

**О.О. Томашевський, аспірант
Н.О. Балицька, к.т.н., доц.***Державний університет «Житомирська політехніка»*

Особливості фрезерної обробки композитних матеріалів. Аналітичний огляд

У роботі представлено огляд сучасних наукових досліджень процесу фрезерування композитних матеріалів. Композити належать до анізотропних матеріалів, їх властивості залежать від хімічного складу і структури матриці та армування. В роботі наведено класифікацію сучасних композитних матеріалів, описано механічні властивості їх різних типів та основні проблеми, які виникають при механічній обробці. Інформаційну основу літературного огляду, представленого в цій роботі, становлять результати сучасних вітчизняних і зарубіжних наукових досліджень. Наведено новітні інструментальні матеріали, спеціальні конструкції різальних інструментів, режими різання та умови оброблення, які пропонуються для ефективної фрезерної обробки композитів. Обговорюються результати експериментальних досліджень процесу фрезерування композитів в умовах сухої обробки та обробки із мінімальним змащуванням. Проаналізовано результати наукових робіт із визначення основних причин інтенсивного зношування фрез при обробці композитних матеріалів різних типів. Звертається увага на перспективи застосування різальних інструментів, оснащених полікристалічними алмазами з різним розміром зерен, для фрезерування композитних матеріалів. Виявлено недостатність масштабних і ґрунтовних досліджень процесів фрезерування (ультразвукового фрезерування) керамоматричних композитів. Обґрунтовано необхідність подальших наукових пошуків перспективних шляхів підвищення ефективності обробки композитних матеріалів різних типів.

Ключові слова: механічна обробка; кінцева фреза; класифікація композитів; механічні властивості; оброблюваність.

Актуальність теми. Композитні матеріали на сьогодні широко використовуються в різних галузях промисловості через специфічні властивості міцності та жорсткості, які вищі, ніж у конструкційних металів. Однак через анізотропію властивостей та вміст високоабразивних компонентів ці матеріали важко піддаються механічній обробці. Це виявляється у значних пошкодженнях заготовок та високому зношуванні різальних інструментів. Традиційні способи механічної обробки, такі як точіння, свердління та фрезерування, часто застосовуються для виготовлення виробів із композитних матеріалів, за винятком керамоматричних композитів. Незважаючи на те, що деякі армувальні матеріали в композитах (скло, графіт, бор, оксид алюмінію, карбід кремнію та ін.) є дуже абразивними та твердими (іноді більш тверді за матеріал інструменту), лезова обробка композитів є раціональною, оскільки здійснюється шляхом крихкого руйнування, а не пластичної деформації оброблюваного матеріалу. Тому, щоб мінімізувати знос інструменту через дію абразивних компонентів зміцнюючої фази, особливої уваги потребує вибір інструментального матеріалу, геометричних параметрів інструменту та інших умов обробки.

Підвищення ефективності механічної обробки композитних матеріалів є важливою науково-технічною задачею для сучасного машинобудування, розв'язання якої зумовить розширення областей застосування цих перспективних матеріалів для виготовлення високоточних виробів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. На сьогодні відомо про значну кількість робіт з дослідження процесів механічного оброблення композитів. Дослідженню властивостей та процесів оброблення композитних матеріалів присвячено роботи таких українських вчених: Л.Р. Вишнякова [1], С.Б. Белікова, І.П. Волчка, О.А. Мітяєва, В.М. Плескача, В.О. Савченка [2], В.О. Колесника, Б.Г. Лисенка, А.О. Нешти, М.О. Забари [3], Г.Л. Хавіна [4] та ін.

Проблемами механічної обробки полімерноматричних композитів займалися R.Komanduri [5], E.Uhlmann [6] та ін. Вплив геометрії інструменту та режимів різання на шорсткість поверхні виробів з цих матеріалів досліджувався в роботах S.Gaga [7] та ін. Питання впливу орієнтації волокон на сили різання, формування стружки та зношування інструменту висвітлювалися Y.He [8], W.Xu [9]. Теплові явища процесу фрезерування вивчали S.Gaga [10], H.Wang [11] та ін.

Процес фрезерування металевоматричних композитів у своїх роботах вивчали S.Sikder [12], Z.Liao [13] та ін. У [14] представлено різні типи різальних інструментів для обробки металевих композитів. Автори [15] досліджували характеристики зносу інструменту при фрезеруванні SiCp/Al шляхом застосування фрез РСD з різними розмірами зерен.

Питання ультразвукового фрезерування-шліфування композитів з керамічною матрицею, армованих SiC-волокном, досліджувалися в роботах [16, 17].

Саме результати зазначених досліджень стали базою представленого в цій роботі аналітичного огляду.

Метою статті є дослідження особливостей лезової обробки композитних матеріалів різних типів та визначення перспективних шляхів підвищення ефективності їх фрезерування.

Викладення основного матеріалу. Композитні матеріали утворюються з двох або більше матеріалів, які забезпечують композиту властивості, які не можуть бути отримані від жодного з матеріалів окремо. Один зі складових матеріалів є матрицею, а армуванням – хоча б один інший з матеріалів.

Роль матричного матеріалу – захист армувальних матеріалів, розподіл напружень на армувальних матеріалах, надання остаточної форми деталі.

Роль армувального матеріалу – забезпечення високих механічних властивостей композиту, посилення матриці.

Властивості композитного матеріалу залежать від структури армування та матриці, форми армування (частинки, волокна) та відносного вмісту матеріалів армування (V_f) і матриці (V_m) за об'ємом:

$$V_f = (\text{об'єм армування})/(\text{об'єм композиту});$$

$$V_m = (\text{об'єм матриці})/(\text{об'єм композиту}); \quad (1)$$

$$V_f + V_m = 1.$$

Композитні матеріали можна класифікувати на підставі матричного матеріалу, що використовується для їх виготовлення:

- полімерні матричні композити (ПМК);
- металеві матричні композити (ММК);
- керамічні матричні композити (КМК).

Полімерні матричні композити (ПМК). Армований пластик (Fibre-Reinforced Plastics – FRP) – це композитний матеріал, виготовлений з полімерної матриці, армованої волокнами. Волокна зазвичай бувають скляними (Glass Fibre Reinforced Polymer – GFRP), вуглецевими (Carbon Fibre Reinforced Polymer – CFRP), арамідними або базальтовими (Aramid Fibre Reinforced Plastics – AFRP).

Пластик, армований вуглецевим волокном, і пластмаса, армована арамідним волокном, забезпечують вищу питомі міцність та жорсткість і меншу вагу. AFRP використовується замість CFRP там, де міцність, легкість і в'язкість є основними вимогами, а жорсткість і високотемпературні характеристики не є важливими.

Поширені матричні матеріали для композитів FRP: термореактивні полімери (поліестер, епоксидна смола) та термопластичні полімери (поліамід). Термореактивні полімери залишаються жорсткими при нагріванні та складаються з тривимірної сітки з високим ступенем поперечних зв'язків. Вони досить міцні і жорсткі, але мають погану пластичність (табл. 1).

Таблиця 1

Механічні властивості ПМК [5]

ПМК матеріал	Міцність на розрив, МПа	Модуль пружності, ГПа	Деформація до руйнування %	Щільність, г/см ³
GFRP				
Односпрямований ($V_f = 60\%$)	1000	45	2,3	2,1
Ткане полотно *	100–300	10–20	–	1,5–2,1
Нитки скловолокна* (короткі волокна)	50–200	6–12	–	1,3–2,1
Листовий формувальний композит* (короткі волокна)	10–20	0,5–2	–	1,3–1,9
CFRP				
Односпрямований ($V_f = 60\%$) Висока міцність	1200	145	0,9	1,6
Односпрямований ($V_f = 60\%$) Високий модуль	800	220	0,3	1,6
AFRP				
Односпрямований ($V_f = 60\%$)	1000	75	1,6	1,4

Примітка: *для цих матеріалів: $V_f = 20\text{--}50\%$

Поліефірні матричні композити використовуються у виробництві корпусів човнів, конструкційних панелей та деталей для автомобілів і літаків, будівельних панелей та балок, електроприладів, резервуарів для води тощо. До того ж епоксидні смоли мають меншу усадку після затвердіння, що дозволяє підвищити точність виробів. Епоксидна матриця зазвичай використовується в композитах CFRP та AFRP для аерокосмічних застосувань, військової техніки, супутникових антен, спортивного обладнання, медичних протезів та ін.

Термопластичні полімери складаються з гнучких лінійних молекулярних ланцюгів, які сплутані між собою і, як впливає з назви, розм'якшуються під час нагрівання. Поліамідні смоли використовуються як матричні матеріали в композитах FRP для застосування в аерокосмічній промисловості завдяки їх механічним властивостям та високій температурі склування.

Максимальні робочі температури для композитів FRP відносно невисокі (200–300 °C), оскільки матеріал матриці схильний до розм'якшення, хімічного розкладання або деградації за помірної температури. Ті самі температурні обмеження стосуються і механічної обробки композитів FRP.

Композитні панелі FRP вважаються ефективними для виготовлення високоміцних компонентів. Вони можуть бути застосовані для забезпечення широкого спектра механічних властивостей (міцність на розрив, згинання та удар).

Металеві матричні композити (ММК). ММК використовуються для виробів, що вимагають більш високих робочих температур, ніж це можливо для ПМК. Більшість цих композитів розроблені для аерокосмічної та автомобільної промисловості. Безперервні волокна забезпечують найвищі властивості жорсткості та міцності, які можна отримати в ММК (табл. 2).

Бор–алюмінієві композити є одними з найбільш ранніх розроблених типів ММК [5]. Вони виготовляються шляхом гарячого пресування шарів борних волокон між алюмінієвими фольгами, завдяки чому фольги деформуються навколо волокон і з'єднуються між собою. Завдяки армуванню бором міцність на розрив можна збільшити в три–п'ять разів, а модуль пружності можна потроїти.

Іншими армувальними матеріалами для ММК є карбід кремнію, оксид алюмінію та графіт у формі частинок, коротких волокон або довгих волокон. Алюмінієві, магнієві та титанові сплави є найпоширенішими матеріалами матриці, які використовуються в матеріалах ММК.

Таблиця 2

Механічні властивості матеріалів ММК [12]

ММК матеріал	Міцність на розрив, МПа	Модуль пружності, ГПа	Деформація до руйнування %
Безперервне волокно ММК			
Al 2124–T6* (45 % B)	1450	220	0,81
До 6061–T6 (51 % B)	1410	230	0,74
Al 6061–T6 (45 % SiC)	1460	200	0,89
Переривчасте волокно ММК			
До 2124–T6 (20 % SiC)	650	125	2,40
До 6061–T6 (20 % SiC)	480	120	5,00
Частка ММК			
До 2124–T6 (20 % SiC)	550	105	7,00
До 6061–T6 (20 % SiC)	500	105	5,50
Без армування			
Al 2124–F	450	700	9,00
Al 6061–F	310	70	12,00

Механічні властивості ММК, як видно із таблиці 2, поєднують у собі переваги і металів, і композитів, що призводить до збільшення міцності, підвищення експлуатаційних характеристик.

Переривчасте волокно і частинки, армовані ММК, є недорогими та забезпечують більш високу міцність, жорсткість і кращу стабільність розмірів порівняно з відповідними неармованими сплавами. Невеликі доповнення армування ($V_f = 20\%$) помірно підвищують міцність і жорсткість основного сплаву. Вони також підвищують зносостійкість і сприяють виникненню труднощів при обробці цих матеріалів. ММК використовуються для деталей автомобільних двигунів (поршнів, гільз циліндрів, гальмівних барабанів), деталей наведення ракет тощо [12].

Керамічні матричні композити (КМК). Керамічні матричні композити – це особливий тип композитного матеріалу, в якому як армування (вогнетривкі волокна), так і матричний матеріал, є керамікою. У деяких випадках для обох частин конструкції використовується той самий вид кераміки, а також можуть бути включені додаткові вторинні волокна, через це КМК вважаються підгрупою як композитних матеріалів, так і кераміки.

Типові матеріали армувального волокна: карбон (C), карбід кремнію (SiC), оксид алюмінію (Al_2O_3), муліт ($Al_2O_3-SiO_2$).

Волокна можуть мати різну форму: традиційні безперервні волокна, короткі волокна, частинки, фібри та нановолокна. Усі ці волокна мають полікристалічну структуру, як у традиційної кераміки.

Переважно для КМК використовується армування короткими волокнами, нитками або безперервним волокном. Використання фібр і коротких волокон покращує стійкість КМК до розповсюдження тріщин і загальної міцність. Армування довгими або безперервними волокнами забезпечує кращу міцність, ніж

короткі волокна. Довгі волокна також можуть утримувати КМК разом навіть після того, як керамічна матриця почне тріскатися, значно сповільнюючи поширення тріщин.

КМК зазвичай ідентифікуються за волокном / матрицею. Наприклад, C/SiC – це вуглецеве волокно у матриці з карбиду кремнію.

Найбільш часто використовувані КМК: C/C, C/SiC, SiC/SiC, Al₂O₃/Al₂O₃. Також можливі варіанти, коли в позначення додають тип виробничого процесу, наприклад, LPI–C/SiC. LPI позначає інфільтрацію рідкого полімеру (або інфільтрацію та піроліз полімеру), LSI – інфільтрацію рідкого кремнію, CVI – інфільтрацію хімічної пари та CVD – хімічне осадження з газової фази.

Важливими і комерційно доступними КМК є C/C, C/SiC, SiC/SiC та Al₂O₃/Al₂O₃.

Керамічні матричні композити мають іншу структуру, ніж звичайна кераміка, і значно відрізняються від звичайних металевих сплавів. Як і кераміка, вони тверді та стійкі до високих температур, але вони також дуже легкі і мають значно вищу міцність на розрив та стійкість до термічних ударів (табл. 3).

КМК здатні зберігати відносно високу механічну міцність навіть за високих температур (близько 500 МПа при 1000–1200 °С). Вони забезпечують відмінну жорсткість і хорошу стійкість, як механічну, термічну, розмірну, так і хімічну. Відносно подовження до розриву композитів з керамічною матрицею може становити до 1 %, і вони не схильні до руйнування, як традиційні керамічні матеріали. Їх стійкість до розповсюдження тріщин безпосередньо пов'язана з армувальними волокнами, які можуть перекривати тріщину в матриці та запобігати її росту.

Під час випробувань на розтяг поведінка КМК нагадує поведінку пластичного матеріалу через нелінійну залежність між напруженням та деформацією. Така поведінка називається «квазіпластичністю» і спричинена мікротріщинами, які утворюються в матриці та потім перекриваються армувальними волокнами.

Однак міцність на стиск КМК менша, ніж у традиційної кераміки, і це пов'язано з пористістю матричного матеріалу. Позитивним моментом є те, що вони мають високу корозійну стійкість навіть за підвищених температур і добре витримують динамічні навантаження [18].

У таблиці 3 наведено усереднені значення основних механічних властивостей деяких КМК матеріалів.

Наступні характеристики є важливими для оцінки КМК на згин і розрив:

– КМК з низьким вмістом матриці (до нуля) мають високу міцність на розрив (близьку до міцності на розрив волокна), але низьку міцність на згин;

– КМК з низьким вмістом волокна (до нуля) мають високу міцність на згин (близьку до міцності монолітної кераміки), але не подовжуються понад 0,05 % при навантаженні на розтяг.

Таблиця 3

Механічні властивості матеріалів КМК [18]

КМК матеріал	Міцність на розрив, МПа	Міцність на згин МПа	Модуль пружності, ГПа	Деформація, %	Щільність, г/см ³	Твердість, ГПа
Al ₂ O ₃ /Al ₂ O ₃	65	80	50	0,12	2,1	9,5–16,8
Al ₂ O ₃	250	450	400	0,1	3,9	
CVI–C/SiC	310	475	95	0,75	2,1	
LPI–C/SiC	250	500	65	0,5	1,9	
LSI–C/SiC	190	300	60	0,35	1,9	
SiSiC	200	400	395	0,05	3,1	

Механічна обробка. Механічна обробка композитних матеріалів у багатьох аспектах істотно відрізняється від механічної обробки звичайних металів і їх сплавів. При обробці композитів поведінка матеріалу є неоднорідною і анізотропною, вона залежить від властивостей та об'ємної частки армування та матриці. Інструмент контактує з матеріалами матриці та армування, реакція яких на процес різання може бути абсолютно різною. Таким чином, механічна обробка композитних матеріалів висуває особливі вимоги до геометрії і зносостійкості різальних інструментів.

Фрезерування ПКМ. Фрезерування деталей ПКМ, на відміну від металевих, характеризуються низькою часткою матеріалу, що видаляється, від загального об'єму заготовки. Фрезерування використовується як коригувальна операція кінцевої обробки або для отримання визначених, високоякісних поверхонь. Тип волокна, архітектура армування та об'ємна частка матриці є найважливішими факторами, що регулюють вибір інструменту та режимів різання.

Переважно для фрезерування композитів GFRP та CFRP рекомендовані швидкості різання знаходяться в діапазоні від 80 до 250 м/хв для твердосплавних інструментів і від 200 до 800 м/хв для різальних інструментів з PCD [6, 7].

Зазвичай ПКМ обробляються в сухих умовах через негативний вплив поглинання вологи на міцність цих матеріалів. Проте застосування мінімальної кількості змащування (MQL) можна розглядати як

спосіб підвищення стійкості різального інструменту та геометричної точності заготовок. У [19] досліджували вплив параметрів MQL на продуктивність фрезерування пазів у ламінатах CFRP. Ефективність обробки оцінювалася з точки зору максимальної температури інструменту, сил різання, зносу інструменту і точності обробки. Комбінація MQL з високою швидкістю потоку повітря і низькою швидкістю потоку масла забезпечила найвищий термін служби різального інструменту і найменшу похибку обробки.

Головними факторами, які визначають оброблюваність композитних матеріалів, є орієнтація волокна [8, 9, 20, 21] та теплові явища. Теплопровідність матеріалу зменшується зі збільшенням кута між тепловим потоком і орієнтацією волокна. Відомо, що температура різання зростає при зростанні швидкості різання. Значна кількість енергії перетворюється в тепло через сильну пластичну деформацію оброблюваного матеріалу і високий коефіцієнт тертя між інструментом і заготовкою [10, 11].

Найбільш поширені варіанти укладання волокон представлені на рисунку 1. При обробці композитів з кутами укладання шарів волокон 45° і 135° спостерігаються значні дефекти. Тому виробники різального інструменту розробили спеціальні конструкції кінцевих фрез для обробки композитних матеріалів.

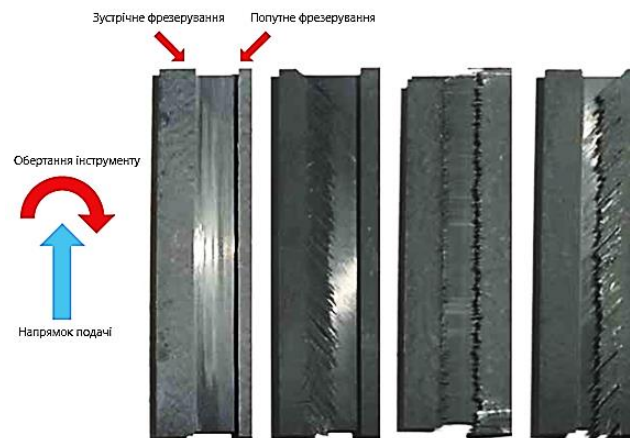


Рис. 1. Результати фрезерування полімерних композитів з кутами укладання волокон 0° , 45° , 90° , 135° [22]

Відомий виробник різального інструменту – компанія KORLOY [23] – пропонує п'ять типів кінцевих твердосплавних фрез з нанокристалічним алмазним покриттям (NCD) для обробки композитних матеріалів. CCLR і CCR (рис. 2, а–б) – високоточні кінцеві фрези з малим кутом гвинтової лінії стружкової канавки, що мінімізують виникнення відшаровування і задирок. Кінцева фреза CCCR з подвійною спіраллю (рис. 2, в) призначена для чистової обробки пазів. Рівнодійна сила різання на усіх різальних кромках спрямована у напрямку до серединної площини заготовки, що мінімізує появу задирок і відшарування на верхніх і нижніх поверхнях (рис. 3). Кінцева чорнова фреза CCR (рис. 2, г) має особливу конструкцію леза з мінімальним опором різанню, вона забезпечує зменшення вібрацій у процесі обробки. Ця фреза застосовується для профілювання та нарізання канавок. Кінцева фреза CCHR (рис. 2, д) має високоміцну багатозубу конструкцію та призначена для високопродуктивної чорнкової обробки.



Рис. 2. Фрези KORLOY для обробки композитних матеріалів [23]

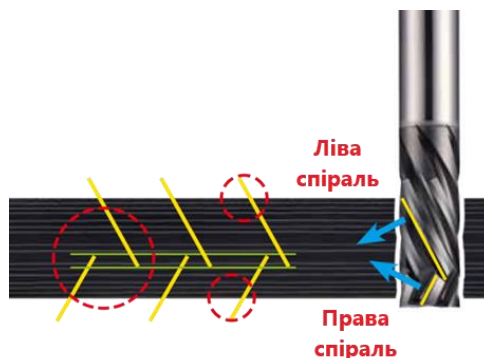


Рис. 3. Схема роботи кінцевої фрези CDR KORLOY [23]

Для обробки композитів AFRP стандартна геометрія інструменту не може бути застосована, оскільки окремі арамідні волокна можуть бути відокремлені в чистому розрізі тільки за одночасного попереднього напруження. Через високу в'язкість і гнучкість волокон AFRP важко піддаються обробці, характеризуються поганою, нечіткою поверхнею з частково витягнутими і подрібненими волокнами. Механічна обробка AFRP пов'язана із серйозною проблемою задирок. У процесі різання осьова сила на зовнішніх волокнах більша, ніж сила зв'язування, тому поверхневі волокна виштовхуються назовні. Коли ж осьова сила перевищує силу міжшарового зв'язування, з'являються розшарування.

Геометрія різального інструменту серйозно впливає на якість обробки. Для отримання поверхні високої якості кут спіралі стружкової канавки має становити 60° , що було доведено у [24].

Таким чином задача підвищення ефективності фрезерування ПМК може вирішуватися за рахунок оптимізації конструкції та геометричних параметрів фрез при реалізації прогресивних схем різання.

Фрезерування ММК. Основною проблемою при обробці ММК є інтенсивний знос інструменту, який за певних обставин призводить до незадовільної економічної ефективності механічної обробки. На знос інструменту впливають розмір і властивості армувального матеріалу та матеріалу матриці. Іншими важливими факторами є режими різання, які також визначають продуктивність процесу та якість обробленої поверхні.

Знос інструменту спричинений дуже твердим і абразивним армуванням. Основною причиною зносу є безпосередній контакт між армуючими частинками або волокнами і різальною кромкою інструменту, що викликає як механічне, так і термічне навантаження [13]: значне стирання, викликане контактом з волокнами або частинками; високі динамічні навантаження, викликані ударами по різальній кромці; напруження, що виникає внаслідок неоднорідності матеріалу заготовки; висока локальна температура, що виникає внаслідок інтенсивного мікроконтакту між різальною кромкою та армуванням.

У [14] досліджується механічна обробка ММК. Автором встановлено, що оброблюваність ММК залежить насамперед від твердості матриці. При цьому різальні інструменти із кубічного нітриду бору (CBN) та полікристалічного алмаза (PCD) до 2 разів перевершують інструменти із твердих сплавів за зносостійкістю. Твердосплавні різальні інструменти рекомендуються лише для чорнової обробки.

У [15] показано, що мастильно-охолоджувальні технологічні середовища (МОТС) на водній основі допомагають зменшити утворення наростів на кромках, але не збільшують стійкість інструментів.

Також у [15] представлено результати експериментального дослідження фрезерування високооб'ємних фракцій SiCp/Al композитів різальними інструментами з PCD з різним розміром зерен. Авторами встановлено, що інструмент з розміром зерна PCD 2–30 мкм може досягти кращої якості обробленої поверхні, ніж інструменти з розміром зерна 0,5–1 мкм і 25 мкм. Отже, інструменти з надтвердих матеріалів (НТМ) можна ефективно використовувати для механічної обробки ММК. Дешевші інструменти з алмазним покриттям можуть бути альтернативою цілісним інструментам з НТМ за умови достатньої адгезії таких покриттів.

Фрезерування КМК. Аналіз літературних джерел показав, що на сьогодні механічна обробка КМК представлена в основному шліфуванням або ультразвуковими методами кінцевого фрезерування-шліфування. Це пояснюється особливими фізико-механічними властивостями цих композитів (табл. 3).

У [16] було досліджено процес фрезерування-шліфування КМК із застосуванням ультразвукової вібрації. Авторами [16] доведено перспективність застосування обробки з використанням ультразвукової вібрації за рахунок зменшення сил різання та зносу інструменту. Це робить вказану технологію перспективною для обробки КМК.

Як новий передовий матеріал КМК привертає все більшу увагу і в перспективі матиме ширше застосування завдяки своїм особливим властивостям, таким як низька питома вага, висока міцність і стійкість до високих температур. Однак досі не існує стандартного критерію для оцінки якості механічно оброблених поверхонь виробів із КМК. У [17] було рекомендовано використовувати безконтактне

вимірювальне обладнання для виміру якості поверхні, через великий розмір заглибин і пустот на обробленій поверхні, а для опису якості обробленої поверхні було запропоновано використовувати тривимірну шорсткість поверхні, оскільки коливання її даних було набагато меншим, ніж у двовимірної шорсткості.

Висновки та перспективи подальших досліджень. На основі проведеного аналізу наукових досліджень можна виокремити такі особливості фрезерної обробки композитних матеріалів.

Обробка композитних матеріалів висуває особливі вимоги до конструкції та стійкості різального інструменту. Механізми зношування інструменту насамперед пов'язані з фізико-механічними характеристиками матриці.

Основні рекомендації щодо ефективного фрезерування полімерних матричних композитів:

- застосування кінцевих твердосплавних фрез з полікристалічним алмазним покриттям;
- використання кінцевих твердосплавних фрез з малим кутом гвинтової лінії стружкової канавки та фрез із подвійною спіраллю для чистової обробки і багатозубих фрез – для чорнової;
- комбінація мінімальної кількості змащування з високою швидкістю потоку повітря і низькою швидкістю потоку масла для забезпечення довшого терміну служби різального інструменту та найвищої якості оброблених поверхонь.

Основні рекомендації щодо ефективного фрезерування металевих матричних композитів:

- застосування кінцевих фрез з надтвердих матеріалів для чистової обробки та твердосплавних інструментів для чорнової обробки;
- застосування МОТС для підвищення якості оброблених поверхонь.

Фрезерування керамічних матричних композитів на сьогодні можливе із застосуванням ультразвукової технології обробки.

На основі розглянутих особливостей процесу фрезерування композитних матеріалів можна вказати на такі перспективи подальших досліджень: пошук та розробка нових інструментальних матеріалів і зносостійких покриттів, оптимізація конструктивних та геометричних параметрів різальних інструментів, проєктування інструментів з прогресивними схемами різання.

Список використаної літератури:

1. Вишняков Л.Р. Композиційні матеріали / Л.Р. Вишняков // Енциклопедія Сучасної України : онлайн-версія. – Київ : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2014 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://esu.com.ua/article-4385>.
2. Композиційні матеріали в авіабудуванні (огляд) / С.Б. Беліков, І.П. Волчок, О.А. Мітяев та ін // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2017. – № 2. – С. 32–40.
3. Дослідження впливу режимів різання на шорсткість обробленої поверхні при свердлінні отворів у пакетах «вуглепластик / титановий сплав» / В.Колесник та ін. // Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. – 2022. – Т. 1, № 18. – С. 110–123.
4. Хавін Г.Л. Вплив кута орієнтації армуючих елементів на інтенсивність зношування інструменту при обробці полімерних композитів / Г.Л. Хавін, Ч.Хоу // Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Сер. : Техніка в машинобудуванні. – 2022. – № 1. – С. 59–65.
5. Komanduri R. Machining of fiber-reinforced composites / R.Komanduri // Machining science and technology. – 1997. – Vol. 1, № 1. – P. 113–152.
6. High speed cutting of carbon fibre reinforced plastics / E.Uhlmann and other // Procedia manufacturing. – 2016. – Vol. 6. – P. 113–123. DOI: 10.1016/j.promfg.2016.11.015.
7. Gara S. Effect of tool geometry on surface roughness in slotting of CFRP / S.Gara, O.Tsoumarev // The international journal of advanced manufacturing technology. – 2015. – Vol. 86, № 1–4. – P. 451–461. DOI: 10.1007/s00170-015-8185-9.
8. The cutting force and defect analysis in milling of carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) composite / Y.He and other // The international journal of advanced manufacturing technology. – 2017. – Vol. 93, № 5–8. – P. 1829–1842. DOI: 10.1007/s00170-017-0613-6.
9. Xu W. Effect of tool vibration on chip formation and cutting forces in the machining of fiber-reinforced polymer composites / W.Xu, L.Zhang, Y.Wu // Machining science and technology. – 2016. – Vol. 20, № 2. – P. 312–329. DOI: 10.1080/10910344.2016.1168930.
10. Gara S. Temperature measurement and machining damage in slotting of multidirectional CFRP laminate / S.Gara, S.M'hamed, O.Tsoumarev // Machining science and technology. – 2017. – Vol. 22, № 2. – P. 320–337. DOI: 10.1080/10910344.2017.1365892.
11. The effect of cutting temperature in milling of carbon fiber reinforced polymer composites / H.Wang and other // Composites part A: applied science and manufacturing. – 2016. – Vol. 91. – P. 380–387. DOI: 10.1016/j.compositesa.2016.10.025.
12. Sikder S. Analytical model for force prediction when machining metal matrix composites: thesis / S.Sikder. – 2010.
13. State-of-the-art of surface integrity in machining of metal matrix composites / Z.Liao and other // International journal of machine tools and manufacture. – 2019. – Vol. 143. – P. 63–91. DOI: 10.1016/j.ijmactools.2019.05.006.

14. Yakut N. Cutting tool selection for machining metal matrix composites / *N.Yakut* // *Journal of Advances in Manufacturing Engineering*. – 2022. – Vol. 3. – P. 64–76. DOI: 10.14744/ytu.jame.2022.00008.
15. An experimental study on milling of high–volume fraction SiCP/Al composites with PCD tools of different grain size / *Y.Yang and other* // *The international journal of advanced manufacturing technology*. – 2015. – Vol. 79, № 9–12. – P. 1699–1705. DOI: 10.1007/s00170-015-6901-0.
16. Feasibility and tool performance of ultrasonic vibration-assisted milling-grinding SiCf/SiC ceramic matrix composite / *Y.-F. Xiong and other* // *Journal of materials research and technology*. – 2022. – Vol. 19. – P. 3018–3033. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.06.063.
17. Assessment of machined surface for SiCf/SiC ceramic matrix composite during ultrasonic vibration-assisted milling-grinding / *Y.-F. Xiong and other* // *Ceramics international*. – 2022. – Vol. 49. – P. 5345–5356. DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.10.058.
18. Ceramic matrix composite [Electronic resource]. – Access mode : https://www.academia.edu/30448760/Ceramic_matrix_composite.
19. Flow visualization and characterization for optimized MQL machining of composites / *Y.Iskandar and other* // *CIRP annals*. – 2014. – Vol. 63, № 1. – P. 77–80. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.03.078.
20. High-quality machining of CFRP with high helix end mill / *A.Hosokawa and other* // *CIRP annals*. – 2014. – Vol. 63, № 1. – P. 89–92. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.03.084.
21. *Ghafari-zadeh S.* Finite element analysis of surface milling of carbon fiber–reinforced composites / *S.Ghafari-zadeh, J.F. Chatelain, G.Lebrun* // *The international journal of advanced manufacturing technology*. – 2016. – Vol. 87, № 1–4. – P. 399–409. DOI: 10.1007/s00170-016-8482-y.
22. Machining CFRP/GFRP Composite material [Electronic resource]. – Access mode : https://www.machining4.eu/Technology-Sheets/Machining_CFRP_GFRP_Composite_material.
23. 5 types of Endmill for Composite Material – KORLOY CFRP/GFRP exclusive Endmill [Electronic resource]. – Access mode : http://www.korloy.com/en/prcenter/medianews_view.do?id_boards=8599&pageIndex=9.
24. Study on the cutting force and machined surface quality of milling AFRP / *S.Q. Liu and other* // *Materials science forum*. – 2016. – Vol. 836–837. – P. 155–160. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.836-837.155.

References:

1. Vyshniakov, L.R. (2014), «Kompozytsiini materialy», *Entsyklopediia Suchasnoi Ukrainy*, online-versiia, Instytut entsyklopedychnykh doslidzhen NAN Ukrainy, Kyiv, [Online], available at: <https://esu.com.ua/article-4385>
2. Bielikov, S.B., Volchok, I.P., Mitiaiev, O.A. et al (2017), «Kompozytsiini materialy v aviabuduvanni (ohliad)», *Novi materialy i tekhnologii v metalurhii ta mashynobuduvanni*, No. 2, pp. 32–40.
3. Kolesnyk, V. et al. (2022), «Doslidzhennia vplyvu rezhymiv rizannia na shorstkist obroblenoj poverkhni pry sverdlinni otvoriv u paketakh "vuhleplastyk / tytanovyj splav"», *Suchasni tekhnologii v mashynobuduvanni ta transporti*, Vol. 1, No. 18, pp. 110–123.
4. Khavin, H.L. and Khou, Ch. (2022), «Vplyv kuta oriientsii armuiuchykh elementiv na intensyvniat znoshuvannia instrumentu pry obrobtsti polimernykh kompozytiv», *Visnyk natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskyi politekhnichnyi instytut»*. Ser. *Tekhnika v mashynobuduvanni*, No. 1, pp. 59–65.
5. Komanduri, R. (1997), «Machining of fiber–reinforced composites», *Machining science and technology*, Vol. 1, No. 1, pp. 113–152.
6. Uhlmann, E. et al. (2016), «High speed cutting of carbon fibre reinforced plastics», *Procedia manufacturing*, Vol. 6, pp. 113–123, doi: 10.1016/j.promfg.2016.11.015.
7. Gara, S. and Tsoumarev, O. (2015), «Effect of tool geometry on surface roughness in slotting of CFRP», *The international journal of advanced manufacturing technology*, Vol. 86, No. 1–4, pp. 451–461, doi: 10.1007/s00170-015-8185-9.
8. He, Y. et al. (2017), «The cutting force and defect analysis in milling of carbon fiber–reinforced polymer (CFRP) composite», *The international journal of advanced manufacturing technology*, Vol. 93, No. 5–8, pp. 1829–1842, doi: 10.1007/s00170-017-0613-6.
9. Xu, W., Zhang, L. and Wu, Y. (2016), «Effect of tool vibration on chip formation and cutting forces in the machining of fiber–reinforced polymer composites», *Machining science and technology*, Vol. 20, No. 2, pp. 312–329, doi: 10.1080/10910344.2016.1168930.
10. Gara, S., M'hamed, S. and Tsoumarev, O. (2017), «Temperature measurement and machining damage in slotting of multidirectional CFRP laminate», *Machining science and technology*, Vol. 22, No. 2, pp. 320–337, doi: 10.1080/10910344.2017.1365892.
11. Wang, H. et al. (2016), «The effect of cutting temperature in milling of carbon fiber reinforced polymer composites», *Composites part A: applied science and manufacturing*, Vol. 91, pp. 380–387, doi: 10.1016/j.compositesa.2016.10.025.
12. Sikder, S. (2010), *Analytical model for force prediction when machining metal matrix composites: thesis*.
13. Liao, Z. et al. (2019), «State-of-the-art of surface integrity in machining of metal matrix composites», *International journal of machine tools and manufacture*, Vol. 143, pp. 63–91, doi: 10.1016/j.ijmactools.2019.05.006.
14. Yakut, N. (2022), «Cutting tool selection for machining metal matrix composites», *Journal of Advances in Manufacturing Engineering*, Vol. 3, pp. 64–76, doi: 10.14744/ytu.jame.2022.00008.
15. Yang, Y. et al. (2015), «An experimental study on milling of high–volume fraction SiCP/Al composites with PCD tools of different grain size», *The international journal of advanced manufacturing technology*, Vol. 79, No. 9–12, pp. 1699–1705, doi: 10.1007/s00170-015-6901-0.

16. Xiong, Y.-F. et al. (2022), «Feasibility and tool performance of ultrasonic vibration-assisted milling-grinding SiCf/SiC ceramic matrix composite», *Journal of materials research and technology*, Vol. 19, pp. 3018–3033, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.06.063.
17. Xiong, Y.-F. et al. (2022), «Assessment of machined surface for SiCf/SiC ceramic matrix composite during ultrasonic vibration-assisted milling-grinding», *Ceramics international*, Vol. 49, pp. 5345–5356, doi: 10.1016/j.ceramint.2022.10.058.
18. *Ceramic matrix composite*, [Online], available at: https://www.academia.edu/30448760/Ceramic_matrix_composite
19. Iskandar, Y. et al. (2014), «Flow visualization and characterization for optimized MQL machining of composites», *CIRP annals*, Vol. 63, No. 1, pp. 77–80, doi: 10.1016/j.cirp.2014.03.078.
20. Hosokawa, A. et al. (2014), «High-quality machining of CFRP with high helix end mill», *CIRP annals*, Vol. 63, No. 1, pp. 89–92, doi: 10.1016/j.cirp.2014.03.084.
21. Ghafarizadeh, S., Chatelain, J.F. and Lebrun, G. (2016), «Finite element analysis of surface milling of carbon fiber-reinforced composites», *The international journal of advanced manufacturing technology*, Vol. 87, No. 1–4, pp. 399–409, doi: 10.1007/s00170-016-8482-y.
22. *Machining CFRP/GFRP Composite material*, [Online], available at: https://www.machining4.eu/Technology-Sheets/Machining_CFRP_GFRP_Composite_material
23. *5 types of Endmill for Composite Material – KORLOY CFRP/GFRP exclusive Endmill*, [Online], available at: <http://www.korloy.com/en/prcenter/median>
24. Liu, S.Q. et al. (2016), «Study on the cutting force and machined surface quality of milling AFRP», *Materials science forum*, Vol. 836–837, pp. 155–160, doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.836-837.155.

Томашевський Олег Олегович – аспірант Державного університету «Житомирська політехніка». <https://orcid.org/0000-0003-2639-1866>.

Наукові інтереси:

- процеси механічної обробки;
- різальний інструмент для обробки композитних матеріалів.

Балицька Наталія Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри механічної інженерії Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0003-1363-8110>.

Наукові інтереси:

- забезпечення експлуатаційних характеристик виробів формуванням періодичної текстури поверхонь;
- дослідження процесів механічної обробки важкооброблюваних матеріалів;
- проектування різальних інструментів.

Tomashevskiy O.O., Balytska N.O.

Features of milling composites. Analytical review

This paper presents an overview of modern scientific research into the process of milling composite materials. Composites are anisotropic materials, and their properties depend on the chemical composition and structure of the matrix and reinforcement. This paper provides a classification of modern composite materials, describes the mechanical properties of their various types and the main problems that arise during machining. The literature review presented in this paper is based on the results of modern scientific research. The latest tool materials, special designs of cutting tools, cutting modes and machining conditions proposed for milling composites are presented. The results of experimental studies of the composite milling process under dry and minimal lubrication conditions are discussed. The results of scientific works on determining the main causes of intensive wear of milling cutters when machining composite materials of various types are analyzed. The prospects of using cutting tools equipped with polycrystalline diamonds with different grain sizes for milling composite materials are discussed. The insufficiency of large-scale and thorough studies of milling processes (ultrasonic milling) of ceramic-matrix composites is revealed. The necessity of further scientific research of promising ways to increase the efficiency of machining composite materials of various types is substantiated.

Keywords: machining; end mill; composite classification; mechanical properties; machinability.

Стаття надійшла до редакції 05.04.2023.