

Сучасні підходи до абразивної обробки вуглець-вуглецевих матеріалів та інструментів для її реалізації

М. М. Молнар¹ • О. Ф. Саленко¹

Received: 9 April 2025 / Revised: 25 May 2025 / Accepted: 4 June 2025

Анотація. В статті розглядаються вуглець-вуглецеві композити, які є перспективними матеріалами для аерокосмічної, оборонної та автомобільної промисловості завдяки їх унікальному поєднанню високої міцності, термостійкості та малої густини. Однак, їх механічна обробка є складною задачею через їхню складну мікроструктуру та абразивність, що призводить до утворення дефектів, зносу інструменту та проблем з видаленням стружки. У зв'язку з цим, метою даної роботи є аналіз основних викликів при механічній обробці В-В композитів та розгляд можливих підходів до мінімізації цих проблем.

Метою дослідження є покращення характеристик абразивних різальних інструментів в завданні різання композитів використовуючи методи адитивного виробництва.

У статті представлено огляд застосування В-В композитів у різних галузях, включаючи системи теплового захисту, гальмівні диски, компоненти газових турбін та ін. Розглянуто основні проблеми, пов'язані з їх обробкою, такі як розширення матеріалу, знос ріжучого інструменту та видалення стружки. Проаналізовано вплив різних факторів, включаючи механічні навантаження, термічні впливи та конструкцію інструменту, на виникнення цих проблем.

Результати дослідження показують, що ефективна обробка В-В композитів потребує застосування спеціалізованих ріжучих інструментів, методів контролю та моніторингу стану інструменту, а також використання альтернативних методів обробки. Запропоновано підходи до мінімізації проблем, пов'язаних з обробкою, включаючи оптимізацію різального інструменту використовуючи адитивні технології.

Отримані результати огляду літературних джерел можуть бути використані в моделюванні різального процесу та для оптимізації параметрів різального експерименту. Також отримані результати показують актуальність вибраної проблеми та можливості подальшого застосування.

Ключові слова: вуглець-вуглецевий композит, адитивне виробництво, абразивна обробка, алмазно-абразивне свердління.

Вступ

Вуглець-вуглецеві (В-В) композити є одними з найперспективніших матеріалів сучасного матеріалознавства, завдяки їх унікальному поєднанню високої міцності, термостійкості та малої густини. Їх використання в аерокосмічній, оборонній та автомобільній галузях обумовлене винятковими експлуатаційними характеристиками, такими як стійкість до високих температур, хімічна інертність та здатність витримувати значні термомеханічні навантаження. Основним конс-

труктивним елементом цих матеріалів є вуглецеве волокно, яке вбудоване у вуглецеву матрицю, створюючи високоміцну структуру з вираженою анізотропією механічних властивостей. Їх здатність витримувати екстремальні термомеханічні навантаження підкреслює їх корисність в умовах, де інші матеріали не можуть бути використані [1]–[3].

Технологія виготовлення В-В композитів включає кілька основних підходів, серед яких хімічна інфільтрація парів (CVI) та полімерна інфільтрація-піроліз (PIP). Ці методи забезпечують ефективне ущільнення матеріалу та контрольовану мікроструктуру, що дозволяє досягати високих характеристик міцності та довговічності. Проте, їх застосування обмежується високими витратами на виробництво, складністю контролю рівномірності ущільнення та необхідністю багатоетапної термообробки [4]–[6].

✉ М.М. Молнар
molnar.mykhailo@iitl.kpi.ua

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

Наукові дослідження з теми механічної обробки В-В композитів є важливими, адже незважаючи на значні переваги В-В композитів, їх механічна обробка є суттєвим викликом через складну мікроструктуру та підвищену абразивність матеріалу. Основними проблемами при механічній обробці таких композитів є утворення дефектів, знос різального інструменту та видалення стружки. Розшарування матеріалу, зумовлене різною жорсткістю волокон та матриці, є однією з основних причин втрати механічних характеристик виробів. Окрім того, швидкий знос інструменту, викликаний абразивною природою вуглецевих волокон, значно знижує ефективність виробничих процесів та підвищує витрати на інструменти.

Постановка проблеми

Ефективне різання В-В композитів потребує застосування спеціалізованих ріжучих інструментів, таких як алмазні або інші надтверді матеріали, які забезпечують високу стійкість до зносу та мінімізацію термічних ушкоджень. Додатково, методи контролю та моніторингу стану інструменту, зокрема акустична емісія та інфрачервона термографія, дозволяють оперативно визначати ступінь його зношування та прогнозувати термін служби. Крім того, перспективним напрямом є створення оптимізованих інструментів шляхом використання адитивних технологій.

Попри те, що адитивні технології виготовлення абразивного різального інструменту дозволяють забезпечити точне дотримання таких параметрів як закон розподілу абразивних зерен, товщину зв'язки та кількість шарів абразиву, питання оптимізації різального інструменту залишається актуальним, адже воно вимагає врахування параметрів композитного матеріалу заготовки та режимів різання.

Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є систематизація можливостей використання В-В композитного матеріалу, огляд актуальних викликів його механічної обробки, дослідження теоретичних залежностей різання В-В композитного матеріалу та аналіз наявних різальних інструментів створених з використанням адитивних технологій. Це дасть можливість оцінити переваги виготовлення спеціалізованого інструменту для обробки В-В композитного матеріалу.

Огляд застосування вуглець-вуглецевих композитів

Завдяки своїм унікальним характеристикам, В-В композити широко застосовуються в аерокосмічній, автомобільній та енергетичній галузях. У цьому розді-

лі розглядається їх застосування в системах теплового захисту для головної частини ракет, гальмівних дисках, компонентах газових турбін і камерах рідинних двигунів, та оцінюється, наскільки ці матеріали відповідають або не відповідають критеріям продуктивності.

Таблиця 1. Головні механічні властивості вуглець-вуглецевих композитів

Властивість	Одиниця вимірювання	Значення
Міцність на стиск	МПа	100–150
Щільність	гр/см ²	1.3–2.5
Міцність на розрив	МПа	800–900
Теплове розширення	К ⁻¹	2×10 ⁻⁶
Теплопровідність	Вт/(м×К)	20–150
Стійкість до теплових ударів	Вт/мм	150–170
Модуль Юнга	ГПа	250–300

Також для дослідження процесу різання вуглець-вуглецевих композитів варто розрізняти механічні властивості волокон, які можуть бути на основі поліакрилонітрилу (ПАН) або кам'яновугільного пеку, а також механічні властивості вуглецевої матриці.

Таблиця 2. Головні механічні властивості вуглецевих волокон

Властивість	Одиниця вимірювання	Значення
Щільність	гр/см ²	1.75–2.00
Міцність на розрив	МПа	1000–2500
Міцність на стиск	МПа	100–150
Теплове розширення	К ⁻¹	1×10 ⁻⁶
Теплопровідність	Вт/(м×К)	10–600

Таблиця 3. Головні механічні властивості вуглецевої матриці

Властивість	Одиниця вимірювання	Значення
Щільність	гр/см ²	1.6–1.9
Міцність на розрив	МПа	10–50
Міцність на стиск	МПа	50–100
Теплове розширення	К ⁻¹	3×10 ⁻⁶
Теплопровідність	Вт/(м×К)	1–20

Тепловий захист для головної частини

Ракети, що повертаються, зазнають екстремального аеродинамічного нагрівання при поверненні в атмосферу Землі. Висока швидкість спуску спричиняє інтенсивне тертя з атмосферними газами, що призводить до перевищення температури понад 1500 °C. Щоб захистити ці апарати від згоряння, необхідна система термозахисту (TPS – thermal protection system). В-В композити широко застосовуються в TPS завдяки їхній винятковій стійкості до високих температур і низькому коефіцієнту теплового розширення.

Одним з найяскравіших прикладів використання вуглець-вуглецевих композитів у TPS є програма NASA “Space Shuttle”. Армований вуглець-вуглецевий матеріал (RCC) був використаний для носового конуса та передніх кромek крила, які є найбільш теплоємними зонами під час входу в атмосферу. RCC був обраний за його здатність витримувати екстремальні температури без значної деградації. Однак цей матеріал також крихкий і схильний до пошкоджень від ударів. Катастрофа шаттла “Columbia” у 2003 році продемонструвала критичну слабкість RCC: шматок ізоляційної піни вдарився об крило під час запуску, спричинивши пошкодження TPS. Це підкреслило необхідність ретельного технічного обслуговування і ударостійких покриттів для застосування RCC.

Окрім “Спейс Шаттл”, інші космічні програми досліджували використання вуглепластикових композитів у космічних апаратах багаторазового використання. Експериментальний космічний літак X-37B, що експлуатується ВПС США, також використовує елементи В-В композити у своїй системі термального захисту. Аналогічно, в нещодавніх дослідженнях гіперзвукових транспортних засобів вуглепластикові композити вивчалися на предмет їхньої здатності витримувати численні високотемпературні цикли входу в атмосферу без значної деградації матеріалу.

Хоча вуглепластикові композити добре працюють в екстремальних температурних умовах, їхнім основним обмеженням є окислення при високих температурах у середовищі з високим вмістом кисню. Для вирішення цієї проблеми наносять захисні покриття, такі як карбід кремнію (SiC) або карбід гафнію (HfC), щоб підвищити стійкість до окислення. Хоча ці покриття підвищують довговічність, вони можуть страждати від мікротріщин, що зумовлює необхідність подальших досліджень самовідновлюваних або більш міцних захисних шарів.

Гальмівні диски в автомобільній та аерокосмічній промисловості

Гальмівні системи високопродуктивних автомобілів та літаків зазнають екстремальних теплових навантажень зумовлене силою тертя. Традиційні гальмівні диски на металевій основі страждають від теплового розширення, зносу та зниження ефективності в умовах високих температур. Композитні гальмівні диски В-В

матеріалів мають значні переваги, включаючи чудову теплопровідність, малу вагу та високі фрикційні характеристики.

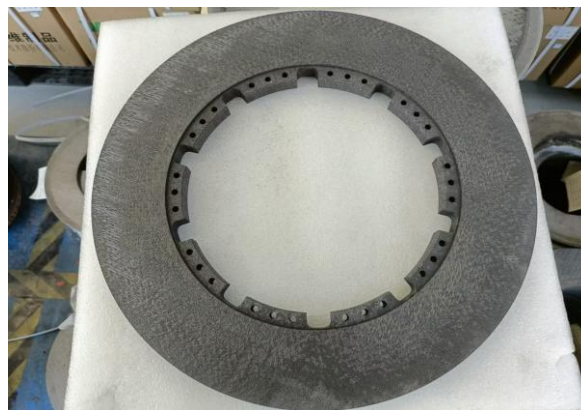


Рис 1. Гальмівний диск літака Airbus A320 [27]

В автомобільній промисловості, перегони Формули-1 (F1) використовують композитні гальмівні диски з В-В композитів. Ці гальмівні системи можуть працювати при температурі понад 1000 °C без втрати ефективності. Висока теплопровідність композитів забезпечує рівномірне розсіювання тепла, запобігаючи локальному перегріву та виходу з ладу гальм. Крім того, їхня низька щільність зменшує загальну вагу автомобіля, покращуючи характеристики.

Комерційна авіація також використовує композитні гальмівні диски вироблені з В-В композитів з 1980-х років. Такі літаки, як Airbus та Boeing, використовують ці вдосконалені гальмівні системи, щоб витримувати високоенергетичні посадки великих комерційних літаків. Переваги композитів включають їхню здатність ефективно функціонувати за екстремальних температур, знижену потребу в технічному обслуговуванні та довший термін служби порівняно з традиційними сталевими гальмівними механізмами. Однак, композитні гальмівні диски є дорогими у виробництві через складний процес виготовлення, що включає цикли піролізу та ущільнення. Крім того, вони потребують захисту від окислення, оскільки тривалий вплив повітря при високих температурах може призвести до деградації матеріалу. Щоб протидіяти цьому, виробники використовують покриття на основі смол або зовнішні шари на основі SiC для додаткової міцності.

Компоненти газових турбін

Газові турбіни, які широко використовуються в енергетиці та авіації, працюють за надзвичайно високих температур і швидкостей обертання. Компоненти турбіни, такі як колеса і лопатки, повинні витримувати ці умови, зберігаючи при цьому структурну цілісність. Традиційні металеві сплави, такі як супер сплави на основі нікелю, були домінуючим вибором для компонентів турбін. Однак ці матеріали мають обмеження щодо ваги та теплового розширення.

В-В композити були досліджені як потенційна альтернатива для лопаток і коліс турбін завдяки їхній високотемпературній міцності, низькій щільності та чудовій стійкості до термічних ударів. Заміна металевих компонентів на вуглепластикові композити дозволяє підвищити ефективність турбіни завдяки зменшенню ваги та кращій термічній стабільності. Однією з ключових проблем при використанні вуглецевих композитів для газових турбін є стійкість до окислення. На відміну від металевих сплавів, які можуть утворювати захисні оксидні шари, вуглецеві матеріали окислюються при підвищених температурах, що призводить до деградації матеріалу. Щоб пом'якшити цю проблему, дослідники розробили композити з карбиду кремнію, армованого вуглецевим волокном (C/SiC), які зберігають корисні властивості, водночас значно покращуючи стійкість до окислення.

Незважаючи на ці досягнення, широке застосування композитів на основі вуглецю в газових турбінах залишається обмеженим через високі виробничі витрати і проблеми з досягненням точних допусків на розміри, необхідних для лопаток турбін. Необхідні подальші дослідження для розробки економічно ефективних виробничих процесів і довговічніших захисних покриттів, щоб повною мірою використовувати вуглецеві композити в газових турбінах.

Камери рідинних ракетних двигунів

Ракетні двигуни потребують матеріалів, здатних витримувати екстремальні термічні та механічні навантаження, особливо в камері згоряння, де температура може перевищувати 3000 °C. Вибір матеріалів для цих камер суттєво впливає на ефективність, надійність і довговічність двигуна. Історично склалося так, що сплави на основі міді та нікелю використовувалися для камер згоряння завдяки їхній чудовій теплопровідності та міцності. Однак ці матеріали важкі і мають обмежену можливість повторного використання.

Композити були досліджені для використання в камерах рідинних ракетних двигунів завдяки їхнім винятковим високотемпературним характеристикам і легкій вазі. Індійська організація космічних досліджень (ISRO) успішно розробила сопла з композитних вуглецевих матеріалів для ракетних двигунів, замінивши традиційні металеві конструкції. Перехід на композитні сопла з вуглецевих матеріалів призвів до значного зменшення ваги, підвищення ефективності корисного навантаження.

Однак використання В-В композитів у камерах рідинних двигунів створює унікальні виклики. Матеріал повинен протистояти хімічній ерозії від високоактивних палив, таких як рідкий кисень і водень. Крім того, досягнення герметичної структури є складним завданням через притаманну В-В композитам пористість. Для вирішення цих проблем дослідники розробили методи інфільтрації, які вводять карбід кремнію або інші вогнетривкі матеріали в композитну матрицю,

підвищуючи як хімічну стійкість, так і механічну цілісність.

Незважаючи на ці досягнення, повномасштабне застосування композитів в ракетних двигунах залишається обмеженим через складність і вартість виробництва. Майбутні розробки в галузі обробки матеріалів і захисних покриттів визначатимуть доцільність використання композитів з вуглецевих матеріалів як стандартного матеріалу для камер ракетних двигунів.

Проблеми при обробці вуглець-вуглецевих композитів

Неоднорідність та анізотропія композитів спричиняють наявність пошкоджень в області, близькій до обробленого отвору. До небажаних дефектів, що спостерігаються, відносяться розрив волокон, концентрація напружень, термічні пошкодження, мікротріщини та розшарування [7]. Серед них розшарування, спричинене свердлінням, є особливою проблемою, яка може призвести до проблемою, яка може призвести до відбраковування (до 60 %) авіаційних компонентів літака, уражених таким дефектом [8].

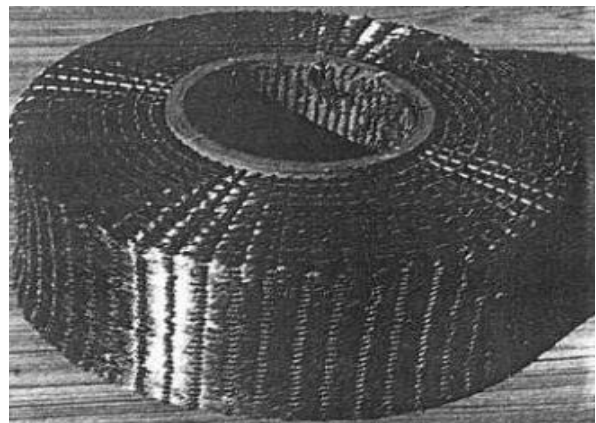


Рис 2. Необроблений В-В композит 3D структура [28]

Розшарування матеріалу

Розшарування матеріалу під час механічної обробки є критичною проблемою при обробці композитних матеріалів, особливо таких, як полімери, армовані вуглецевим волокном (CFRP) та інші системи з волокнистою матрицею. Розшарування – це відокремлення шарів у композитній структурі, часто спричинене механічними навантаженнями або термічним впливом під час обробки. Це явище порушує структурну цілісність і експлуатаційні характеристики матеріалу, створюючи значні проблеми для її використання.

При обробці композитних матеріалів такі процеси, як свердління, фрезерування та точіння, передбачають високошвидкісне різання. Ці операції спричиняють значні механічні навантаження на матеріал, який

по-різному взаємодіє з волокнами та матрицею через їхні різні механічні властивості. Анізотропна та гетерогенна природа композитів робить їх особливо чутливими до розшарування. Наприклад, під час свердління сила, що діє на ріжучий інструмент, може спричинити розшарування шарів композиту в точках входу або виходу, що призводить до пошкоджень, таких як витягування волокон, тріщини матриці та нерозрізані волокна. Ці пошкодження не тільки впливають на механічні властивості компонента, але й погіршують його естетичні та функціональні якості. Gaitonde та ін. [7], виявили що тенденція до розшарування, спричиненого свердлінням, зменшується зі збільшенням швидкості різання при свердлінні композитних матеріалів. Поєднання меншої швидкості подачі та меншого кута при вершині з більшою швидкістю різання для зменшення розшарування, спричиненого свердлінням, за допомогою спірального свердла K20.

В основі розшарування в процесах механічної обробки лежить кілька механізмів. Однією з основних причин є надмірна сила різання, що створюється ріжучим інструментом [9]. Коли інструмент проникає в матеріал, напруження стискання та розтягування на межі різання можуть перевищувати межу міцності на міжшаровий зсув композиту, що призводить до розшарування. У точці входу інструменту неоптимальна геометрія різання або високі швидкості подачі можуть спричинити розшарування за рахунок роздавлювання волокон, а не чистого зсуву. І також, на виході з інструменту недостатня жорсткість або надмірний знос інструменту може посилити розтягуючі напруження, що призводить до відшарування. На основі сили різання були створені предикатні математичні моделі для передбачення явища деламінації [10]–[11]. Термічні впливи, такі як локальне нагрівання, також сприяють розшаруванню, розм'якшуючи матеріал матриці, зменшуючи його міцність зв'язку з волокнами.

Конструкція ріжучого інструменту відіграє ключову роль у зменшенні розшарування. Удосконалення геометрії інструменту, наприклад, спеціалізовані свердла зі збільшеним переднім кутом, були розроблені для зменшення сили різання і поліпшення якості обробленої поверхні. Інструменти з покриттями, призначеними для протистояння зносу і тепловиділенню, також застосовуються для мінімізації негативних наслідків обробки. Різні методи охолодження та змащення показали свою ефективність у контролі термічних аспектів обробки, що зменшує ризик розшарування [12]. Однак оптимізація параметрів інструменту залишається складним завданням, оскільки взаємодія між швидкістю різання, швидкістю подачі та геометрією інструменту повинна бути ретельно збалансована, щоб досягти обробки без пошкоджень.

Деградація різального інструменту

Знос інструменту є критичним явищем в процесах механічної обробки, що суттєво впливає на ефек-

тивність, точність та економічність виробничих операцій. Знос інструменту, який визначається як поступова деградація ріжучого інструменту під час використання, виникає в результаті складної взаємодії між матеріалом інструменту, матеріалом заготовки і середовищем обробки. Цей процес відбувається під впливом механічних, термічних і хімічних факторів, які в сукупності руйнують поверхню інструменту, змінюють його геометрію і погіршують його ріжучі властивості [13].

Різання вуглець-вуглецевих композитів представляє значні труднощі через унікальні властивості цих матеріалів, які поєднують високу міцність, термостійкість і крихку вуглецеву матрицю. Знос інструменту є критичною проблемою при обробці цих композитів, оскільки абразивна природа вуглецевих волокон і теплопровідність матриці призводять до швидкої деградації ріжучого інструменту, що призводить до збільшення витрат і погіршення якості обробки.

Механізми зношування при обробці таких композитів в першу чергу обумовлені взаємодією між твердими вуглецевими волокнами і ріжучим інструментом. Вуглецеві волокна абразивні, що призводить до механічної ерозії поверхні інструменту. Цей знос посилюється крихкістю вуглецевої матриці, яка утворює абразивну стружку під час різання. Ця стружка збільшує тертя на межі інструмент-заготовка, прискорюючи знос і потенційно призводячи до виходу інструменту з ладу [14]. Неоднорідність В-В композитів ще більше ускладнює процес різання, оскільки варіації в орієнтації волокон і складі матриці створюють нерівномірний розподіл напружень на ріжучій кромці.

Термічні фактори також відіграють значну роль у зношуванні інструменту під час обробки вуглець-вуглецевих композитів. Висока теплопровідність вуглецевих волокон дозволяє швидко розсіювати тепло, але локальні температури на ріжучій кромці залишаються високими через тертя і деформацію. Ці теплові навантаження можуть призвести до окислення матеріалу інструменту, особливо в інструментах без покриття, де відсутній захисний шар. Окислення знижує твердість і зносостійкість інструменту, сприяючи прискореній деградації матеріалу ріжучої кромки [15].

Для зменшення зносу інструменту при обробці таких композитів були розроблені технології нанесення покриттів. Алмазні та алмазоподібні вуглецеві (DLC) покриття особливо ефективні завдяки своїй високій твердості і теплопровідності, які зменшують знос і покращують відведення тепла на межі різання. Однак адгезія цих покриттів має вирішальне значення, оскільки погана адгезія може призвести до відшарування і прямого зносу інструменту. Оптимізація товщини і способу нанесення покриттів має важливе значення для забезпечення різальних властивостей.

Геометрія інструменту також суттєво впливає на швидкість зношування. Ріжучі інструменти з оптимізованими переднім і заднім кутами можуть зменшити сили різання і тепловиділення, тим самим мінімізуючи

знос. Інструменти з більшими передніми кутами захоплюють механізми різання зсувом, які ефективніше видаляють матеріал з меншими зусиллями, ніж стиснення або дроблення. Використання ступінчастих свердел та інших спеціалізованих геометрій показало перспективність у зменшенні сил різання та мінімізації пошкоджень під час обробки, але ці конструкції повинні бути адаптовані до специфічних властивостей композитів для досягнення оптимальної продуктивності [16].

Параметри процесу, такі як швидкість різання, подача і глибина різання, також відіграють важливу роль у визначенні швидкості зносу інструментів. Високі швидкості різання збільшують термічні навантаження і окислювальний знос, в той час як високі швидкості подачі можуть створювати надмірні механічні навантаження, що призводять до викришування і руйнування інструменту. Ретельний вибір цих параметрів має важливе значення для забезпечення балансу між швидкістю зняття матеріалу та довговічністю інструменту. Дослідження показали, що нижчі швидкості різання в поєднанні з помірними подачами можуть зменшити прогресування зносу інструменту, хоча це впливає на продуктивність. Також варто зауважити, що деякі дослідження показали ефективність високих швидкостей різання та помірної швидкості подачі, тому подальше дослідження може бути актуальне. При збільшенні швидкості різання, коефіцієнт розшарування на виході з отвору збільшується, заявлено Давімом і Рейсом [17], зменшується Паланікумаром [18], або має параболічну залежність від цієї змінної (з точкою мінімуму) – Маркес та ін. [19].

Моніторинг та зменшення зносу інструменту важливі для підтримки продуктивності обробки та якості продукції. Сенсорні технології, такі як акустична емісія та інфрачервона термографія, дозволяють виявляти знос в режимі реального часу і дають інформацію про теплові та механічні умови на межі різання. Дані з цих датчиків можуть бути інтегровані в математичні моделі, що дозволяє динамічно регулювати параметри процесу для продовження терміну служби інструменту. Алгоритми машинного навчання також застосовуються для аналізу даних про знос і прогнозування виходу інструменту з ладу, пропонуючи проактивний підхід до управління зносом.

Незважаючи на ці досягнення, залишаються значні проблеми в розумінні та контролі зносу інструменту під час обробки вуглець-вуглецевих композитів. Складна взаємодія механічних, термічних і хімічних факторів вимагає міждисциплінарного підходу до проектування інструменту та оптимізації процесу. Крім того, впровадження нових композитних складів і технологій виготовлення вимагає постійної адаптації стратегій обробки для вирішення проблем, пов'язаних з еволюцією механізмів зношування.

Видалення стружки під час процесу різання

Проблема відводу стружки при різанні композитних матеріалів, зокрема вуглець-вуглецевих (В-В) ком-

позитів і полімерів, армованих вуглецевим волокном (CFRP), є одночасно технічно складною і критично важливою для забезпечення якості обробки та ефективності процесу. На формування стружки впливає анізотропна та гетерогенна природа цих композитів, що призводить до нерівномірного знімання матеріалу та складної морфології стружки. При обробці композитів утворення стружки в першу чергу визначається крихкістю вуглецевої матриці та міцними, абразивними вуглецевими волокнами [20]. Взаємодія між ріжучим інструментом і матеріалом часто призводить до утворення стружки, яка має різну форму, розмір і характеристики поверхні. Крихкий механізм руйнування, що переважає в В-В композитах, призводить до того, що стружка ламається, а не пластично деформується. Це суттєво відрізняється від металів, де стружка часто є суцільною та однорідною. Фрагментація стружки в композитах призводить до утворення дрібного сміття і частинок, які може бути складно зібрати і проаналізувати, що також перешкоджає дослідженню.

На тип стружки додатково впливає орієнтація волокон і послідовність укладання шарів у композиті. Дослідження показали, що, наприклад, у різноспрямованих композитах механізм утворення стружки змінюється залежно від орієнтації волокон. Стружка, утворена під кутом 0° , зазвичай демонструє характеристики вигину волокон, тоді як під кутами 45° або 90° утворення стружки переходить до режимів, в яких домінує зсув. Ці зміни не тільки впливають на розмір і форму стружки, але також впливають на зусилля, необхідні для видалення матеріалу, і потенціал розшарування або пошкодження поверхні.

Складність видалення стружки в композитах посилюється неправильними формами і розмірами стружки, які є результатом крихкого механізму руйнування вуглецевої матриці і абразивної природи вуглецевих волокон [21]. Дослідження показали, що видалення стружки є особливо складною задачею при свердлінні та фрезеруванні пазів, де обмежений простір перешкоджає видаленню фрагментів матеріалу. Високошвидкісна обробка, яка часто використовується з композитними матеріалами, загострює цю проблему, оскільки утворюється велика кількість дрібного сміття, яке необхідно швидко видаляти, щоб запобігти перегріванню та пошкодженню інструменту. Системи ЗОР і мастила, зазвичай застосовуються для полегшення видалення стружки, зменшення тертя і поліпшення потоку стружки. Однак їх ефективність може бути обмежена гідрофобними властивостями матеріалу та орієнтацією волокон.

Досягнення в дизайні інструментів і моніторингу процесу значно покращили відведення стружки при обробці композитів. Як і при обробці металів, застосовуються інструменти з оптимізованою геометрією для відведення стружки, а також покриття різального інструменту. Крім того, системи моніторингу в режимі реального часу з використанням датчиків акустичної емі-

сії та сили дозволяють виявляти скупчення стружки та засмічення, що дає змогу негайно вжити заходів для виправлення ситуації. Інновації, такі як кріогенне охолодження та вакуумні системи, також продемонстрували свою перспективність у покращенні евакуації стружки, особливо для високопродуктивних композитних матеріалів [22]. Ці технології не тільки підвищують ефективність видалення стружки, але й зменшують термічні та механічні навантаження на ріжучий інструмент, тим самим подовжуючи термін служби інструменту та підтримуючи якість обробки.

Очищення інструменту та відновлення до робочого стану

Накопичення сміття, залишків смоли та частинок матриці на ріжучому інструменті може погіршити його продуктивність, знизити точність різання та прискорити знос. Ефективні методи очищення не тільки підтримують ефективність інструменту, але й подовжують термін його служби, сприяючи загальній стійкості та економічній ефективності процесу.

Під час обробки В-В композитів і вуглепластиків термічні та механічні навантаження на межі різання часто призводять до відкладення смолистих матеріалів на поверхні інструменту. Це особливо помітно при високошвидкісній обробці, коли підвищені температури розм'якшують матрицю і викликають адгезію до інструменту. З часом ці відкладення можуть створити бар'єр, який знижує ефективність різання і збільшує тертя, що призводить до підвищення температури інструменту і швидкості зносу [23]. Для вирішення цієї проблеми застосовуються такі методи очищення, як ультразвукове очищення, хімічні ванни та абразивні системи очищення. Ці методи ефективно видаляють налиплі матеріали, не порушуючи цілісність інструменту, особливо для інструментів з покриттям або прецизійних інструментів.

Інновації в технології очищення ще більше підвищили ефективність обслуговування інструментів. Наприклад, лазерні системи очищення забезпечують точне видалення відкладень без фізичного контакту, зберігаючи геометрію і покриття ріжучих інструментів. Крім того, інтеграція процедур очищення в автоматизовані системи управління інструментами гарантує, що інструменти будуть очищені відразу після використання, що скорочує час простою і запобігає накопиченню пошкоджень від залишків. Такі практики особливо цінні при обробці сучасних композитних матеріалів, де підтримка стану поверхні інструменту має вирішальне значення для досягнення високої якості та точності обробки.

Корончаті свердла показали високі результати при обробці композитних матеріалів, а саме вони дозволяють отримати менший коефіцієнт деламінації та кращу шорсткість поверхні. Проте у разі свердління декількох отворів внутрішня порожниста геометрія інструменту може бути ускладнена зрізаними дисками

матеріалу заготовки. Це заважає інструменту працювати належним чином, викликаючи прогресуюче збільшення сили різання і величезне розшарування на виході з отвору. Щоб вирішити цю проблему, яка перешкоджає автоматизації процесу, Цао [24] розробив ступінчасте свердло, яке виконує процес свердління за два послідовних цикли.

Різання з використанням нежорстких різальних інструментів з абразивним покриттям

Математична модель різання вуглець-вуглецевого композиту

Згідно з [47], для дослідження В-В композитного матеріалу потрібно спочатку описати основний структурний елемент в системі, а саме комбінацію вуглецевого волокна, матриці і також пористість, або відсутність матеріалу.

Позначимо діаметр волокна через d_v , шар вуглецевого волокна через S_{pv} та пористість як S_{pp} . Виходячи з цього можна позначити шар заготовки як ряд індивідуальних волокон:

$$t_p = \frac{d_v}{2} + S_{pv} + S_{vv}.$$

Напругу в точці контакту волокна з абразивною частинкою, спричинену нормальною силою, можна визначити за допомогою формули Герца для контакту в точці:

$$\sigma_k = \frac{m P_z^{1/3} E^{2/3}}{r^{2/3}},$$

де коефіцієнт m можна визначити за формулою:

$$m = 1 + \left(\frac{r_1}{r_2} \right).$$

приведений модуль Юнга:

$$E = \frac{2E_1E_2}{E_1 + E_2},$$

та радіус кривої в площі контакту:

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}.$$

В цих рівняннях P_z – осьова сила, r_1 – радіус скруглення абразивної частинки, r_2 – радіус основного структурного елемента композиту.

Контактна напруга буде недостатньою для прямого різання армованого вуглецевого волокна, адже вона не перевищує міцність на розрив волокна. Проте в вуглецевій матриці, яка з'єднана з волокном, будуть виникати мікротріщини в площинах контакту. В результаті, поява шламу буде зумовлена мікрорізанням

вуглецевої матриці, а також відривом армуючих волокон, що спричинений малоцикловою втомою. У випадку свердління частоту взаємодії армованого волокна з абразивною частинкою можна визначити використовуючи наступну формулу:

$$\omega = \frac{\pi D}{\frac{d_v}{2} + s_{pp} + s_{pv}} n,$$

де, D – діаметр інструменту, n – швидкість обертання інструменту.

Для визначення напружень в околиці тріщини волокна під час процесу різання варто визначити коефіцієнт інтенсивності напружень. Також варто врахувати частоту збурення, що, згідно з [47], викликає напруження:

$$k = \sigma_k + \left(\frac{b-l}{b} \right) \frac{3M_f}{2b^2} \cos \omega_t \sqrt{\pi a},$$

де, σ_k – контактне напруження визначене раніше, a – половина довжини тріщини, M_f – імпульс збурення, b, l – геометричні параметри мікротріщини. Далі, зважаючи на закономірності про зняття пружних деформацій і виходячи з даних [45] та [46] можна визначити максимальну довжину тріщини після певної кількості циклів:

$$a_c = \frac{a_0}{\sqrt[{\frac{n}{2}-1}]{1 - \frac{\pi C D n t}{\left(\frac{d_v}{2} + s_{pp} + s_{pv} \right) K}}},$$

C можна визначити за формулою:

$$C = a_0^{\frac{n}{2}-1} \left(\frac{\sigma}{\rho} \right)^n \left(\frac{\rho}{c} \right),$$

K можна визначити за формулою:

$$K = \frac{1}{\sqrt{\pi} \left(\frac{n}{2} - 1 \right)},$$

де a_0 – початкова довжина тріщини, ρ – густина матеріалу, n, c – константи матеріалу; σ – мікронапруження у вершині тріщини. Відповідно до формул, можна очікувати, що частки матеріалу будуть відділені від заготовки при досягненні достатніх напружень. При цьому розмір таких часток буде досягати довжини тріщини a_c .

Такі частинки пилу та шламу будуть відведені від робочої зони або опиняться в матеріалі заготовки або на різальному інструменті, що позначено в наступній формулі:

$$W_s = W_p + W_r + W_i.$$

Наступні сили діють на частинки в зоні різання:

P – сила тяжіння;

F_a – сила опору повітря;

F_v – відцентрова сила;

F_z – сила контактної взаємодії (адгезії);

F_t – сила тертя;

N – сила реакції опори.

Сила опору повітря може бути визначена використовуючи формулу з [46]:

$$F_a = \rho c S \frac{u^2}{2} + \rho_c \frac{\pi r^2}{2} u \frac{du}{dz},$$

де c – коефіцієнт лобового опору, ρ – густина повітря, ρ_c – густина частинки матеріалу, S – площа поперечного перерізу частинки, r – радіус частинки, u – середня швидкість, du/dz – градієнт швидкості по осі Z .

Сила адгезії може бути визначена за формулою:

$$F_z = 2.4 \cdot 10^{-7} r.$$

Відцентрова сила може бути визначена за формулою, враховуючи радіус шляху частинки R_i (залежить від розміру різального інструменту)

$$F_v = m \omega^2 R_i.$$

Сила тертя може бути визначена використовуючи коефіцієнт тертя ковзання та силу реакції опори. Ці сили можуть бути визначені, якщо частинка буде мати певний вектор швидкості направлений по дотичній до абразивних зерен. У випадку, якщо інструмент буде здійснювати зворотньо поступальний рух, разом з обертальним, відповідно до закону збереження імпульсу можна визначити вертикальну силу F_u :

$$F_u = \frac{mv}{t}.$$

Далі, відповідно до принципу д'Аламбера – Лагранжа можна скласти рівняння руху частинок пилу, утворених внаслідок процесу різання по двох осях r та z .

$$m_p \frac{d^2 r}{dt^2} = \sum F_{ri}, \quad m_p \frac{d^2 z}{dt^2} = \sum F_{zi}.$$

Відповідно рівняння руху по осі OR , OZ та рівняння потоку Куетта виглядає наступним чином, якщо підставити в попереднє рівняння сили та масу частинки з урахуванням об'єму та густини:

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \rho \frac{d^2 r}{dt^2} = m \omega^2 R_i - 2.4 \cdot 10^{-7} r - \mu_p mg - \left(\rho c S \frac{u^2}{2} + \rho_c \frac{\pi r^2}{2} u \frac{du}{dz} \right),$$

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \rho \frac{d^2 z}{dt^2} = \frac{mv \cdot \cos(wt)}{t} - m \omega^2 R_i - 2.4 \cdot 10^{-7} r - mg - \left(\rho c S \frac{u^2}{2} + \rho_c \frac{\pi r^2}{2} u \frac{du}{dz} \right),$$

$$\mu \frac{d^2 u_r}{dz^2} - c_1 = 0.$$

Наступним важливим аспектом в моделюванні різального процесу є виділення температури та відведення зайвого тепла. Робота, виконана сторонніми силами (силою подачі та силою різання) буде розподілена між роботою по руйнуванню композитної структури в процесі різання, а також роботою на подолання сили тертя, яка буде повністю перетворена в тепло.

$$q = fpv,$$

де f – коефіцієнт тертя, p – тиск.

Для визначення часу виділення тепла необхідно визначити довжину контакту різального інструменту з волоком. Позначимо глибину уже обробленого шару волокна через ψ , відповідно довжину контакту можна визначити за формулою:

$$l_k = 2\sqrt{r_2^2 - (r_2 - \psi)^2}.$$

Диференціальне рівняння теплопровідності від простору і часу в стаціонарному середовищі, в якому не відбувається конвекція або випромінювання:

$$\frac{d^2 t}{dx^2} + \frac{d^2 t}{dy^2} + \frac{d^2 t}{dz^2} + q = \frac{1}{\partial} \frac{\partial T}{\partial t}.$$

Відповідно зміна температури для тіла після певного проміжку часу буде виглядати наступним чином:

$$dT(x, y, z) = \frac{\delta q}{\rho C (4\pi\alpha(t-t'))^{\frac{3}{2}}} \times \left[-\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}{4\alpha(t-t')} \right].$$

При цьому сталу температуру тіла в точці можна знайти за формулою, якщо вважати, що джерело тепла постійне:

$$T(x, y, z) = \frac{P}{4\pi k \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}}.$$

Якщо врахувати пульсацію джерела випромінювання тепла, відповідно до [47], можна отримати наступну залежність в одному вимірі:

$$T(z, t) = \frac{2Aq_0\sqrt{a_T}}{\lambda_T} \times \left[\sqrt{t}\Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{a_T t}}\right) - \sqrt{t-\tau}\Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{a_T(t-\tau)}}\right) \right].$$

Повертаючись до рівняння залежності виділених частинок шламів під час різання можна визначити весь об'єм виділеного матеріалу:

$$W_s = f(t) = \left[\frac{R_1^2(a - \sin(a))}{4} + vt \right] l\vartheta,$$

де a – кут, на який обернувся різальний інструмент, ϑ – густина матеріалу.

Відповідно до [47], об'ємна концентрація частинок шламів з радіусом r_s в порожнині між різальним інструментом і заготовкою з врахуванням новоутворених частинок буде дорівнювати:

$$K_i = \frac{\left[\frac{\pi(D_z - D_v)n}{l_k} \right] \omega_s \tau - W_r - W_i(T)}{4 \left[\frac{\pi(D_z^2 - D_v^2)}{4} \left(l_p + \frac{A}{2} \right) - \eta \frac{4\pi r_a^3}{9} \right] + \sin \omega t \left[\pi D_z A M(l_p) - \eta \frac{4\pi r_a^3}{9} \right]}$$

Відповідно до [48] контакт різального інструменту та заготовки при свердлінні можна описати диференціальними рівняннями:

$$\begin{aligned} m_k \frac{d^2 x_k}{dt^2} - b_k \frac{dx_k}{dt} - c_1 x_k &= P; \\ m_d \frac{d^2 x_d}{dt^2} - b_d \frac{dx_d}{dt} - c_2 x_d &= -R_x; \\ m_k \frac{d^2 y_k}{dt^2} - b_k \frac{dy_k}{dt} - c_3 y_k &= \sigma_k f_k; \\ m_d \frac{d^2 y_d}{dt^2} + b_d \frac{dy_d}{dt} + c_4 y_d &= R_y; \end{aligned}$$

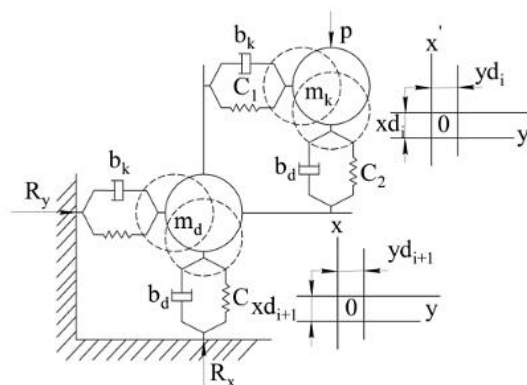


Рис 3. [48] Схема шару волокон у композиті

Експериментальні результати різання композитного матеріалу нежорстким абразивним інструментом.

Подібно до шліфування, суть канатного різання полягає в тому, що велика кількість абразивних частинок на поверхні основи пилки знімають матеріал за рахунок ковзання, оранки та дроблення під дією абразивних частинок. Формули сили різання пластини та термічних напружень, наведені в роботі [25],

показують, що форма частинок і щільність розподілу мають важливий вплив на знімання матеріалу, і на сили різання і теплового напруження. За допомогою аналізу можна побачити, що форма і характеристики розподілу абразивних частинок також мають важливий вплив на якість різання поверхні заготовки. Тому морфологічні характеристики канатної пилки, такі як розмір абразивних частинок, висота та щільність, безпосередньо впливають на швидкість зняття матеріалу та якість поверхні.

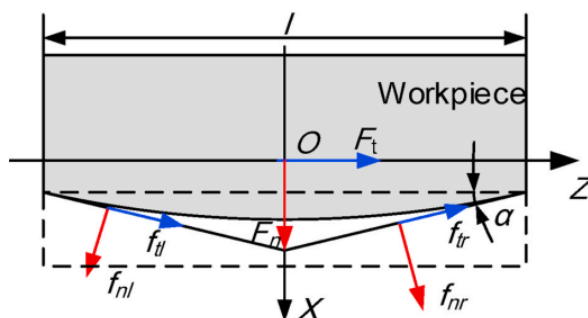


Рис. 4. Спрощена модель різання [26]

Один з проведених експериментів, демонструє вплив зміни подачі та швидкості різання на сили різання:

Таблиця 4. Результати дослідження сили різання

№	Швидкість різання, м/с	Швидкість подачі, мм/с	Нормальна сила	Тангенціальна сила
1	0.5	0.5	2.6155	1.3548
2	1.0	0.5	1.8657	0.9636
3	1.5	0.5	1.3779	0.6853
4	1.0	0.75	2.3296	1.1878
5	1.0	1.0	2.8890	1.4044

Відповідно до експериментів проведених в дослідженні [26], можна бачити, що сили різання можуть мати зворотню залежність до швидкості різання при однаковій подачі, що дає можливість розглянути різні режими різання, які будуть мінімізувати вплив на інструмент, а відповідно і довговічність.

Схожі результати були продемонстровані в інших експериментах [27], які досліджували такі параметри, як орієнтація волокон композиту під час різання, а також щільність абразиву, який розташований на різальному інструменті. В цьому дослідженні було виявлено, що сила подачі дещо зростає, якщо орієнтація волокон змінюється від $\theta = 0^\circ$ до $\theta = 30^\circ$, але згодом знову зменшується, якщо орієнтація волокон $\theta = 60^\circ$ і $\theta = 90^\circ$. Для сили різання, однак, спостерігається подібна тенденція, менш виразна порівняно з силою подачі, якщо

брати до уваги екстремальні значення. Вплив щільності зерна, яка продемонстрована на рис. 1, на обидві складові сили майже несуттєвий. На противагу цьому, швидкість подачі визначена як важливий фактор оскільки як сила різання, так і сила подачі значно зростають при збільшенні швидкості подачі від 100 мм/хв до 200 мм/хв.

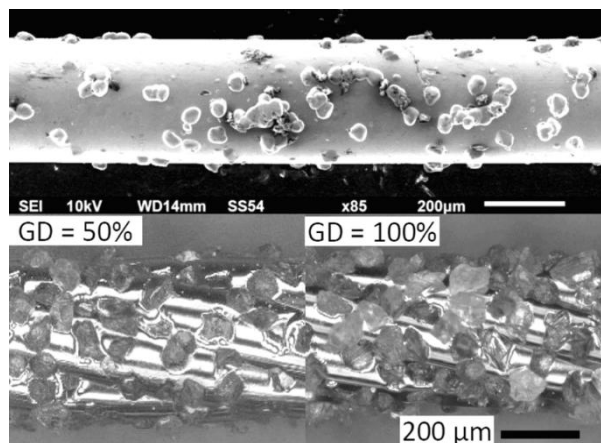


Рис. 5. Зверху: звичайний різальний інструмент для обробки кремнію. Знизу: використаний різальний інструмент для обробки композиту [27]

Для $\theta = 0^\circ$, збільшення швидкості різання з $v_c = 25$ м/с до $v_c = 50$ м/с призводить до загального зменшення сил процесу, а також його коливань. Для зміни товщини матеріалу спостерігається майже лінійна тенденція, де сили різання і подачі зростають зі збільшенням товщини матеріалу.

Виявлено, що на температуру в основному впливає орієнтація волокон, швидкість подачі і різання, а також товщина матеріалу, тоді як вплив щільності зерен майже несуттєвий. Температура поверхні зростає при зміні орієнтації волокон від $\theta = 0^\circ$ до $\theta = 30^\circ$ і $\theta = 60^\circ$. При збільшенні швидкості подачі залежність температури від орієнтації волокон зберігається, але абсолютні значення є вищими. Починаючи з $\theta = 60^\circ$, значення температури знову дещо знижуються при подальшому збільшенні орієнтації волокон до $\theta = 90^\circ$. Збільшення швидкості різання або товщини матеріалу призводить до підвищення температури поверхні для $\theta = 0^\circ$.

Виготовлення абразивних інструментів з використанням адитивних технологій

Огляд сучасних дослідницьких робіт свідчить про зростаюче значення технології адитивного виробництва в області абразивної обробки, головним чином у виробництві прототипів конструкцій шліфувальних кругів, а також інструментів, що використовуються при притиранні та поліруванні. У виробництві шліфу-

вальних кругів успішно застосовуються методи адитивного виробництва на основі металів, такі як DMLS (пряме лазерне спікання металів) і SLM (селективне лазерне плавлення), представлені порошковим плавленням, наприклад, у виробництві шліфувальних кругів.

Абразивні інструменти на металевій зв'язці

Як показано в [29], [30], методи 3D-друку на основі металів, такі як процес SLM, були успішно використані для виготовлення алмазних інструментів на металевій зв'язці. Рівномірний розподіл зерен може покращити шорсткість оброблених поверхонь, стійкість інструменту та ефективність шліфування. Застосування покрокового виробництва дозволяє контролювати розподіл абразивних зерен в декількох шарах і в трьох вимірах, як показано Yang et al. в роботі [31]. Автори розробили метод, заснований на технології адитивного виробництва, використовуючи лазерний верстат з ЧПК для виробництва торцевих алмазних кругів з рівномірно розміщеними алмазними зернами в металевій матриці. Експерименти зі шліфування підтвердили придатність друкованих інструментів, що характеризуються зносом, характерним для кругів з надтвердим абразивом. Мікро- та макророзриви зерен створюють нові ріжучі кромки, що покращують ефективність шліфування. Лазерне наплавлення – ще один успішно впроваджений метод виготовлення текстурованих шліфувальних кругів з CBN/CuSnTi, що дозволяє знизити зусилля шліфування і температуру в порівнянні з гальванічними шліфувальними кругами [32].

Денкена та ін. [33] використовували метод лазерного плавлення порошкового шару (LPBF) для виготовлення алмазних композитів NiTi. Хоча LPBF є технікою для широкого спектру металевих порошків, ці типи зразків для використання в якості шліфувальних інструментів були виготовлені вперше. Їх придатність була доведена в ході випробувань, які підтвердили, що алмазні зерна були міцно вбудовані в зв'язку. Автори дійшли висновку, що процес LPBF можна класифікувати як придатний для виробництва абразивних інструментів для шліфування матеріалів з карбиду вольфраму. Іншим важливим напрямком для подальших досліджень кругів на металевій зв'язці, на який вказують автори, є те, що параметри процесу LPBF для чистих металів не можуть бути повністю перенесені на метало-алмазні композити, які характеризуються меншою густиною енергії, необхідної для виготовлення зразків.

Алмазні сегменти леза з трьохвимірною решіткою алмазних зерен були виготовлені адитивним способом в обсязі 216 000 шт./місяць на новому типі обладнання адитивного виробництва з обертовою робочою платформою [34]. Для забезпечення повторюваного розташування алмазної крихти в певних напрямках використовували голчастий притиск з внутрішніми отворами і від'ємним тиском, а не змішуванням порошку. Інструмент, що містить адитивно виготовлені алмазні

сегменти, продемонстрував кращу продуктивність шліфування порівняно зі звичайними лезами рівної товщини з випадково розподіленими алмазними зернами при однаковій концентрації зерен. Крім того, спостерігалися характеристики самозагострювання завдяки новим ріжучим кромкам, що з'являються під час різання.

Вищезгадані методи мають багато переваг щодо ефективності шліфування, але якість поверхні не була детально вивчена авторами. Під час цих лазерних методів виготовлення контролювали необхідну текстуру доданих зв'язуючих шарів і визначене трьохвимірне розташування надтвердих абразивів. Тим не менш, неможливо було контролювати внутрішню структуру інструментів, оскільки пористі шліфувальні круги на металевій зв'язці мають ряд переваг у порівнянні з інструментами на щільній металевій зв'язці. Інші методи адитивного виробництва на основі металів широко використовуються для виготовлення пористих інструментів, як описано в роботах [35]–[37]. Характерні пори в шліфувальному крузі призводять до збільшення простору для транспортування мастила, ЗОР і стружки. Технології адитивного виробництва можуть зменшити кількість дефектів і можуть бути більш ефективними в контролі кінцевої пористості і мікроструктури в порівнянні з традиційними методами виготовлення шліфувальних кругів.

Також спосіб отримання абразивного інструменту з передбачуваним розподілом зерен був описаний у [34]. Інструмент отримували за допомогою нової адитивної технології на спеціальному устаткуванні AME100 із ротаційною платформою та 16 формувальними станціями. В процесі виробництва використовували спеціальний голчастий пристрій з отворами та вакуумною системою для точного розміщення алмазних зерен у металевому порошку шарами. Контроль заповнення проводився автоматично через систему машинного зору, що фотографує знизу і аналізує заповненість отворів. Це дозволяло формувати 3D-решітку алмазних зерен у сегментах без суттєвих дефектів.

Продуктивність нового методу значно перевищувала традиційні технології: AME100 здатен виробляти щонайменше 216 000 зелених сегментів на місяць із п'яти шарів упорядкованих зерен – це приблизно удвічі більше, ніж у найкращого попереднього обладнання (KPV300). Заповнення алмазних зерен у сегменті становило понад 95 %, а точність розміщення – 98 %. Завдяки використанню машинного зору та спеціальної конструкції пристрою досягнуто стабільну якість продукції без зниження швидкості виробництва.

Структурний аналіз сегментів показав рівномірне розміщення зерен як у площині, так і в об'ємі сегмента. Алмазні зерна були добре закріплені у металевій зв'язуючій основі, а після випробувань на різанні каменю й армованого бетону виявлено, що сегменти демонструють чудову самооновлюваність ріжучої кромки. Це забезпечувало як високу продуктивність різання, так і довговічність інструменту, що перевершувало

характеристики інструментів, отриманих іншими методами, наприклад, бразуванням.

У випробуваннях алмазні леза з сегментами, виготовленими методом AME100, показали удвічі більшу кількість прорізаного каменю при тій самій концентрації зерен порівняно зі звичайними лезами. При сухому різанні армованого бетону швидкість різання була на 10 % вищою, ніж у аналогічних інструментів ARIX, а при вологому різанні термін служби подвоювався. Таким чином, нова технологія дозволила досягти істотного підвищення як продуктивності виробництва, так і експлуатаційних характеристик інструменту.

Абразивні інструменти на синтетичній зв'язці

Технології адитивного виробництва були ефективно використані у виробництві шліфувальних кругів на основі смоли. Qui і Huang [38] виготовили інструменти з трьохвимірним контрольованим розташуванням абразиву, використовуючи розроблене обладнання для стереолітографії (SLA), засноване на технології адитивного виробництва. Як і для шліфувальних кругів на металевій зв'язці з рівномірним розподілом зерен, круги, виготовлені методом SLA з рівномірним розподілом абразиву, ефективніше знімають матеріал порівняно з кругами з хаотичним розташуванням абразиву. Крім того, рівномірність траєкторій шліфування можна оптимізувати на етапі проектування інструменту, визначивши необхідне просторове розташування абразиву.

Іншим прикладом є виробництво абразивних інструментів у вигляді шліфувальних [39] і притиральних кругів [40], [41] з УФ-отверджувальних смол. У цьому методі УФ-отверджувальна смола і алмазні абразиви змішуються за допомогою мішалки і наносяться на верхню поверхню пластини з подальшим УФ-отверджуванням. Одночасно, як показано в роботі [42], рідку суміш можна наносити безпосередньо на підкладку або впорскувати в окрему форму. Порівняно з традиційним процесом спікання, цей метод виготовлення інструментів на основі смоли дозволяє економити енергію, а також трудовитрати. Сьогодні алмазні абразивні інструменти, виготовлені таким методом, широко застосовуються для прецизійного шліфування або притирання твердих і крихких матеріалів, таких як технічна кераміка. Застосування таких притиральних пластин, що містять алмазні абразивні зерна, при обробці керамічних матеріалів дозволило отримати більш низьке середнє значення параметра шорсткості Ra [42] і більш високу продуктивність знімання матеріалу [43] в порівнянні з традиційним процесом притирання чавунною пластиною на основі суспензії.

Експериментальні результати, представлені в роботі [42], показали значне поліпшення шорсткості поверхні та зменшення швидкості знімання матеріалу під час притирання керамічної заготовки з використанням інструменту на основі смоли. У порівнянні з притиранням залізною пластиною було досягнуто приблизно на

10 % меншої шорсткості поверхні. Одночасно спостерігалось приблизно на 25 % менше матеріалу, що знімається за хвилину з керамічної заготовки. Хоча автори вищезгаданих досліджень не використовували термін “адитивне виробництво”, явище фотополімеризації смол використовується в декількох методах 3D-друку, включаючи стереолітографію SLA. Шліфувальні та притиральні круги з алмазною зв'язкою на основі абразивної суміші смол і полірувальні диски, виготовлені за допомогою процесів на основі SLA, досліджувалися в роботах [39], [44]. SLA, як одна з основних і широко визнаних технологій 3D-друку, заснована на селективному пошаровому затвердінні полімерної смоли за допомогою УФ-лазерного променя. Танака та Ісоно [39] звернули увагу на вплив часу дії ультрафіолету на глибину та ширину затверділої смоли. Було виявлено, що лише 5–10 с експозиції достатньо для отримання невеликої ділянки інструменту для прототипування.

Висновки

Дослідження показало, що вуглець-вуглецеві композитні матеріали знайшли своє застосування в різних галузях, завдяки своїм механічним та експлуатаційним характеристикам. Висока міцність, низький коефіцієнт теплового розширення та стійкість до теплових ударів дозволяє застосовувати цей матеріал в аерокосмічній галузі. Завдяки використанню волокон різного походження та зміни процесу інфільтрації вуглецевої матриці можна отримати матеріали з необхідними характеристиками для того чи іншого сценарію застосування.

Згідно з другим розділом, обробка вуглець-вуглецевих (В-В) композитів та полімерів, армованих вуглецевим волокном (CFRP), представляє унікальні виклики через їх анізотропні, крихкі та абразивні властивості. Такі проблеми, як знос інструменту, стружкоутворення, відведення стружки та очищення інструменту є ключовими для підтримки ефективності обробки, довговічності інструменту та якості деталей. Знос інструменту, спричинений механічним впливом, тепловими навантаженнями та хімічними реакціями, посилюється високою твердістю вуглецевих волокон та крихкістю матриці.

Огляд математичної моделі різання вуглець-вуглецевих композитів показав залежність утворення тріщин в матеріалі та виділення частинок пилу від розподілу та розміру абразивних частинок. Також площа контактного шару буде залежати від радіуса скруглення абразивної частинки, а відповідно і температура в точці контакту.

Важливим фактором, який може покращити відведення стружки, зменшити температури різання та подовжити строк служби інструменту є розташування абразивних зерен на різальному інструменті. Як було зазначено в розділі 4, різальні інструменти з рівномір-

ним розташуванням зерен показали кращі результати порівняно з випадковим розподілом. Використовуючи технології адитивного виробництва можливо отримати різальний інструмент з довільним розташуванням зерен, а тому можлива оптимізація різального інструменту для того чи іншого режиму різання чи матеріалу

Виходячи з попередніх фактів можна стверджувати, що обробка В-В композитів є актуальним завданням, яке потребує подальшого дослідження, оскільки цей процес має ряд проблем, таких як високі температури різання, виведення стружки та деградація різального інструменту. Завданням подальших досліджень в цій темі є моделювання процесу різання композитного матеріалу та процесу видалення матеріалу, що дозволить визначити навантаження на інструмент та фактори, які впливають на нього. Для забезпечення високої точності розрахунків необхідно сформувати інтегровану обчислювальну схему, яка включатиме кінематичний, силовий, компоненти, а також компоненти, які

враховують модель зняття матеріалу та деградацію інструменту. Такий підхід, з урахуванням геометрії інструменту та режимів різання, створює основу для подальшої експериментальної оптимізації параметрів інструментального оснащення.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що вони не мають жодного конфлікту інтересів щодо цього дослідження, включаючи фінансові, особисті, авторські або будь-якого іншого характеру, які могли б вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні даної роботи

References

- [1] J.-D. Nam and J. C. Seferis, "Volatile evolution in thermoset composites from processing to degradation," *Science and Engineering of Composite Materials*, vol. 2, no. 3, pp. 211–225, 1993, doi: <https://doi.org/10.1515/SECM.1993.2.3.211>.
- [2] L. M. Manocha, "High performance carbon-carbon composites" *Sādhanā*, 2003, doi: <https://doi.org/10.1007/BF02717143>.
- [3] F. Torres-Herrador, A. Eschenbacher, J. Coheur, J. Blondeau, T. E. Magin, and K. M. Van Geem, "Decomposition of carbon/phenolic composites for aerospace heatshields: Detailed speciation of phenolic resin pyrolysis products," *Aerospace Science and Technology*, vol. 119, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.107079>.
- [4] F. Torres-Herrador, J. Coheur, F. Panerai, T. E. Magin, M. Arnst, N. N. Mansour et al., "Competitive kinetic model for the pyrolysis of the phenolic impregnated carbon ablator," *Aerospace Science and Technology*, vol. 100, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.105784>.
- [5] T.-H. Ko, "The effect of pyrolysis on the mechanical properties and microstructure of carbon fiber-reinforced and stabilized fiber-reinforced phenolic resins for carbon/carbon composites," *Polymer Composites*, vol. 14, 1993, doi: <https://doi.org/10.1002/pc.750140310>.
- [6] F. Muhammed, T. Lavaggi, L. Moretti, S. Advani, and J. W. Gillespie, "Pyrolysis schedule optimization of benzoxazine-derived carbon/carbon composites through reaction rate optimization," *Ceramics International*, vol. 49, pp. 19 996–20 006, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.03.121>.
- [7] V. N. Gaitonde, S. R. Karnik, J. Campos Rubio, A. Esteves Correia, A. M. Abrao, and J. P. Davim, "Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 203, pp. 431–438, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.10.050>.
- [8] D. F. Liu, Y. J. Tang, and W. L. Cong, "A review of mechanical drilling for composite laminates," *Composite Structures*, vol. 94, pp. 1265–1279, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.11.024>.
- [9] C. C. Tsao and H. Hocheng, "Effect of tool wear on delamination in drilling composite materials," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 49, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2007.01.001>.
- [10] N. Feito, Á. Muñoz-Sánchez, A. Díaz-Alvarez, and M. H. Miguelez, "Multi-objective optimization analysis of cutting parameters when drilling composite materials with special geometry drills," *Composite Structures*, vol. 225, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111187>.
- [11] N. Feito, J. Lopez-Puente, C. Santiuste, and M. H. Miguelez, "Numerical prediction of delamination in CFRP drilling," *Composite Structures*, vol. 108, pp. 667–683, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.10.014>.
- [12] N. Sugita, L. Shu, K. Kimura, G. Arai, and K. Arai, "Dedicated drill design for reduction in burr and delamination during the drilling of composite materials," *CIRP Annals*, vol. 68, pp. 89–92, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.094>.
- [13] X. Wang, P. Y. Kwon, C. Sturtevant, D. Kim, and J. Lantrip, "Comparative tool wear study based on drilling experiments on CFRP/Ti stack and its individual layers," *Wear*, vol. 317, no. 1, pp. 265–276, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.05.007>.
- [14] R. Kang, H. Ma, Z. Wang, Z. Dong, and Y. Bao, "Effect of tool wear on machining quality in milling Cf/SiC composites with PCD tool," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 105, pp. 370–385, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.08.055>.
- [15] T. Xia, Y. Kaynak, C. Arvin, and I. S. Jawahir, "Cryogenic cooling-induced process performance and surface integrity in drilling CFRP composite material," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7284-y>.

- [16] C. Kuo, J. H. Liu, T. Chang, and S. K. Ko, "The effects of cutting conditions and tool geometry on mechanics, tool wear and machined surface integrity when routing CFRP composites," *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.01.011>.
- [17] J. P. Davim and P. Reis, "Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave—experimental and statistical study," *Materials & Design*, 2003, doi: [https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(03\)00062-1](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(03)00062-1).
- [18] K. Palanikumar, "Experimental investigation and optimisation in drilling of GFRP composites," *Measurement*, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2011.07.023>.
- [19] A. T. Marques, L. M. Durão, A. G. Magalhães, J. F. Silva, and J. M. R. S. Tavares, "Delamination analysis of carbon fibre reinforced laminates: Evaluation of a special step drill," *Composite Science and Technology*, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2009.01.025>.
- [20] Q. An, W. Ming, X. Cai, and M. Chen, "Study on the cutting mechanics characteristics of high-strength UD-CFRP laminates based on orthogonal cutting method," *Composite Structures*, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.05.035>.
- [21] Y. Su, Z. Jia, B. Niu, and G. Bi, "Size effect of depth of cut on chip formation mechanism in machining of CFRP," *Composite Structures*, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.11.044>.
- [22] T. Xia, Y. Kaynak, C. Arvin, and I. S. Jawahir, "Cryogenic cooling-induced process performance and surface integrity in drilling CFRP composite material," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7284-y>.
- [23] A. Koplev, A. Lystrup, and T. Vorm, "The cutting process, chips, and cutting forces in machining CFRP," *Composites*, 1983, doi: [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(83\)90157-X](https://doi.org/10.1016/0010-4361(83)90157-X).
- [24] C. C. Tsao, "Experimental study of drilling composite materials with step-core drill," *Materials & Design*, 2008.
- [25] Z. Li, P. Ge, W. Bi et al., "Coupling stress caused by thermal and slicing force in KDP crystal slicing with fixed abrasive wire saw," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 96, pp. 4333–4343, 2018, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1893-1>.
- [26] A. Tang, W. Guo, Z. Yuan, and G. Yang, "Simulation analysis on cutting forces based on surface topography of fixed abrasive wire saw," *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 132, 2021, Art. no. 105900, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2021.105900>.
- [27] "China carbon fiber brake disc & rotor kit for Airbus A320/A321/A330/A350 & Boeing 737/747," Made-in-China. [Online]. Available: <https://qdclipper.en.made-in-china.com/product/TZqatfGAqwYi/China-Carbon-Fiber-Brake-Disc-Brake-Rotor-Kit-for-Airbus-A320-Plane-A321-A330-A350-Boeing-737-747.html>
- [28] "Study on formability, mechanical property and finite element modeling of 3D-printed composite for metal-bonded diamond grinding wheel application," CORE. [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/333721099.pdf>
- [29] C. Tian, X. Li, Z. Chen, G. Guo, L. Wang, and Y. Rong, "Study on formability, mechanical property and finite element modeling of 3D-printed composite for metal-bonded diamond grinding wheel application," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 54, pp. 38–47, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.02.028>.
- [30] J. Gan, H. Gao, S. Wen, Y. Zhou, S. Tan, and L. Duan, "Simulation, forming process and mechanical property of Cu-Sn-Ti/diamond composites fabricated by selective laser melting," *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 87, Art. no. 105144, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2019.105144>.
- [31] Z. Yang, M. Zhang, Z. Zhang, A. Liu, R. Y. Yang, and S. Liu, "A study on diamond grinding wheels with regular grain distribution using additive manufacturing (AM) technology," *Materials & Design*, vol. 104, pp. 292–297, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.04.104>.
- [32] X. Zhao, T. Yu, C. Jia, S. Lu, L. Chen, and W. Wang, "Study on textured CBN grinding wheel by laser cladding," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 106, pp. 865–876, 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04240-w>.
- [33] B. Denkena, A. Krödel, J. Harmes, F. Kempf, T. Griemsmann, C. Hoff, J. Hermsdorf, and S. Kaierle, "Additive manufacturing of metal-bonded grinding tools," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 107, pp. 2387–2395, 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05199-9>.
- [34] B. Chen, P. Chen, Y. Huang, X. Xu, Y. Liu, and S. Wang, "Blade segment with a 3D lattice of diamond grits fabricated via an additive manufacturing process," *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 33, no. 1, 2020, doi: <https://doi.org/10.1186/s10033-020-00496-6>.
- [35] C. Tian, X. Li, S. Zhang, G. Guo, L. Wang, and Y. Rong, "Study on design and performance of metal-bonded diamond grinding wheels fabricated by selective laser melting (SLM)," *Materials & Design*, vol. 156, pp. 52–61, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.06.029>.
- [36] C. Tian, X. Li, S. Zhang, G. Guo, S. Ziegler, J. H. Schleifenbaum, L. Wang, and Y. Rong, "Porous structure design and fabrication of metal-bonded diamond grinding wheel based on selective laser melting (SLM)," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 100, pp. 1451–1462, 2019, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2734-y>.
- [37] C. Tian, X. Li, H. Li, G. Guo, L. Wang, and Y. Rong, "The effect of porosity on the mechanical property of metal-bonded diamond grinding wheel fabricated by selective laser melting (SLM)," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 743, pp. 697–706, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.11.138>.
- [38] Y. Qiu and H. Huang, "Research on the fabrication and grinding performance of 3-dimensional controllable abrasive arrangement wheels," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 104, pp. 1839–1853, 2019, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03900-1>.

- [39] T. Tanaka and Y. Isono, "New development of a grinding wheel with resin cured by ultraviolet light," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 113, pp. 385–391, 2001, doi: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00636-7](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00636-7).
- [40] Q. Huang, L. Guo, and I. D. Marinescu, "Grind/lap of ceramics with UV-bonded diamond wheels," in *Handbook of Ceramics Grinding and Polishing*, 2nd ed., Norwich, NY, USA: William Andrew, 2015, pp. 360–393, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-7858-4.00010-8>.
- [41] I. Marinescu, L. Guo, and P. Wei, "Basic research for the UV fixed abrasive lapping plate," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 371, pp. 95–100, 2013, <https://www.scientific.net/AMM.371.95>.
- [42] L. Guo, X. Zhang, S. Chen, and J. Hui, "An experimental study on the precision abrasive machining process of hard and brittle materials with ultraviolet-resin bond diamond abrasive tools," *Materials*, vol. 12, no. 1, 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/ma12010125>.
- [43] L. Guo, X. Zhang, C. H. Lee, I. D. Marinescu, Y. Zhang, and J. Hui, "An experimental study on the abrasive machining process of electronic substrate material with a novel ultraviolet-curable resin bond diamond lapping plate," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 64 375–64 385, 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2917304>.
- [44] Q. Huang, L. Guo, and I. D. Marinescu, "Research on the properties of resin bond wheel cured by ultraviolet light," *Procedia Manufacturing*, vol. 5, pp. 259–269, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.08.023>.
- [45] C. Bonnet, G. Poulachon, J. Rech, Y. Girard, and J. P. Costes, "CFRP drilling: Fundamental study of local feed force and consequences on hole exit damage," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 94, pp. 57–64, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.04.006>.
- [46] A. Kirichenko, M. Al Ibrahim, V. Schetinin, and O. Chenchewa, "Improving the quality of abrasive cutting carbon-carbon composites through rational conditions of dynamic contact," *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, vol. 5, no. 112, pp. 94–102, 2018, doi: <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2018.5.94-102>.
- [47] A. Salenko, O. Chenchewa, V. Glukhova, V. Shchetynin, M. R. F. Budar, S. Klimenko, and E. Lashko, "Effect of slime and dust emission on micro-cutting when processing carbon-carbon composites," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 3, no. 1(105), pp. 38–51, 2020, doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203279>.
- [48] O. Salenko, O. Chenchewa, V. Shchetynin, V. Glukhova, E. Lashko, and M. R. Budar, "Cutting carbon-carbon composites by the diamond drills variable cyclic feed," *Mechanics and Advanced Technologies*, no. 3(87), pp. 47–60, Dec. 2019, doi: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2019.87.188721>.

Modern approaches to abrasive machining of carbon-carbon materials and tools for its implementation

Mykhailo Molnar¹ • Oleksandr Salenko¹

¹ Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

Abstract. The article discusses carbon-carbon composites, which are promising materials for the aerospace, defense, and automotive industries due to their unique combination of high strength, heat resistance, and low density. However, their machining is challenging due to their complex microstructure and abrasiveness, which leads to defects, tool wear, and chip removal problems. In this regard, the purpose of this work is to analyze the main challenges in machining B-B composites and to consider possible approaches to minimize these problems.

The aim of the study is to improve the characteristics of abrasive cutting tools in the task of cutting composites using additive manufacturing methods.

The article presents an overview of the use of B-B composites in various industries, including thermal protection systems, brake discs, gas turbine components, etc. The main problems associated with their processing, such as material delamination, cutting tool wear, and chip removal, are discussed. The influence of various factors, including mechanical loads, thermal effects and tool design, on the occurrence of these problems is analyzed.

The results of the study show that effective machining of B-B composites requires the use of specialized cutting tools, methods of control and monitoring of the tool condition, as well as the use of alternative machining methods. Approaches to minimize the problems associated with machining, including optimization of the cutting tool using additive technologies, are proposed.

The obtained results of the literature review can be used in modeling the cutting process and for optimizing the parameters of the cutting experiment. The results also show the relevance of the selected problem and the possibility of further application.

Keywords: carbon-carbon composite, additive manufacturing, abrasive processing, diamond abrasive drilling.