеристику механізмів деформації в реальному часі (in-situ). Наводяться результати електронно-мікроскопічних досліджень, результати яких збагачують гіпотези щодо мікромеханічного моделювання, міжфазного дизайну, механічної поведінки та функціональних властивостей подібних композитних матеріалів. Охарактеризовані композити з подвійним армуванням, які мають на меті підвищити ефективність ВНТ і забезпечити задані властивості

матеріалу. Наведено кілька таблиць з переліком методів обробки, асоційованих станів ВНТ і властивостей, що отримуються в результаті, щоб допомогти наступному поколінню дослідників розвивати науку та інженерію ВНТ-ММК. Крім того, представлено огляд патентної літератури, щоб пролити світло на те, як може виглядати перша хвиля комерціалізації ВНТ-ММК і які виклики доведеться подолати як з технологічної, так і з комерційної точки зору.

Інтенсивна пластична деформація є багатообіцяючим методом виготовлення композитів із наддрібнозернистою структурою, а також композитів з наноструктурою. Існують різні способи інтенсивної пластичної деформації. На сьогодні, даними методами виготовляють широкий спектр різноманітних композитів, які включають композити метал-метал, композити з металевою матрицею та аморфні композити з металевою матрицею [133].

Наприклад, порівняння термічної стабільності ультрадрібнозернистих мікроструктур у зразках чистої міді та композитів мідь-вуглецеві нанотрубки, оброблених методом кручення під високим тиском, показало, що мікроструктура у зразку, консолідованому з чистого порошку Cu, має кращу стабільність, ніж у литому зразку Cu, а додавання ВНТ до порошку міді ще більше підвищило стабільність мікроструктури UFG у консолідованій матриці міді, перешкоджаючи рекристалізації. Проте це також призвело до зростання пористості та розтріскування композиту під час відпалу. Тим не менш було відзначено, що додавання ВНТ до Cu має загальну перевагу щодо її твердості в діапазоні температур від 300 до 1000 K [134].

Таким чином, з моменту відкриття вуглецевих нанотрубок (ВНТ) та їх чудових механічних властивостей, вони використовуються як виняткові нановолокна [135]. Одночасне вдосконалення наявних процесів виробництва чистих вуглецевих нанотрубок (ВНТ) та вдосконалення існуючих методів для виготовлення кращих матричних матеріалів проклало шлях до отримання високоефективних композитних матеріалів з оптимізованими механічними властивостями. Сьогодні існує багато застосувань композитів, армованих ВНТ, але композити, армовані ВНТ, все ще є дефіцитними і використовуються лише в дуже специфічних сферах застосування.

Висновки

1. За результатами даного огляду можна констатувати, що металеві та неметалеві композити внаслідок своїх високих значень фізико-механічних питомих характеристик успішно застосовуються в авіаційній та космічній техніці для високонавантажених деталей, що піддаються інтенсивному нагріванню і високим навантаженням.

2. Показано, що саме в цих штучних матеріалах вдало поєднуються висока механічна міцність з їх високим модулем пружності, невеликою густиною та достатньою в'язкістю руйнування.

3. Встановлено, що в даний час КМ розглядаються для невеликої кількості високовартісних застосувань через їхню високу коштовність.

4. У процесі вибору оптимального високотемпературного композитного матеріалу відповідно до потреб та вимог конкретних умов експлуатації складання літературного огляду є важливим етапом, результати якого суттєво впливають на вартість проекту загалом.

5. Складним науково-технічним завданням, що стоїть у світі перед виробниками композитів, є розробка нових технологій їх виготовлення з більш низькими витратами, які підвищили б конкурентоспроможність КМ по відношенню до традиційних металів і сплавів.

6. Не дивлячись на помітні успіхи в освоєнні ВВК та ККМ для масового виробництва деталей двигунів, що нагріваються в процесі експлуатації, найбільш доцільним, на сьогодні, є ММК.

Список літератури

1. Potapov, A. Research of material for uncooled nozzle extensions of liquid rocket engines / Potapov, A., Shtefan, Y., & Lichman, E. // *Acta Astronautica*, 2009. Vol. 64. No.1. – P. 22–27.
2. Gradl, P. R. Carbon-carbon nozzle extension development in support of in-space and upper-stage liquid rocket engines / Gradl, P. R., & Valentine, P. // In: 53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. – 2017. – 5064 p.
3. Потапов, А. М. Композиты: перспективы использования в ракетно-космической технике / Потапов, А. М. // *Космическая наука и технология*, 2015. – Т. 21. – №5. – 69 с.
4. Long-run testing of model nozzle extensions made of a carbon-carbon composite material in a liquid-propellant rocket engine operating on hydrogen and oxygen. / Anikin, A. V. et al. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2019. – Vol. 60. – P. 80–86.
5. Enhanced thermal conductivity of epoxy/Cu-plated carbon fiber fabric composites / S. Yu et al. *Macromolecular Research*. 2017.–Vol. 25.–No. 6.–P. 559–564. URL: <https://doi.org/10.1007/s13233-017-5114-9>.
6. Microstructure, Wear Resistance and Oxidation Behavior of Ni-Ti-Si Coatings Fabricated on Ti₆Al₄V by Laser Cladding / Q. Zhuang et al. // *Materials*. – 2017. – Vol. 10. – No. 11. – 1248 p. URL: <https://doi.org/10.3390/ma10111248>
7. Zamani, P. Microstructure, phase composition and mechanical properties of plasma sprayed Al₂O₃, Cr₂O₃ and Cr₂O₃-Al₂O₃ composite coatings / Zamani, P., Valefi, Z. // *Surf. Coat. Technol.* – 2017. – Vol. 316. – P. 138–145.
8. Oxidative protection of a carbon-bonded carbon fiber composite with double-layer coating of MoSi₂-SiC

- whisker and TaSi₂-MoSi₂-SiC whisker by slurry method / Du, B. et al. // *Ceram. Int.* – 2017. – Vol. – No. 43. – P. 9531–9537.
9. Xiaojun, M. Structure and Photocatalytic Properties of Mn-Doped TiO₂ Loaded on Wood-Based Activated Carbon Fiber Composites / Xiaojun, M., Zhou, W., Yin, C. // *Materials.* – 2017. – Vol. 10. – 631 p.
10. High temperature oxidation behaviour of autocatalytic Ni-P-BN (h) coatings / Farrokhzad M.A. et al. // *Surf. Coat. Technol.* – 2017. – Vol. 309. – P. 390–400.
11. Ablation behavior of rare earth La-modified ZrC coating for SiC-coated carbon/carbon composites under an oxyacetylene torch. / Jia, Y. et al. // *Corros. Sci.* – 2016. Vol. – No. 104. – P. 61–70.
12. Improving the oxidation resistance under thermal shock condition of SiC-coated C/C composites with refined SiC grain size using ferrocene. / Huo, C. et al. // *Surf. Coat. Technol.* – 2017, Vol. – 316. – P. 39–47.
13. Functionalization of cotton fabric with nanosized TiO₂ coating for self-cleaning and antibacterial property enhancement. / Doganli G. J. et al. // *Journal of Coatings Technology and Research.* – 2016. – Vol. 13. – P. 257–265.
14. Microstructure and oxidation protection of a MoSi₂/SiO₂-B₂O₃-Al₂O₃, coating for SiC-coated carbon/carbon composites. Surf / Yong, X. et al. // *Coat. Technol.* – 2017. – Vol. 311, 63–69.
15. Preparation of Continuous Al₂O₃/Y₂O₃ Coating on Carbon Fiber by a Novel Aqueous Plasma Electrolysis. / Zhang, Y.P. et al. // *Mater. Sci. Forum Trans. Tech. Publ.* – 2017. – Vol. 898. – P. 1575–1582.
16. Li, L. Damage evolution and life prediction of cross-ply C/SiC ceramic-matrix composite under cyclic fatigue loading at room temperature and 800 °C in air. / Li, L. // *Materials.* – 2015. – Vol. 8. – P. 8539–8560.
17. The Microstructure of Nanocrystalline TiB₂ Films Prepared by Chemical Vapor Deposition. / Huang, X. et al. // *Materials.* – 2017. – Vol. 10. – 1425 p.
18. Szczurek, A. Improvement of Interaction in a Composite Structure by Using a Sol-Gel Functional Coating on Carbon Fibers. / Szczurek, A. // *Materials.* – 2017. – Vol. 10. – 990 p.
19. Joining of CVD-SiC coated and uncoated fibre reinforced ceramic matrix composites with pre-sintered Ti₃SiC₂ / Tatarko, P., Casalegno, V., Hu, C. et al. // *MAX phase using Spark Plasma Sintering. J. Eur. Ceram. Soc.* – 2016. – Vol. 36. – P. 3957–3967.
20. Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition Technological Design of Functional Coatings. / Januś, M., Kyzioł, K., Kluska et al. // *Arch. Metall. Mater.* – 2015. – Vol. 60. – P. 909–914.
21. Jonas, S., Januś, M., Jaglarz, J., Kyzioł, K. Formation of SixNy (H) and C:N:H layers by Plasma-Assisted Chemical Vapor Deposition method. *Thin Solid Films* 2016. – Vol. 600. – P. 162–168.
22. Effect of hydrogen plasma-mediated surface modification of carbon fibers on the mechanical properties of carbon-fiber-reinforced polyetherimide composites / Lee, E.S., Lee, C.H., Chun, Y.S. et al. // *Compos. Part B Eng.* – 2017. – Vol. 116. – P. 451–458.
23. Deposition of copper thin films by plasma enhanced pulsed chemical vapor deposition for metallization of carbon fiber reinforced plastics / Guo, Z., Sang, L., Wang, Z. et al. // *Surf. Coat. Technol.* – 2016. – Vol. 307. – P. 1059–1064.
24. Preparation and microstructure of Al₂O₃-SiO₂-TiO₂ coating on three-dimensional braided carbon fiber by sol-gel technology / Wang, J., Lin, W., Yan, X. et al. // *Mater. Des.* – 2016. – Vol. 89. – P. 928–932.
25. Hybrid coatings enriched with tetraethoxysilane for corrosion mitigation of hot-dip galvanized steel in chloride contaminated simulated concrete pore solutions / Figueira, R.B., Callone, E., Silva, C.J. et al. // *Materials* 2017. – Vol. 10. – 306 p.
26. Timing of polyethylene glycol addition for the control of SiO₂ sol structure and sol-gel coating properties / Xiang, Y., Li, X., Du, A. et al. // *J. Coat. Technol. Res.* – 2017. – Vol. 14. – P. 447–454.
27. Xia, K. Preparation of anti-oxidative SiC/SiO₂ coating on carbon fibers from vinyltriethoxysilane by sol-gel method / Xia, K., Lu, C., Yang, Y. // *Appl. Surf. Sci.* 2013. – Vol. 265. – P. 603–609.
28. Preparation and oxidation behavior of a double-layer coating for three-dimensional braided carbon fiber / Wang Jingjing, et al. // *Surface and Coatings Technology.* – 2016. – Vol. 298. – P. 58–63.
29. Hybrid coatings enriched with tetraethoxysilane for corrosion mitigation of hot-dip galvanized steel in chloride contaminated simulated concrete pore solutions / Figueira, R.B., Callone, E., Silva, C.J. et al. // *Materials.* – 2017. – Vol. 10. – 306 p.
30. Timing of polyethylene glycol addition for the control of SiO₂ sol structure and sol-gel coating properties. / Xiang, Y., Li, X., Du, A. et al. // *J. Coat. Technol. Res.* – 2017. – Vol. 14. – P. 447–454.
31. Guanyuan, et al. Fabrication and anti-oxidation ability of SiC-SiO₂ coated carbon fibers using sol-gel method / Yang, G., Huang, Z., Wang, X. et al. // *Yang. Materials.* – 2018. – Vol. 11. – No. 3. – 350 p.
32. Improvement of carbon fiber oxidation resistance by thin ceramic coating using silica particles. / Kira, Kohei, et al. // *Carbon.* – 2024. – Vol. – No. 228. – 119417 p.
33. Effects of carbon nanotubes by electrophoretic deposition on interlaminar properties of two dimensional carbon/carbon composites / Li, Y., Guo, L., Li, H. et al. // *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* – 2017. – Vol. 32. – No. 5. – P. 994–1000.
34. Assessment of three oxide/oxide ceramic matrix composites: Mechanical performance and effects of heat treatments. / Volkmann, E., Tushtev, K., Koch, D. et al. // *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* – 2015. – Vol. 68. – P. 19–28.
35. Pritzkow, Walter, Andreas Nöth, and Arne Rüdinger. Oxide ceramic matrix composites-manufacturing, machining, properties and industrial applications. – 2015. – 150 p.
36. On the thermal shock resistance and mechanical properties of novel unidirectional UHTCMCs for extreme environments. / Zoli, L., Vinci, A., Galizia et al. // *Scientific Reports.* – 2018. – Vol. 8. – No. 1. – P. 1–9.

37. Ultra-high-temperature ceramic matrix composites in hybrid rocket propulsion environment. / Mungiguerra, S., Di Martino, G. D., Savino, R. et al. // In: 2018 international energy conversion engineering conference. – 2018. – 4694 p.
38. Богомол Ю. І. Фізико-хімічні основи керування структурою та властивостями армованих керамічних матеріалів для роботи в екстремальних умовах експлуатації: дис. ...д-ра техн. наук: 05.16.06. / Богомол Ю. І. – К., 2019. – 371 с.
39. Microstructure and properties of directionally solidified LaB₆(100)-ZrB₂ eutectic composite prepared by the optical zone melting method. / Yang X., Zhao J., Zhu Z. et al. // Journal of the European Ceramic Society. – 2019. – No. 39. – P. 1803–1809.
40. Microstructure, mechanical and thermionic emission properties of a directionally solidified LaB₆-VB₂ eutectic composite / Yang, X., Wang, P., Wang, Z. et al. // Materials & Design, 2017. – Vol. – No. 133. – P. 299–306.
41. Local investigation of the emissive properties of LaB₆-ZrB₂ eutectics. / Berger, M. H., Back, T. C., Soukiassian, P. et al. // Journal of Materials Science. – 2017. – No. 52. – P. 5537–5543.
42. Demirskyi D., Sakka Y. In Situ Fabrication of B₄C-NbB₂ Eutectic Composites by Spark-Plasma Sintering. Journal of the American Ceramic Society. 2014. №97. P. 2376-2378.
43. Demirskyi D. High-Strength B₄C-TaB₂ Eutectic Composites Obtained via in situ by Spark Plasma Sintering / Demirskyi D., Sakka Y., Vasykiv O. // Journal of the American Ceramic Society. – 2016. – No. 99. – P. 2436–2441.
44. Demirskyi D. Analysis of the high-temperature flexural strength behavior of B₄C-TaB₂ eutectic composites produced by in situ spark plasma sintering / Demirskyi D., Vasykiv O. // Materials Science & Engineering A. – 2017. – No. 697. – P. 71–78.
45. Demirskyi D. Consolidation of B₄C-VB₂ eutectic ceramics by spark plasma sintering / Demirskyi D., Sakka Y., Vasykiv O. // Journal of the Ceramic Society of Japan. 2015. – No. 123. – P. 1051–1054.
46. Demirskyi D. Mechanical properties of SiC-NbB₂ eutectic composites by in situ spark plasma sintering / Demirskyi D., Vasykiv O. // Ceramics International. – 2016. – No. 42. – P. 19372–19385.
47. Loboda, P. I. Structure and properties of reinforced ceramic materials produced by directional solidification / Loboda, P. I. // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2018. – Vol. 57. – P. 13–26.
48. Directionally Solidified Boride and Carbide Eutectic Ceramics. / Chen, W. T., White, R. M., Goto, T., & Dickey, E. C. // Journal of the American Ceramic Society. – 2016. – No. 99. – P. 1837–1851.
49. Llorca J. Directionally solidified eutectic ceramic oxides / Llorca J., Orera V. M. // Progress in Materials Science. – 2006. – No. 51. – P. 711–809.
50. Лобода П. І. Спрямовано закристалізовані бориди / Llorca J., Orera V. M. – К.: Праймдрук, 2012. 395 с.
51. Вплив механічних коливань на формування мікроструктури монокристалів та керамічних композитів під час вирощування з розплаву / П. І. Лобода та ін. // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2013. – № 6. – С. 65–72.
52. Лобода П. І. Вплив ультразвуку на структуру і властивості спрямовано закристалізованих евтектичних сплавів. / П. І. Лобода, Ю. І. Богомол, Т. О. Соловйова // Металознавство та обробка металів. 2012. – № 4. – С. 23–28.
53. Ремізов Д. О. Вплив структурно-геометричних характеристик фазових складових на механічні властивості закристалізованого із розплаву евтектичного складу Ti-TiB / Ремізов Д.О., Богомол, Ю. І., Лобода, П. І. // Problems of Friction and Wear. – 2020. – Vol. 2. – No. 87. P. 68–77.
54. Room and high temperature toughening in directionally solidified B₄C-TiB₂ eutectic composites by Si doping. / Bogomol, I., Badica, P., Shen, Y. et al. // Journal of Alloys and Compounds. – 2013. – No. 570. – P. 94–99.
55. Ultra-High-Strength Nano-fibrillar Al₂O₃-YAG-YSZ Eutectics / Oliete P.B., Peña J.I., Larrea A. et al. // Advanced Materials. – 2007. – №19. – P. 2313–2318.
56. Богомол Ю. І. Структура та властивості квазіпотрійних спрямовано армованих композитів системи B₄C-TiB₂-SiC. Ю.І. / Богомол, П.І. Лобода, Я.Б. Головенько // Металознавство та обробка металів. – 2015. – № 2. – С. 37–42.
57. Bogomol I. High-temperature mechanical behaviour of the directionally solidified ceramic eutectics / Bogomol I. // 2019 International Conference on the Cooperation and Integration of Industry, Education, Research, and Application. Nanchang, China. 2019. – P. 38–39.
58. Multiphase Mo-Si-B Alloys Processed by Directional Solidification / Kruger M., Hasemann G., Bogomol I., Loboda P. I. // Materials Research Society Symposium Proceeding. – No.1516. – P. 1684–1689.
59. Microstructure and creep properties of a near-eutectic directionally solidified multiphase Mo-Si-B alloy / G. Hasemann et al. Intermetallics. 2014. No.48. P. 28–33.
59. Microstructure and creep properties of a near-eutectic directionally solidified multiphase Mo-Si-B alloy / Hasemann, G., Bogomol, I., Schliephake, D. et al. // Intermetallics. – 2014. – No. 48, P. 28–33.
60. Структура та властивості спрямовано закристалізованого сплаву системи Mo-8,7Si-18B / Ю. І. Богомол та ін. Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2016. – No 2. – С. 69–76.
61. Near-Eutectic Ternary Mo-Si-B Alloys: Microstructures and Creep Properties / G. Hasemann et al. // Journal of Metals. – 2016. – No. 68. – P. 2847–2853.
62. Вплив перемішування розплаву на структуру та властивості спрямовано закристалізованого сплаву Mo-17,5Si-8B. / М. І. Упатов, Ю. І. Богомол, В. В. Болбуг, Лобода П. І. // Металознавство та обробка металів. – 2018. – № 1. – С. 22–29.
63. Dense and tough (B₄C-TiB₂)-B₄C composite within a composite' by spark plasma sintering / Bogomol,

- I., Borodianska, H., Zhao, T. et al. // *Scripta Materialia*. – 2014. – No.71. – P. 17–20.
64. Одержання композиту $\text{W}_4\text{C}-\text{TiB}_2$ з ізотропною евтектичною мікроструктурою та його властивості. / І.О. Гусарова, О.М. Потапов, Є.В. Солодкий, Ю.І. Богомол // *Порошкова металургія*. – 2018. – №03/04. – С. 108–116.
65. Спосіб отримання керамічних полікристалічних матеріалів на основі карбіду бору методом електророзрядного спікання : пат. 87076 Україна, № u201307486 ; заявл. 12.06.2013 ; опубл. 27.01.2014, Бюл. № 2.
66. Спосіб отримання керамічного бронематеріалу на основі карбіду бору та дибориду титану: пат. 114502 Україна, № u201609558 ; заявл. 16.09.2016 ; опубл. 10.03.2017, Бюл. № 5.
67. Антоненко О.О. Дослідження властивостей і структури металокерамічних композитів системи $\text{W}_4\text{C}-\text{TiB}_2-\text{Al}$ / Антоненко О.О., Богомол Ю.І. // Збірка тез доповідей XII Міжнародної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених Перспективні технології на основі новітніх фізико-матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного конструювання матеріалів, 18–19 квітня 2019 року, Київ. – С. 183–185.
68. Антоненко О. О. Дослідження властивостей і структури металокерамічних композитів системи $\text{W}_4\text{C}-\text{TiB}_2-\text{Cu}$ / Антоненко О. О., Богомол Ю. І. // *Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції «Нові матеріали і технології в машинобудуванні»*, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, 30–31 травня 2019 р., 21 с.
69. Мікроструктура та механічні властивості евтектичного сплаву $\text{LaB}_6-\text{TiB}_2$ одержаного електророзрядним спіканням. / Загородня Е. В., Лобода П. И., Богомол Ю. І. та ін. // *Металознавство і новітні технології*. – 2011. – т. 33. Спецвипуск. – С. 351–360.
70. Спосіб отримання керамічних евтектичних полікристалічних матеріалів методом електророзрядного спікання: пат. 74036 Україна, № u201205104 ; заявл. 24.04.2012 ; опубл. 10.10.2012, Бюл. № 19.
71. Лобода П. І. Структура та властивості розпиленних порошків евтектичного сплаву $\text{W}_4\text{C}-\text{TiB}_2$. / П. І. Лобода, Ю. І. Богомол, О. І. Білий // *Металознавство та обробка металів*. – 2015. – № 3. – С. 46–52.
72. Effect of the Crystallization Kinetic Parameters on the Structure and Properties of a Eutectic Alloy of the $\text{LaB}_6-\text{TiB}_2$ System / Loboda P.I., Soloviova T.O., Bogomol Yu.I. et al. // *Journal of Superhard Materials*. – 2015. – No. 37. – P. 394–401.
73. Спосіб отримання керамічних евтектичних порошків на основі гексабориду лантану методом відцентрового плазмового розпилення: пат. 99564 Україна, № u201414167 ; заявл. 30.12.2014 ; опубл. 10.06.2015, Бюл. № 11.
74. Спосіб отримання керамічних евтектичних порошків на основі карбіду бору методом відцентрового плазмового розпилення: пат. 99563 Україна, № u201414166 ; заявл. 30.12.2014 ; опубл. 10.06.2015, Бюл. № 11.
75. Effect of the Cooling Rate During Melt Solidification on the Structure and Properties of $\text{WC}-\text{W}_2\text{C}$. / Trosnikova, I. Y., Loboda, P. I., Karasevska, O. P., & Bilyi, O. I. // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. – 2014. – No. 52. – P. 674–679.
76. High Hardness $\text{BaCb}-(\text{BxOy}/\text{BN})$ Composites with 3D Mesh-Like Fine Grain-Boundary Structure by Reactive Spark Plasma Sintering. / Vasylykiv, O., Borodianska, H., Badica, P. et al. // *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. – 2012. – No. 12. – P. 959–965.
77. Toughness control of boron carbide obtained by spark plasma sintering in nitrogen atmosphere / Badica, P., Borodianska, H., Xie, S. et al. // *Ceramics International*. 2014. – No. 40. – P. 3053–3061.
78. Llorca J. Directionally solidified eutectic ceramic oxides / Llorca J., Orera V.M. // *Progress in Materials Science*. – 2006. – No. 51. – P. 711–809.
79. Вплив термічної обробки на механічні властивості та на внутрішні напруження в спрямовано закристалізованому евтектичному сплаві $\text{W}_4\text{C}-\text{TiB}_2$. / Ю. В. Кобилінський, В. В. Болбут, Ю. І. Богомол, П. І. Лобода // VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Нові матеріали і технології в машинобудуванні». – 2016. – С. 77–78.
80. Mechanical properties of HfB_2 whiskers. / Dub, S. N., Loboda, P. I., Bogomol, Y. I. et al. // *Journal of Superhard Materials*. – 2013. – No. 35. – P. 234–241.
81. Mechanical properties of single crystals of transition metals diborides TM_2B_2 ($\text{TM} = \text{Sc}, \text{Hf}, \text{Zr}, \text{Ti}$). Experiment and theory. / Dub S. N., Sichkar S. M., Bilous V. et al. // *Journal of Superhard Materials*. 2017. – No. 39. – P. 308–318.
82. Influence of annealing on crucible-free float zone melted $\text{LaB}_6-\text{TiB}_2$ composites. / Soloviova, T., Karasevska O. P., Vleugels J. et al. // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2017. – No. 729. – P. 749–757.
83. Karadimas, G. Ceramic matrix composites for aero engine applications—a review / Karadimas, G., & Salonitis, K. // *Applied Sciences*, 2023. – Vol. 13. – No. 5. – 3017 p.
84. Study on the wear resistance of graphene modified nanostructured $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ coatings. / Wang, L., Liu, S., Gou, J. et al. // *Appl. Surf. Sci.* 2019. – Vol. 492. – P. 272–279.
85. Aviation G. E. GE Successfully Tests World's First Rotating Ceramic Matrix Composite Material for Next-Gen Combat Engine. GE Aviation, 2015.
86. Cavdar, U. In-situ compaction and sintering of $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{W}_4\text{C}$ composites by using a High-Frequency Induction System / Cavdar, U., Altintas, A., Karaca, B. // *Met. Mater.* – 2018. – Vol. 56. P. 177–181.
87. Lin, X. Pressureless sintering of W_4C whisker reinforced Al_2O_3 matrix composites // Lin, X., Ownby, P. // *J. Mater. Sci.* 2000. – Vol. 35. – P. 411–418.
88. Doorbar, Phillip J. 4.19 development of continuously-reinforced metal matrix composites for aerospace applications / Doorbar, Phillip J., Kyle-Henney, Stephen // *Compr. Compos. Mater.* 2018. – Vol. 4. – P. 439–463.

89. Плєскач, В. М. Жароміцні композити на металевій, інтерметалідній і керамічній основі / Плєскач, В. М., Ольшанецький В. Ю. // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2019. – №1. – С. 87–89.
90. Исследование влияния технологии производства штабиков на склонность проволоки из торированных вольфраморениевых сплавов к расслоению / В. С. Винниченко, Кононенко Ю. І., Ольшанецький В. Е., Орлов М. Р. // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2004. №1. – С. 84–88.
91. Коробко А. В. О формировании листовых высокотемпературных металлокомпози́тов с матрицами на основе ниобия, упрочнённых тугоплавкими вольфрамовыми волокнами / Коробко А. В. Лавренко А. С. // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2012. – № 1. – 52 с.
92. Судаков А. И. Перспективы применения композиционных материалов в ракетостроении / Судаков А. И., Геращенко В. В. // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2016. – Т. 1. – С. 173–174.
93. Коновал В. П. Стойкость к высокотемпературному окислению композиционных материалов и покрытий на основе диборида титана-хрома / Коновал В. П. // Доповіді НАН України. – 2015. № 5. – С. 83–89.
94. Tungsten fiber reinforced tungsten (Wf/W) using yarn based textile preforms. / Coenen, J. W., Huber, P., Lau, A. et al. // *Physica Scripta*. 2021. – Vol. 96. – No. 12. –124063 p.
95. Chemically deposited tungsten fibre-reinforced tungsten – The way to a mock-up for divertor applications. Riesch, J., Aumann, M., Coenen, J. W. et al. // *Nuclear Materials and Energy*. – 2016. – Vol. 9. – P. 75–83.
96. Large-scale tungsten fibre-reinforced tungsten and its mechanical properties / D. Schwalenberg & Neu, R. et al. // *Journal of Nuclear Engineering*. – 2022. – Vol. 3. – No. 4 P. 306–320.
97. Coenen, Jan Willem. Fusion materials development at Forschungszentrum Jülich / Coenen, Jan Willem // *Advanced Engineering Materials*. – 2020 Vol. 22. – No. 6. – 1901376 p.
98. Evolution of Tungsten Fiber-Reinforced Tungsten-Remarks on Production and Joining / Coenen, J. W., Lee, V. Y., Mao, Y. et al. // *Advanced Engineering Materials*. – 2023. – Vol. 25. – No. 19. – 2300569 p.
99. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. / Lee, C., Wei, X., Kysar, J. W. et al. // *Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. Science*. – 2008. – Vol. 321. – No. 5887. – P. 385–388.
100. Interfacial microstructure of graphite flake reinforced aluminum matrix composites fabricated via hot pressing. Hiroki Kurita et al. *Composites Part A // Applied Science and Manufacturing* 2015. – Vol. 73. – P. 125–131.
101. Interface evolution and superior tensile properties of multi-layer graphene reinforced pure Ti matrix composite / Mu, X. N., Cai, H. N., Zhang, H. M. et al. // *Materials & design*. – 2018. – Vol. 140. – P. 431–441.
102. Bioinspired, graphene-enabled Ni composites with high strength and toughness / Zhang, Y., Heim, F. M., Bartlett, J. L. et al. // *Science Advances*. – 2019. – Vol. 5. – No. 5: eaav5577.
103. Outstanding strength and toughness in graphene reinforced Nb/Nb₅Si₃ composites with interfacial nanophases. Xiong, B., Peng, F., Chen, W. et al. // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2023. – Vol. 25. – P. 6886–6897.
104. Strengthening effect induced by interfacial reaction in graphene nanoplatelets reinforced aluminum matrix composites / Xiong, B., Liu, K., Xiong, W. et al. // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2020. – Vol. 845. – 156282 p.
105. Interfacial reaction induced efficient load transfer in few-layer graphene reinforced Al matrix composites for high-performance conductor / Xiong, B., Peng, F., Chen, W. et al. // *Composites Part B: Engineering*, 2019. – Vol. 167. – P. 93–99.
106. Tjong, Sie Chin. Recent progress in the development and properties of novel metal matrix nanocomposites reinforced with carbon nanotubes and graphene nanosheets / Tjong, Sie Chin // *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2013. – Vol. 74. – No. 10: 281–350.
107. Strengthening mechanisms in graphene reinforced Nb/Nb₅Si₃ composite. Bowen, Xiong et al. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, Vol. No. 970: 172600.
108. Tang, Ye, Guo, Xiping. Role of deformation temperature and strain rate on microstructural evolution of hot compressed Nb-Si based ultrahigh temperature alloy / Tang, Ye, Guo, Xiping // *Intermetallics*, 2020. – Vol. 119. – 106719 p.
109. Surface microstructure modification of hypereutectic Nb-Si based alloys to improve oxidation resistance without damaging fracture toughness. / Guo, Y., Li, Z., He, J. et al. // *Materials Characterization*. – 2020. – Vol. 159. – 110051 p.
110. Rapid directionally solidified microstructure characteristic and fracture behaviour of laser melting deposited Nb-Si-Ti alloy / . Liu, W., Ren, X., Li, N. et al. // *Progress in Natural Science: Materials International*. – 2021. –Vol. 31(1). – P. 113–120.
111. Fang, Xin. Variation in morphology and crystallographic orientation of directionally solidified Nb-Si based alloys at high withdrawal rates / Fang, Xin, Guo, Xiping, Qiao, Yanqiang // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2020. – Vol. 819. – 153023 p.
112. Long, W. Y. Preparation of CNTs reinforced Nb/Nb₅Si₃ in-situ composites by spark plasma sintering / Long, W. Y., Xiong, W., Yao, J. P. // *Special Casting Nonferrous Alloys*. – 2015. – Vol. 35. – P. 119–123.
113. Interfacial phase induced load transfer in short carbon fiber reinforced Nb/Nb₅Si₃ composites / Xiong, B., Wang, C., Liu, K. et al. // *Materials Science and Engineering: A*, 2021. – Vol. 799. – 140156 p.
114. Strengthening mechanisms in short carbon fiber reinforced Nb/Nb₅Si₃ composites with interfacial reaction

- / Xiong, B., Peng, F., Wang, C. et al. // *Materials Science and Engineering: A*, 2021. – Vol. 825. – 141884 p.
115. Synergistic effects of Fe and C on microstructure and properties of Nb-Ti-Si based alloys. / Wang, Q., Wang, Q., Chen, R. et al. // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2023. – Vol. 936. – 168167 p.
116. Ultra-fine Nbss/Nb5Si3 in situ composites with remarkable properties prepared by ultrasonic melt treatment. / Zhou, Z., Wang, Q., Chen, R. et al. // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2023. – Vol. 940. – 168940 p.
117. Balancing the fracture toughness and tensile strength by multiple additions of Zr and Y in Nb-Si based alloys / Sun, G., Jia, L., Ye, C. et al. // *Intermetallics*. – 2021. – Vol. 133. – 107172 p.
118. Sala, Kasturi Effect of Ti addition and microstructural evolution on toughening and strengthening behavior of as cast or annealed Nb-Si-Mo based hypoeutectic and hypereutectic alloys / Sala, Kasturi, Mitra, Rahul // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2021. – Vol. 52. – P. 3436-3459.
119. Improving the mechanical properties of Nb-24Ti-16Si-2Al alloy by adding Zr and Fe to regulate silicide / Wang, Q., Wang, Q., Chen, R. et al. // *Materials Characterization*. – 2023. – Vol. 196. – 112566 p.
120. Improvement of fracture toughness of Nb-Si alloy by two-step heat treatment / Ye, C., Li, H., Jia, L. et al. // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2021. – Vol. 94. – 105378 p.
121. Microstructure evolution and mechanical properties of as-cast and ultrasonic treated Nb-16Si-xCr alloys / Zhou, Z., Wang, Q., Chen, R. et al. // *Journal of Materials Research and Technology*, 2022. – Vol. 17. – P. 2856–2863.
122. Effect of Ni on microstructures and mechanical properties for Multielemental Nb–Si-based alloys / Chen, D., Wang, Q., Chen, R. et al. // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2022. – Vol. 53. – No. 5. – P. 1793–1805.
123. Microstructure evolution and mechanical properties of ZrC-added Nb-16Si-20Ti alloys / Dezhi, Chen et al. *Materials Science and Engineering: A*. – 2022. – Vol. 829. – 142159 p.
124. Strengthening and toughening effect of laser melting deposited Nb-16Si-20Ti-3Al with nano-ZrC additions / Yin, X., Liang, J., Jia, X. et al. // *Materials Science and Engineering: A*. – 2022. – Vol. 850. – 143509 p.
125. Grammenos, I. Study of the role of Al, Cr and Ti additions in the microstructure of Nb–18Si–5Hf base alloys / Grammenos, I., Tsakiroopoulos, P. // *Intermetallics*. – 2010. – Vol. 18. – No. 2. P. 242–253.
126. Grammenos, I. Study of the role of Al, Cr and Ti additions in the microstructure of Nb-18Si-5Hf base alloys. / Grammenos, I., Tsakiroopoulos, P. // *Intermetallics*. – 2010. – Vol. 18. – No. 2. – P. 242–253.
127. A review of ultra high temperature Nb-Si based superalloys. / Jia, L., Weng, J., Sha, J. et al. // *Mater. China*. – 2015. – Vol. – No. 34. – P. 372–382.
128. Evading strength and toughness trade-off in graphene reinforced Nb/Nb5Si3 composites / Xiong, B., Wang, Z., Peng, F. et al. // *Intermetallics*. – 2024. – Vol. 174. – 108440 p.
129. Effects of sintering temperature on interface and mechanical properties of short carbon fiber reinforced Nb/Nb5Si3 composites fabricated by spark plasma sintering / Xiong, B., Wang, C., Xiong, Y. et al. // *Intermetallics*. – 2019. – Vol. 108. – P. 66–71.
130. Outstanding strength and toughness in graphene reinforced Nb/Nb5Si3 composites with interfacial nanophases / Xiong, B., Peng, F., Chen, W. et al. // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2023. – Vol. 25. – P. 6886–6897.
131. Evading strength and toughness trade-off in graphene reinforced Nb/Nb5Si3 composites / Xiong, B., Wang, Z., Peng, F. et al. // *Intermetallics*. – 2024. – Vol. 174. – 108440 p.
132. Carbon nanotubes: reinforced metal matrix composites / Nieto, A., Agarwal, A., Lahiri, D. et al. // CRC press, 2021.
133. Bachmaier, A. Generation of metallic nanocomposites by severe plastic deformation / Bachmaier, A., Pippan, R. // *International materials reviews*. – 2013. – Vol. 58. – No. 1. – P. 41–62.
134. High temperature thermal stability of pure copper and copper-carbon nanotube composites consolidated by high pressure torsion / Jenei, P., Gubicza, J., Yoon, E. Y. et al. // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2013. – Vol. No. – 51. P. 71–79.
135. Nuno, Silvestre. State-of-the-art review on carbon nanotube reinforced metal matrix composites / Nuno, Silvestre // *International Journal of Composite Materials*, 2013. – Vol. 3. – No. 6A. – P. 28–44.

Одержано 06.12.2024

STATE OF THE ISSUE REGARDING THE POSSIBILITY OF ENHANCING THE CHARACTERISTICS OF HIGH-TEMPERATURE COMPOSITES

Sergiy Byelikov

Dr. Sc., Professor, Professor of the Department of Transport Technologies, Zaporizhia Polytechnic National University, Zaporizhia, Ukraine, *e-mail: belikov@zp.edu.ua*, ORCID: 0000-0002-9510-8190

Valeriy Vinichenko

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Physical Material Science, of the National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: valeryi_v@ukr.net*, ORCID: 0009-0001-7631-9822

Oleksandr Korobko	Senior teacher, Department of Occupational Safety and Environmental Protection, of the National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, <i>e-mail</i> : <i>sany.kor.17@gmail.com</i> , ORCID: 0000-0001-9461-7762
Vadim Shalomееv	Dr. Sc., Professor, Vice-Rector for Research, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, <i>e-mail</i> : <i>shalomeev@zntu.edu.ua</i> , ORCID: 0000-0002-6091-837X
Dmytro Parkhisenko	Postgraduate of the National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, <i>e-mail</i> : <i>aviapdi@gmail.com</i> , ORCID: 0009-0004-2100-8201
Anatoliy Ershov	Dr. Sc., Professor, Professor of the Department of Physics, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, <i>e-mail</i> : <i>eav.nuzp@gmail.com</i> , ORCID: 0000-0002-9485-4896

Purpose. To compile a scientific and technical review of the state of the art, achievements and prospects for development in the field of composites for use in the aerospace industry and the development of technologies for their production. Summarise and critically analyse the known research results on the development and use of composites in the aerospace industry. Identify areas where further research is needed. Indicate authoritative sources of research results in the field of composites.

Research methods. A search was conducted for information on carbon-carbon, ceramic, and metal-matrix CMCs published over the past 15 years. The articles were found by searching the Internet in databases such as Scopus, Web of Science, and Google Scholar. Zotero software was used to collect, organise and cite research materials.

Results obtained. The state of the art, achievements and prospects for development in the field of high-temperature composites and the development of technologies for their production are systematised and analysed. The promising opportunities for increasing the operating temperatures of high-temperature composites are considered. The choice of the main directions of modern research on the use of composites in the aerospace industry is substantiated.

Scientific novelty. The information on the prospects of creating high-temperature composites with an increased operating temperature and the development of technologies that will increase their operating temperature and reduce technological energy consumption in the production of heat engine parts from them has been expanded.

Practical value. The information provided in this scientific and technical review can be used both for the development of new high-temperature composites and for improving the compositions and production technologies of known composite systems, for a reasonable choice of their phase components, as well as by graduate students when choosing a dissertation topic; help to formulate the objectives of the dissertation research, to choose modern methods of research.

Key words: high-temperature composites, matrix, fibres, moulding technology, nozzle extensions.

References

1. Potapov, A., Shtefan, Y., & Lichman, E. (2009). Research of material for uncooled nozzle extensions of liquid rocket engines. *Acta Astronautica*, 64(1), 22–27.
2. Gradl, P. R., & Valentine, P. (2017). Carbon-carbon nozzle extension development in support of in-space and upper-stage liquid rocket engines. In *53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference* (p. 5064).
3. Potapov, A. M. (2015). Kompoziti: perspektivi ispolzovaniya v raketno-kosmicheskoi tekhnike. *Kosmicheskaya nauka i tekhnologiya*, 21(5), 69.
4. Anikin, A. V., Berdov, R. D., Volkov, N. N., Volkova, L. I., Gurina, I. N., & Tsatsuev, S. M. (2019). Long-run testing of model nozzle extensions made of a carbon-carbon composite material in a liquid-propellant rocket engine operating on hydrogen and oxygen. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 60, 80–86.
5. Yu, S., Park, K., Lee, J. W., Hong, S. M., Park, C., Han, T. H., & Koo, C. M. (2017). Enhanced thermal conductivity of epoxy/Cu-plated carbon fiber fabric composites. *Macromolecular Research*, 25(6), 559–564.
6. Zhuang, Q., Zhang, P., Li, M., Yan, H., Yu, Z., & Lu, Q. (2017). Microstructure, wear resistance and oxidation behavior of Ni-Ti-Si coatings fabricated on Ti6Al4V by laser cladding. *Materials*, 10(11), 1248.
7. Zamani, P., & Valefi, Z. (2017). Microstructure, phase composition and mechanical properties of plasma sprayed Al₂O₃, Cr₂O₃ and Cr₂O₃-Al₂O₃ composite coatings. *Surface and Coatings Technology*, 316, 138–145.
8. Du, B., Hong, C., Qu, Q., Zhou, S., Liu, C., & Zhang, X. (2017). Oxidative protection of a carbon-bonded carbon fiber composite with double-layer coating of MoSi₂-SiC whisker and TaSi₂-MoSi₂-SiC whisker by slurry method. *Ceramics International*, 43(12), 9531–9537.
9. Ma XiaoJun, M. X., Zhou WanRu, Z. W., & Chen Yin, C. Y. (2017). Structure and photocatalytic properties of Mn-doped TiO₂ loaded on wood-based activated carbon fiber composites.
10. Farrokhzad, M. A. (2017). High temperature oxidation behaviour of autocatalytic Ni-P-BN (h) coatings. *Surface and Coatings Technology*, 309, 390–400.

11. Jia, Y., Li, H., Feng, L., Sun, J., Li, K., & Fu, Q. (2016). Ablation behavior of rare earth La-modified ZrC coating for SiC-coated carbon/carbon composites under an oxyacetylene torch. *Corrosion Science*, 104, 61–70.
12. Huo, C., Guo, L., Feng, L., Wang, C., Li, Z., Zhang, Y., & Kou, G. (2017). Improving the oxidation resistance under thermal shock condition of SiC-coated C/C composites with refined SiC grain size using ferrocene. *Surface and Coatings Technology*, 316, 39–47.
13. Doganli, G., Yuzer, B., Aydin, I., Gultekin, T., Con, A. H., Selcuk, H., & Palamutcu, S. (2016). Functionalization of cotton fabric with nanosized TiO₂ coating for self-cleaning and antibacterial property enhancement. *Journal of Coatings Technology and Research*, 13, 257–265.
14. Yong, X., Cao, L., Huang, J., Kong, W., Su, J., Li, C., ... & Liu, J. (2017). Microstructure and oxidation protection of a MoSi₂/SiO₂-B₂O₃-Al₂O₃ coating for SiC-coated carbon/carbon composites. *Surface and Coatings Technology*, 311, 63–69.
15. Zhang, Y. P., Shen, Y. H., Chen, W. W., Cheng, H. W., & Wang, L. (2017, July). Preparation of continuous Al₂O₃/Y₂O₃ coating on carbon fiber by a novel aqueous plasma electrolysis. In *Materials Science Forum*, 898, 1575–1582. Trans Tech Publications Ltd.
16. Li, L. (2015). Damage evolution and life prediction of cross-ply C/SiC ceramic-matrix composite under cyclic fatigue loading at room temperature and 800 C in air. *Materials*, 8(12), 8539–8560.
17. Huang, X., Sun, S., Tu, G., Lu, S., Li, K., & Zhu, X. (2017). The Microstructure of Nanocrystalline TiB₂ Films Prepared by Chemical Vapor Deposition. *Materials*, 10(12), 1425.
18. Szczurek, A., Barcikowski, M., Leluk, K., Babiarczuk, B., Kaleta, J., & Krzak, J. (2017). Improvement of interaction in a composite structure by using a sol-gel functional coating on carbon fibers. *Materials*, 10(9), 990.
19. Tatarko, P., Casalegno, V., Hu, C., Salvo, M., Ferraris, M., & Reece, M. J. (2016). Joining of CVD-SiC coated and uncoated fibre reinforced ceramic matrix composites with pre-sintered Ti₃SiC₂ MAX phase using Spark Plasma Sintering. *Journal of the European Ceramic Society*, 36(16), 3957–3967.
20. Januś, M., Kyzioł, K., Kluska, S., Konefał-Góral, J., Małek, A., & Jonas, S. (2015). Plasma assisted chemical vapour deposition-technological design of functional coatings. *Archives of Metallurgy and Materials*, 60.
21. Jonas, S., Januś, M., Jaglarz, J., & Kyzioł, K. (2016). Formation of SixNy (H) and C: N: H layers by plasma-assisted chemical vapor deposition method. *Thin Solid Films*, 600, 162–168.
22. Lee, E. S., Lee, C. H., Chun, Y. S., Han, C. J., & Lim, D. S. (2017). Effect of hydrogen plasma-mediated surface modification of carbon fibers on the mechanical properties of carbon-fiber-reinforced polyetherimide composites. *Composites Part B: Engineering*, 116, 451–458.
23. Guo, Z., Sang, L., Wang, Z., Chen, Q., Yang, L., & Liu, Z. (2016). Deposition of copper thin films by plasma enhanced pulsed chemical vapor deposition for metallization of carbon fiber reinforced plastics. *Surface and Coatings Technology*, 307, 1059–1064.
24. Wang, J., Lin, W., Yan, X., Wu, X., Wu, F., & Yang, Y. (2016). Preparation and microstructure of Al₂O₃-SiO₂-TiO₂ coating on three-dimensional braided carbon fiber by sol-gel technology. *Materials & Design*, 89, 928–932.
25. Figueira, R. B., Callone, E., Silva, C. J., Pereira, E. V., & Dirè, S. (2017). Hybrid coatings enriched with tetraethoxysilane for corrosion mitigation of hot-dip galvanized steel in chloride contaminated simulated concrete pore solutions. *Materials*, 10(3), 306.
26. Xiang, Y., Li, X., Du, A., Wu, S., Shen, J., & Zhou, B. (2017). Timing of polyethylene glycol addition for the control of SiO₂ sol structure and sol-gel coating properties. *Journal of Coatings Technology and Research*, 14, 447–454.
27. Xia, K., Lu, C., & Yang, Y. (2013). Preparation of anti-oxidative SiC/SiO₂ coating on carbon fibers from vinyltriethoxysilane by sol-gel method. *Applied Surface Science*, 265, 603–609.
28. Wang, J., Lin, W., Yan, X., Wu, X., Wu, F., & Yang, Y. (2016). Preparation and microstructure of Al₂O₃-SiO₂-TiO₂ coating on three-dimensional braided carbon fiber by sol-gel technology. *Materials & Design*, 89, 928–932.
29. Figueira, R. B., Callone, E., Silva, C. J., Pereira, E. V., & Dirè, S. (2017). Hybrid coatings enriched with tetraethoxysilane for corrosion mitigation of hot-dip galvanized steel in chloride contaminated simulated concrete pore solutions. *Materials*, 10(3), 306.
30. Xiang, Y., Li, X., Du, A., Wu, S., Shen, J., & Zhou, B. (2017). Timing of polyethylene glycol addition for the control of SiO₂ sol structure and sol-gel coating properties. *Journal of Coatings Technology and Research*, 14, 447–454.
31. Yang, G., Huang, Z., Wang, X., & Wang, B. (2018). Fabrication and anti-oxidation ability of SiC-SiO₂ coated carbon fibers using sol-gel method. *Materials*, 11(3), 350.
32. Improvement of carbon fiber oxidation resistance by thin ceramic coating using silica particles. / Kira, Kohei, et al. *Carbon*, 2024, Vol. No. 228. P. 119417.
33. Li, Y., Guo, L., Li, H., Ma, H., & Song, Q. (2017). Effects of carbon nanotubes by electrophoretic deposition on interlaminar properties of two dimensional carbon/carbon composites. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 32(5), 994–1000.
34. Volkmann, E., Tushtev, K., Koch, D., Wilhelmi, C., Göring, J., & Rezwani, K. (2015). Assessment of three oxide/oxide ceramic matrix composites: mechanical performance and effects of heat treatments. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 68, 19–28.
35. Pritzkow, W., Nöth, A., & Rüdinger, A. (2015). Oxide ceramic matrix composites-manufacturing, machining, properties and industrial applications.
36. Zoli, L., Vinci, A., Galizia, P., Melandri, C., & Sciti, D. (2018). On the thermal shock resistance and

mechanical properties of novel unidirectional UHTCMCs for extreme environments. *Scientific Reports*, 8(1), 1–9.

37. Mungiguerra, S., Di Martino, G. D., Savino, R., Zoli, L., Sciti, D., & Lagos, M. A. (2018). Ultra-high-temperature ceramic matrix composites in hybrid rocket propulsion environment. In 2018 international energy conversion engineering conference, 4694.

38. Bogomol, Yu. I. (2019). Fiziko-himichni osnovi keruvannya strukturoyu ta vlastivostyami armovanih keramichnih materialiv dlya roboti v ekstremalnih umovah ekspluatatsiyi.

39. Wang, Z., Yang, X., Zhao, J., Zhu, Z., Wang, Y., & Zhang, J. (2019). Microstructure and properties of directionally solidified LaB₆ (100)-ZrB₂ eutectic composite prepared by the optical zone melting method. *Journal of the European Ceramic Society*, 39(5), 1803–1809.

40. Yang, X., Wang, P., Wang, Z., Hu, K., Cheng, H., Li, Z., & Zhang, J. (2017). Microstructure, mechanical and thermionic emission properties of a directionally solidified LaB₆-VB₂ eutectic composite. *Materials & Design*, 133, 299–306.

41. Berger, M. H., Back, T. C., Soukiassian, P., Martinotti, D., Douillard, L., Fairchild, S. B., ... & Sayir, A. (2017). Local investigation of the emissive properties of LaB₆-ZrB₂ eutectics. *Journal of materials science*, 52, 5537–5543.

42. Demirskyi, D., & Sakka, Y. (2014). In situ fabrication of B₄C-NbB₂ eutectic composites by spark-plasma sintering. *Journal of the American Ceramic Society*, 97(8), 2376–2378.

43. Demirskyi, D., Sakka, Y., & Vasylykiv, O. (2016). High-strength B₄C-TaB₂ eutectic composites obtained via in situ by spark plasma sintering. *Journal of the American Ceramic Society*, 99(7), 2436–2441.

44. Demirskyi, D., & Vasylykiv, O. (2017). Analysis of the high-temperature flexural strength behavior of B₄C-TaB₂ eutectic composites produced by in situ spark plasma sintering. *Materials Science and Engineering: A*, 697, 71–78.

45. Demirskyi, D., Sakka, Y., & Vasylykiv, O. (2015). Consolidation of B₄C-VB₂ eutectic ceramics by spark plasma sintering. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 123(1443), 1051–1054.

46. Demirskyi, D., & Vasylykiv, O. (2016). Mechanical properties of SiC-NbB₂ eutectic composites by in situ spark plasma sintering. *Ceramics International*, 42(16), 19372–19385.

47. Loboda, P. I. (2018). Structure and properties of reinforced ceramic materials produced by directional solidification. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 57, 13–26.

48. Chen, W. T., White, R. M., Goto, T., & Dickey, E. C. (2016). Directionally solidified boride and carbide eutectic ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 99(6), 1837–1851.

49. LLorca, J., & Orera, V. M. (2006). Directionally solidified eutectic ceramic oxides. *Progress in materials science*, 51(6), 711–809.

50. Лобода П.І. Спрямовано закристалізовані бориди. К.: Праймдрук, 2012. 395 с.

51. Loboda, P. I., Bogomol, Yu. I., & Solovjova, T. O. (2013). Vpliv mehanichnih kolivan na formuvannya mikrostrukturi monokristaliv i keramichnih kompozitiv pid chas viroshuvannya z rozplavu. *Naukovi visti Nacionalnogo tehnicnogo universitetu Ukrayini Kiyivskij politehnicnij institut*, (6), 65–72.

52. Loboda, P. I., Bogomol, Yu. I., & Solovjova, T. O. (2012). Vpliv ultrazvuku na strukturu i vlastivosti spryamovano zakristalizovanih evtektichnih splaviv. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, (4), 23–28.

53. Remizov D. O., Bogomol, Yu. I., Loboda P. I. (2020). Influence of structural and geometric characteristics of phase components on the mechanical properties of the eutectic Ti-TiB composition crystallized from the melt, *Problems of Friction and Wear*, 2, 87, 68–77.

54. Bogomol, I., Badica, P., Shen, Y., Nishimura, T., Loboda, P., & Vasylykiv, O. (2013). Room and high temperature toughening in directionally solidified B₄C-TiB₂ eutectic composites by Si doping. *Journal of alloys and compounds*, 570, 94–99.

55. Oliete, P. B., Peña, J. I., Larrea, A., Orera, V. M., LLorca, J., Pastor, J. Y., ... & Segurado, J. (2007). Ultra-high-strength nanofibrillar Al₂O₃-YAG-YSZ eutectics. *Advanced Materials*, 19(17), 2313–2318.

56. Bogomol, Yu. I., Loboda, P. I., & Golovenko, Ya. B. (2015). Struktura ta vlastivosti kvazipotrijnih spryamovano armovanih kompozitiv sistemi V₄S-TiB₂-SiC. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, (2), 37.

57. Bogomol I. (2019). High-temperature mechanical behaviour of the directionally solidified ceramic eutectics. *International Conference on the Cooperation and Integration of Industry, Education, Research, and Application*. Nanchang, China. P. 38–39.

58. Kruger M., Hasemann G., Bogomol I., Loboda P. I. (2013). Multiphase Mo-Si-B Alloys Processed by Directional Solidification. *Materials Research Society Symposium Proceeding*, 1516, 1684–1689.

59. Hasemann, G., Bogomol, I., Schliephake, D., Loboda, P. I., & Krüger, M. (2014). Microstructure and creep properties of a near-eutectic directionally solidified multiphase Mo-Si-B alloy. *Intermetallics*, 48, 28–33.

60. Bogomol, Yu. I., Popovich, O. I., Kryuger, M., Loboda, P. I., Bogomol, Yu. I., Popovich, O. I., ... & Loboda, P. I. (2016). Struktura i vlastivosti spryamovano zakristalizovanogo splavu sistemi Mo-8, 7 Si-18 V.

61. Hasemann, G., Kaplunenko, D., Bogomol, I., & Krüger, M. (2016). Near-eutectic ternary Mo-Si-B alloys: microstructures and creep properties. *JOM*, 68, 2847–2853.

62. Upatov, M. I., Bogomol, Yu. I., Bolbut, V. V., & Loboda, P. I. (2018). Vpliv peremishuvannya rozplavu na strukturu ta vlastivosti spryamovano zakristalizovanogo splavu Mo-17, 5Si-8B. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, (1), 22–29.

63. Bogomol, I., Borodianska, H., Zhao, T., Nishimura, T., Sakka, Y., Loboda, P., & Vasylykiv, O. (2014). A dense and tough (B₄C-TiB₂)-B₄C 'composite within a composite' produced by spark plasma sintering. *Scripta Materialia*, 71, 17–20.

64. Gusarova I.O., Potapov O.M., Solodkii Є.V., Bogomol Yu.I. (2018). Oderzhannya kompozitu B_4C-TiB_2 z izotropnoyu yevtektichnoyu mikrostrukturoyu ta yogo vlastivosti. Poroshkova metalurgiya, 03/04, 108–116.
65. Sposib otrimannya keramichnykh polikristalichnykh materialiv na osnovi karbidu boru metodom yelektrozryadnogo spikannya: pat. 87076 Ukraïna, № u201307486; declared 12.06.2013; published 27.01.2014, Byul. № 2.
66. Sposib otrimannya keramichnogo bronematerialu na osnovi karbidu boru ta diboridu titanu: pat. 114502 Ukraïna, № u201609558; declared 16.09.2016; published 10.03.2017, Byul. № 5.
67. Antonenko O.O., Bogomol Yu.I. (2019). Doslidzhennya vlastivostei i strukturi metalokeramichnykh kompozitiv sistemi B_4C-TiB_2-Al / Zbirka tez dopovidei KhII Mizhnarodnoi konferentsii studentiv, aspirantiv ta molodik vchenikh "Perspektivni tekhnologii na osnovi novitnykh fiziko-materialoznavchikh doslidzhen ta komp'yuternogo konstruyuvannya materialiv, 18–19 kvitnya roku Kiïv, Ukraïna, 183–185.
68. Antonenko O.O., Bogomol Yu.I. (2019). Doslidzhennya vlastivostei i strukturi metalokeramichnykh kompozitiv sistemi B_4C-TiB_2-Cu / Materiali XI Mizhnarodnoi naukovy-tekhnichnoi konferentsii «Novi materialy i tekhnologii v mashinobuduvanni», KPI im. Igorya Sikorskogo, m. Kiïv, 30–31 travnya, 21.
69. Zahorodnia E.V., Loboda P.I., Bohomol Yu.I., Solodkyi Ye.V., Zyma R.A. (2011). Mikrostruktura ta mekhanichni vlastyvosti evtektichnogo splavu LaB_6-TiB_2 oderzhanoho elektroozryadnym spikanniam. Metalofizyka i novitni tekhnologii, 33. Spetsvypusk. 351–360.
70. Sposib otrimannya keramichnykh evtektichnykh polikristalichnykh materialiv metodom elektroozryadnogo spikannya: pat. 74036 Ukraina, № u201205104; declared 24.04.2012 ; published 10.10.2012, Biul. № 19.
71. Loboda, P. I., Bogomol, Yu. I., & Bilij, O. I. (2015). Struktura ta vlastivosti rozpylenih poroshkiv evtektichnogo splavu V_4S-TiV_2 . Metaloznavstvo ta obrobka metaliv, (3), 46–52.
72. Loboda P.I., Soloviova T.O., Bogomol Yu.I., Remizov D.O., Bilyi O.I. (2015). Effect of the Crystallization Kinetic Parameters on the Structure and Properties of a Eutectic Alloy of the LaB_6-TiB_2 System. Journal of Superhard Materials, 37, 394–401.
73. Sposib otrimannya keramichnykh evtektichnykh poroshkiv na osnovi heksaborydu lantanu metodom vidtsentrovoho plazmovoho rozpylennia: pat. 99564 Ukraina, № u201414167; declared 30.12.2014; published.10.06.2015, Biul. № 11.
74. Sposib otrimannya keramichnykh evtektichnykh poroshkiv na osnovi karbidu boru metodom vidtsentrovoho plazmovoho rozpylennia: pat. 99563 Ukraina, № u201414166; declared 30.12.2014 ; published 10.06.2015, Biul. № 11.
75. Trosnikova, I. Y., Loboda, P. I., Karasevska, O. P., & Bilyi, O. I. (2014). Effect of the cooling rate during melt solidification on the structure and properties of WC–W 2 C. Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 52, 674–679.
76. Vasylykiv, O., Borodianska, H., Badica, P., Grasso, S., Sakka, Y., Tok, A., ... & Ma, J. (2012). High hardness B a C b-(B x O y/BN) composites with 3D mesh-like fine grain-boundary structure by reactive spark plasma sintering. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 12(2), 959–965.
77. Badica, P., Borodianska, H., Xie, S., Zhao, T., Demirskiy, D., Li, P., ... & Vasylykiv, O. (2014). Toughness control of boron carbide obtained by spark plasma sintering in nitrogen atmosphere. Ceramics International, 40(2), 3053–3061.
78. Llorca J., Orera V.M. (2006). Directionally solidified eutectic ceramic oxides. Progress in Materials Science, 51, 711–809.
79. Kobylinskyi Yu.V., Bolbut V.V., Bohomol Yu.I., Loboda P.I. (2016). Vplyv termichnoi obrobky na mekhanichni vlastyvosti ta na vnutrishni napruzhennia v spriamovano zakrystalizovanomu evtektichnomu splavu B_4C-TiB_2 . VIII Mizhnarodna naukovy-tekhnichna konferentsiia "Novi materialy i tekhnologii v mashinobuduvanni". 77–78.
80. Dub, S. N., Loboda, P. I., Bogomol, Y. I., Tolmacheva, G. N., & Tkach, V. N. (2013). Mechanical properties of HfB₂ whiskers. Journal of Superhard Materials, 35, 234–241.
81. Dub S.N., Sichkar S.M., Bilous V., Tolmachova G.N., Loboda P.I., Bogomol I., Kysla G.P. (2017). Mechanical properties of single crystals of transition metals diborides TMB_2 (TM = Sc, Hf, Zr, Ti). Experiment and theory. Journal of Superhard Materials, 39, 308–318.
82. Soloviova. T., Karasevska O. P., Vleugels J., Loboda P. I. (2017). Influence of annealing on crucible-free float zone melted LaB_6-TiB_2 composites. Journal of Alloys and Compounds, 729, 749–757.
83. Karadimas, G., & Salonitis, K. (2023). Ceramic matrix composites for aero engine applications—a review. Applied Sciences, 13(5), 3017.
84. Wang, L., Liu, S., Gou, J., Zhang, Q., Zhou, F., Wang, Y., & Chu, R. (2019). Study on the wear resistance of graphene modified nanostructured Al_2O_3/TiO_2 coatings. Applied Surface Science, 492, 272–279.
85. Aviation, G. E. (2015). GE Successfully Tests World's First Rotating Ceramic Matrix Composite Material for Next-Gen Combat Engine. GE Aviation. Available online: <https://www.geaerospace.com/press-release/military-engines/ge-successfully-tests-worlds-first-rotating-ceramic-matrix-composite> (accessed on 31 December 2022).
86. Cavdar, U., Altintaş, A., & Karaca, B. (2018). In-situ compaction and sintering of $Al_2O_3-B_4C$ composites by using a High-Frequency Induction System. Metallic Materials, 56, 177–181.
87. Lin, X., & Darrell Ownby, P. (2000). Pressureless sintering of B_4C whisker reinforced Al_2O_3 matrix composites. Journal of materials science, 35(2), 411–418.
88. Doorbar, P. J., & Kyle-Henney, S. (2018). 4.19 development of continuously-reinforced metal matrix composites for aerospace applications. Compr. Compos. Mater, 4, 439–463.

89. Pleskach, V. M., & Olshaneckij, V. Yu. (2019). Zharomicni kompoziti na metalevij, intermetalidnij i keramichnij osnovi. Novi materiali i tehnologiyi v metalurgiyi ta mashinobuduvanni, (1), 87–89.
90. Vinichenko V. S., Kononenko Yu. Y., Olshanetskiy V. E., Orlov M. R. (2004). Yssledovanye vliyaniya tekhnolohyy proizvodstva shtabykov na sklonnost provoloky yz torygovannykh volframorenyevykh splavov k rassloenyiu, Novi materialy i tekhnolohii v metalurhii ta mashynobuduvanni, (1), 84–88.
91. Korobko, A. V., & Lavrenko, A. S. (2012). O formirovannii listovykh vysokotemperaturnykh metallokompozitov s matricami na osnove niobiya, uprochnennykh tugoplavkimi volframovymi voloknami. Novi materiali i tehnologiyi v metalurgiyi ta mashinobuduvanni, (1), 52–54.
92. Sudakov, A. I., & Gerashenko, V. V. (2016). Perspektivy primeneniya kompozicionnykh materialov v raketostroeniii. Aktualnye problemy aviacii i kosmonavtiki, 1(12), 173–174.
93. Konoval, V. P. (2015). Stojkost k vysokotemperaturnomu okisleniyu kompozicionnykh materialov i pokrytij na osnove diborida titana–hroma. Dopovidi Nacionalnoyi akademiyi nauk Ukrayini, (5), 83–89.
94. Coenen, J. W., Huber, P., Lau, A., Raumann, L., Schwalenberg, D., Mao, Y., ... & Neu, R. (2021). Tungsten fiber reinforced tungsten (Wf/W) using yarn based textile preforms. *Physica Scripta*, 96(12), 124063.
95. Riesch, J., Aumann, M., Coenen, J. W., Gietl, H., Holzner, G., Höschen, T., ... & Neu, R. (2016). Chemically deposited tungsten fibre-reinforced tungsten—The way to a mock-up for divertor applications. *Nuclear Materials and Energy*, 9, 75–83.
96. D. Schwalenberg & Neu, R. (2022). Large-scale tungsten fibre-reinforced tungsten and its mechanical properties. *Journal of Nuclear Engineering*, 3(4), 306–320.
97. Coenen, J. W. (2020). Fusion materials development at Forschungszentrum Jülich. *Advanced Engineering Materials*, 22(6), 1901376.
98. Coenen, J. W., Lee, V. Y., Mao, Y., Morrison, A., Dorow-Gerspach, D., Tan, X., ... & Linsmeier, C. (2023). Evolution of Tungsten Fiber-Reinforced Tungsten—Remarks on Production and Joining. *Advanced Engineering Materials*, 25(19), 2300569.
99. Lee, C., Wei, X., Kysar, J. W., & Hone, J. (2008). Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. *science*, 321(5887), 385–388.
100. Kurita, H., Miyazaki, T., Kawasaki, A., Lu, Y., & Silvain, J. F. (2015). Interfacial microstructure of graphite flake reinforced aluminum matrix composites fabricated via hot pressing. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 73, 125–131.
101. Mu, X. N., Cai, H. N., Zhang, H. M., Fan, Q. B., Zhang, Z. H., Wu, Y., ... & Wang, D. D. (2018). Interface evolution and superior tensile properties of multi-layer graphene reinforced pure Ti matrix composite. *Materials & design*, 140, 431–441.
102. Zhang, Y., Heim, F. M., Bartlett, J. L., Song, N., Isheim, D., & Li, X. (2019). Bioinspired, graphene-enabled Ni composites with high strength and toughness. *Science Advances*, 5(5), eaav5577.
103. Xiong, B., Peng, F., Chen, W., Li, C., Zhu, Q., Niu, Z., ... & Cheng, D. (2023). Outstanding strength and toughness in graphene reinforced Nb/Nb₅Si₃ composites with interfacial nano-phases. *Journal of Materials Research and Technology*, 25, 6886–6897.
104. Xiong, B., Liu, K., Xiong, W., Wu, X., & Sun, J. (2020). Strengthening effect induced by interfacial reaction in graphene nanoplatelets reinforced aluminum matrix composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 845, 156282.
105. Zhou, W., Mikulova, P., Fan, Y., Kikuchi, K., Nomura, N., & Kawasaki, A. (2019). Interfacial reaction induced efficient load transfer in few-layer graphene reinforced Al matrix composites for high-performance conductor. *Composites Part B: Engineering*, 167, 93–99.
106. Tjong, S. C. (2013). Recent progress in the development and properties of novel metal matrix nanocomposites reinforced with carbon nanotubes and graphene nanosheets. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 74(10), 281–350.
107. Xiong, B., Cheng, D., Zheng, F., Peng, F., Zhu, Q., Niu, Z., ... & Wang, Z. (2024). Strengthening mechanisms in graphene reinforced Nb/Nb₅Si₃ composite. *Journal of Alloys and Compounds*, 970, 172600.
108. Tang, Y., & Guo, X. (2020). Role of deformation temperature and strain rate on microstructural evolution of hot compressed Nb–Si based ultrahigh temperature alloy. *Intermetallics*, 119, 106719.
109. Guo, Y., Li, Z., He, J., Su, H., Jia, L., Zhang, J., ... & Zhang, H. (2020). Surface microstructure modification of hypereutectic Nb–Si based alloys to improve oxidation resistance without damaging fracture toughness. *Materials Characterization*, 159, 110051.
110. Liu, W., Ren, X., Li, N., Gao, C., & Xiong, H. (2021). Rapid directionally solidified microstructure characteristic and fracture behaviour of laser melting deposited Nb–Si–Ti alloy. *Progress in Natural Science: Materials International*, 31(1), 113–120.
111. Fang, X., Guo, X., & Qiao, Y. (2020). Variation in morphology and crystallographic orientation of directionally solidified Nb–Si based alloys at high withdrawal rates. *Journal of Alloys and Compounds*, 819, 153023.
112. Long, W. Y., Xiong, W., & Yao, J. P. (2015). Preparation of CNTs reinforced Nb/Nb₅Si₃ in-situ composites by spark plasma sintering. *Special Casting Nonferrous Alloys*, 35, 119–123.
113. Xiong, B., Wang, C., Liu, K., Wang, Z., Xie, Z., Zhang, T., & Li, X. (2021). Interfacial phase induced load transfer in short carbon fiber reinforced Nb/Nb₅Si₃ composites. *Materials Science and Engineering: A*, 799, 140156.
114. Xiong, B., Peng, F., Wang, C., Liu, K., & Wang, Z. (2021). Strengthening mechanisms in short carbon fiber reinforced Nb/Nb₅Si₃ composites with interfacial

- reaction. *Materials Science and Engineering: A*, 825, 141884.
115. Wang, Q., Wang, Q., Chen, R., Wang, X., Su, Y., & Fu, H. (2023). Synergistic effects of Fe and C on microstructure and properties of Nb-Ti-Si based alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 936, 168167.
116. Zhou, Z., Wang, Q., Chen, R., Chen, D., & Fu, H. (2023). Ultra-fine Nbss/Nb₅Si₃ in situ composites with remarkable properties prepared by ultrasonic melt treatment. *Journal of Alloys and Compounds*, 940, 168940.
117. Sun, G., Jia, L., Ye, C., Jin, Z., Wang, Y., Li, H., & Zhang, H. (2021). Balancing the fracture toughness and tensile strength by multiple additions of Zr and Y in Nb-Si based alloys. *Intermetallics*, 133, 107172.
118. Sala, K., & Mitra, R. (2021). Effect of Ti addition and microstructural evolution on toughening and strengthening behavior of as cast or annealed Nb-Si-Mo based hypoeutectic and hypereutectic alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 52, 3436–3459.
119. Wang, Q., Wang, Q., Chen, R., Wang, X., Su, Y., & Fu, H. (2023). Improving the mechanical properties of Nb-24Ti-16Si-2Al alloy by adding Zr and Fe to regulate silicide. *Materials Characterization*, 196, 112566.
120. Ye, C., Li, H., Jia, L., Jin, Z., Sun, G., & Zhang, H. (2021). Improvement of fracture toughness of Nb-Si alloy by two-step heat treatment. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 94, 105378.
121. Zhou, Z., Wang, Q., Chen, R., Zhao, T., Chen, D., & Su, Y. (2022). Microstructure evolution and mechanical properties of as-cast and ultrasonic treated Nb-16Si-xCr alloys. *Journal of Materials Research and Technology*, 17, 2856–2863.
122. Chen, D., Wang, Q., Chen, R., Zhou, Z., Su, Y., & Fu, H. (2022). Effect of Ni on microstructures and mechanical properties for Multielemental Nb-Si-based alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 53(5), 1793–1805.
123. Chen, D., Wang, Q., Chen, R., Zhou, Z., Su, Y., Guo, J., & Fu, H. (2022). Microstructure evolution and mechanical properties of ZrC-added Nb-16Si-20Ti alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 829, 142159.
124. Yin, X., Liang, J., Jia, X., Chen, S., Shang, S., Sui, Y., & Liu, C. (2022). Strengthening and toughening effect of laser melting deposited Nb-16Si-20Ti-3Al with nano-ZrC additions. *Materials Science and Engineering: A*, 850, 143509.
125. Grammenos, I., & Tsakirooulos, P. (2010). Study of the role of Al, Cr and Ti additions in the microstructure of Nb-18Si-5Hf base alloys. *Intermetallics*, 18(2), 242–253.
126. Grammenos, I., & Tsakirooulos, P. (2010). Study of the role of Mo and Ta additions in the microstructure of Nb-18Si-5Hf silicide based alloy. *Intermetallics*, 18(8), 1524–1530.
127. Jia, L., Weng, J., Sha, J., Zhou, C., & Zhang, H. (2015). A review of ultra high temperature Nb-Si based superalloys. *Mater. China*, 34, 372–382.
128. Xiong, B., Wang, Z., Peng, F., Tu, Z., Yan, Y., Zheng, F., ... & Wang, Z. (2024). Evading strength and toughness trade-off in graphene reinforced Nb/Nb₅Si₃ composites. *Intermetallics*, 174, 108440.
129. Xiong, B., Wang, C., Xiong, Y., Xie, D., & Zhang, X. (2019). Effects of sintering temperature on interface and mechanical properties of short carbon fiber reinforced Nb/Nb₅Si₃ composites fabricated by spark plasma sintering. *Intermetallics*, 108, 66–71.
130. Xiong, B., Peng, F., Chen, W., Li, C., Zhu, Q., Niu, Z., ... & Cheng, D. (2023). Outstanding strength and toughness in graphene reinforced Nb/Nb₅Si₃ composites with interfacial nano-phases. *Journal of Materials Research and Technology*, 25, 6886–6897.
131. Xiong, B., Wang, Z., Peng, F., Tu, Z., Yan, Y., Zheng, F., & Wang, Z. (2024). Evading strength and toughness trade-off in graphene reinforced Nb/Nb₅Si₃ composites. *Intermetallics*, 174, 108440.
132. Nieto, A., Agarwal, A., Lahiri, D., Bisht, A., & Bakshi, S. R. (2021). *Carbon nanotubes: reinforced metal matrix composites*. CRC press.
133. Bachmaier, A., & Pippan*, R. (2013). Generation of metallic nanocomposites by severe plastic deformation. *International materials reviews*, 58(1), 41–62.
134. Jenei, P., Gubicza, J., Yoon, E. Y., Kim, H. S., & Lábár, J. L. (2013). High temperature thermal stability of pure copper and copper-carbon nanotube composites consolidated by high pressure torsion. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 51, 71–79.
135. Silvestre, N. (2013). State-of-the-art review on carbon nanotube reinforced metal matrix composites. *International Journal of Composite Materials*, 3(6A), 28–44.