

В. О. Колесник¹
Б. Г. Лисенко¹
В. В. Басов¹
А. Ю. Довгополов¹
Ю. О. Некрасов¹
А. В. Панченко¹
В. Ю. Ярош¹

КРИТИЧНИЙ ОГЛЯД СУЧАСНИХ ТЕНДЕНЦІЙ У ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ЯКОСТІ ОТВОРІВ ПІД ЧАС СВЕРДЛІННЯ ПАКЕТІВ ВУГЛЕПЛАСТИК/ТИТАНОВИЙ СПЛАВ

¹Сумський державний університет

У останні десятиліття пакети вуглепластик/титановий сплав набули поширення у виробництві компонентів авіаційної техніки на противагу використанню окремо волокнистих матеріалів та металевих сплавів, що пов'язано з вищими фізико-механічними та експлуатаційними властивостями пакетів у порівнянні зі сплавами. Разом з розширенням сфери застосування пакетів вуглепластик/титановий сплав збільшились і валова частка механічних операцій, що значною мірою пов'язано з необхідністю з'єднання шарів вуглепластику з шарами титанового чи алюмінієвого сплаву. У цьому контексті найпоширенішою операцією механічної обробки є свердління отворів. Одночасне оброблення різних за структурою, хімічним складом та фізико-механічними характеристиками матеріалів пакетів викликає низку викликів як перед дослідниками, так і інженерами в аспекті забезпечення економічної точності та якості отворів у шарах вуглепластику та титанового сплаву. Незважаючи на великий обсяг досліджень зі свердління отворів у пакетах вуглепластик/титановий сплав, всебічне розуміння основних параметрів свердління та їхній вплив на точність та якість отворів є недостатнім. Метою статті є критичний огляд процесів свердління отворів у пакетах вуглепластик/титановий сплав та вплив цих процесів на параметри обробки. Для узагальнення сучасних досягнень в галузі обробки пакетів проведено комплексний аналіз літератури. Розглянуті аспекти, які включають вплив режимів різання та технологій механічної обробки на показники якості отворів. Особливу увагу приділено обговоренню параметрів свердління у перехідній зоні шарів пакета, а також впливу різних стратегій і послідовності свердління на результати свердління пакетів вуглепластик/титановий сплав. Зокрема, вказано на поточні недоліки дослідження та означено подальші напрямки досліджень. Стаття спрямована на надання науковому та виробничому співтовариству повного розуміння процесів свердління пакетів.

Ключові слова: свердління, пакет вуглепластик/титановий сплав, якість, зношення, режими різання, технології механічної обробки.

Вступ

В останні роки в сучасній аерокосмічній промисловості продовжує зростати попит на використання легких матеріалів, що обумовлено екологічними вимогами щодо мінімізації споживання палива, а також економічними причинами, зокрема, зниженням експлуатаційних витрат, збільшенням строку служби та життєвого циклу авіаційних компонентів [1]. Тому набули поширення пакети, що є поєднанням волокнистих полімерних композиційних матеріалів (ВПКМ) та легких металевих сплавів, здебільшого алюмінієвих та титанових сплавів [2], для виготовлення несучих компонентів літальних апаратів, з огляду на високі вимоги до їхніх механічних властивостей та структурних функцій [2]. Матеріали, виготовлені з ВПКМ на основі вуглецевого волокна (вуглепластики), поєднані з листами титанового сплаву, є одними з найвикористовуваніших типів пакетів в процесі виготовлення авіаційних компонентів. Ці гібридні конструкції мають високі механічні

властивості, зокрема високу питому міцність/жорсткість і високу стійкість до втоми/корозії. Зокрема, пакети вуглепластик/титановий сплав набули широко застосування у виробництві обшивки фюзеляжу та крил літальних апаратів [3].

Свердління є основною механічною операцією виготовлення отворів і подальшого з'єднання багатопов'язаних матеріалів. Однак, процес свердління супроводжується низкою технологічних проблем, пов'язаних зі значним зносом інструмента, що призводить до низької якості отворів [4]. Це зумовлено абсолютно різними раціональними режимами різання для різних шарів пакета. Так, свердління шару вуглепластику супроводжується специфічними пошкодженнями обробленої поверхні, швидким зношенням різального інструмента [5], що пов'язане з анізотропною структурою матеріалу та абразивним впливом вуглецевого волокна. Тоді як обробка титанового сплаву, пов'язана з високими силами різання, температурою обробки та катастрофічним зношенням інструмента, що є наслідком високої твердості, низької теплопровідності і низького модуля пружності цих матеріалів [6]. Необхідно враховувати, що свердління пакетів у багатьох аспектах суттєво відрізняється від свердління окремо шару ВПКМ та металевому сплаву. Це зумовлено наявністю перехідної зони, тобто ділянки оброблення, коли різальний інструмент одночасно обробляє обидва шари матеріалів пакета [7].

Незважаючи на те, що докладено значних зусиль у дослідженні фундаментальних аспектів різання пакетів ВПКМ/титановий сплав [8], узагальнювальний огляд не проводився. До того ж, знання та досвід, накопичені в процесі свердління окремо композитів і титанових сплавів, не можуть бути повністю перенесені на високоточне свердління складних пакетів, оскільки взаємопов'язані механізми різання зберігаються в процесі видалення стружки. Це пов'язано з тим, що свердління шару вуглепластику або титанового сплаву в залежності від вибраної стратегії обробки більшою або меншою мірою будуть впливати на результати механічної обробки.

У статті особливу увагу приділено обговоренню та аналізу явищ у перехідній зоні. У ході аналізу літературних джерел висвітлені, як недоліки проведених досліджень, так і окреслені потенційно перспективні напрямки майбутніх досліджень.

Результати дослідження

Аналіз параметрів якості отворів у пакетах вуглепластик/титановий сплав

Якість отворів у пакетах ВПКМ/метал є ключем до забезпечення надійності та довговічності болтових і заклепкових з'єднань у сучасному авіабудуванні [9]. Саме тому у більшості наукових робіт з механічної обробки пакетів розглянуто аспекти і фактори, які впливають на якість отворів. У ранніх дослідженнях була запропонована кількісна оцінка характерних пошкоджень поверхні отвору як у шарі ВПКМ, так і в металевому шарі. Збільшення коефіцієнта розшарування зменшує навантаження на розтяг і збільшує залишкові напруження у шарі матеріалу [10]. У найзагальнішому випадку параметри якості отворів можна розділити на: геометричну точність і точність форми, зокрема, діаметр отвору, відхилення від круглості і циліндричності та параметри морфології оброблених поверхонь. Діаметр отвору можна оцінити за відхиленням номінального діаметра отвору (E_h) [11]. У подальших дослідженнях ця класифікація була уточнена з погляду детальнішої інформації про коефіцієнт розшарування [12].

На якість поверхні отворів пакета у шарі вуглепластику значною мірою впливає температура у зоні різання, оскільки вона зумовлює швидкість склування (більше 180 °C), яка суттєво впливає на температурнозалежні властивості композиційного матеріалу [13].

Види пошкоджень отворів при обробці пакетів ВПКМ/ метал

Пошкодження поверхні отворів виникають через різні технологічні фактори. Ці фактори або їхня комбінація можуть відрізнитися для ВПКМ і металевому шару пакетів. Найпоширенішими факторами, які впливають на характер пошкодження отворів [14] для пакетів ВПКМ/метал, є режими різання [4] (зокрема, швидкість різання, подача та час затримки), технологія свердління (однопрохідне свердління, свердління за допомогою вібрації (VAD) (ультразвукове свердління (UAD) [15], низькочастотне вібраційне свердління (LFVAD) [16], середовище різання [17], геометрія свердла [18], інструментальні матеріали [19], послідовності шарів пакета [20], [21].

За результатами аналізу літератури можна стверджувати, що найзначущішими та найпоширенішими типами пошкоджень поверхні ВПКМ під час свердління пакетів вуглепластик/титановий сплав є: відшарування, висмикування волокон, незрізані волокна (задири), тріщини, термічні пош-

кодження матриці, подряпини на поверхні. Для титанового шару такими пошкодженнями є задирки і шорсткість на вході/виході з отвору. Найважливішими факторами, що визначають розшарування у шарі вуглепластику, є подвійний головний кут в плані, кут підйому гвинтової поверхні, подача, орієнтація волокна та температура різання. Кут підйому гвинтової поверхні суттєво впливає на розшарування та утворення задирок у вуглепластику [22]. Використання свердел з подвійним головним кутом в плані свердла понад 135° визначено як придатне для одночасної обробки шару вуглепластику та титанового сплаву в поєднанні з низькою подачею для мінімізації відшарування [23]. Однак, подібна комбінація режимів різання призводить до підвищення температури різання [4], [24]. Очевидним способом зниження температури різання є застосування різних охолоджувальних середовищ. Позитивний вплив охолоджувальних середовищ на температуру різання пов'язано з поліпшенням умов тертя в зоні різання та поглинанням тепла. Альтернативним способом перешкоджання відтоку тепла у різальний інструмент та оброблюваний матеріал є використання технології вібраційного свердління. Сприятливий вплив цієї технології на тепловіддачу з перехідної зони ґрунтується на короткому часі контакту різальної кромки з матеріалом заготовки та зміні характеру механічної взаємодії між інструментом і заготовкою. Застосування техніки малого змащення (MQL) негативно впливає на коефіцієнт розшарування, збільшуючи його від 38 % до 117 % у порівнянні із сухим свердлінням. Разом з тим, використання техніки малого змащення погіршує морфологію поверхні отвору [25], одночасно позитивно впливаючи на висоту задирок під час однопрохідного свердління. Серйозні та нерівномірні термічні пошкодження отвору, деградації матриці відбуваються на виході з отвору для більшості отворів як в UAD, так і у разі традиційного свердління [26].

Аналіз впливу різних факторів на параметри точності отворів

Забезпечення точності отворів має важливе значення для обробки отворів у пакетах вуглепластик/титановий сплав. Сучасні тенденції у вдосконаленні технології обробки отворів стосується оптимізації швидкості різання та подачі, геометрії інструмента, стратегій свердління, використання змащувально-охолоджувальних середовищ (ЗОС). Точність отвору оцінюється шляхом вимірювання: діаметра отвору (фактичного діаметрального розміру отвору), відхилення від круглості та відхилення від циліндричності. Забезпечення параметрів точності отвору є результатом складної взаємодії багатьох факторів, які впливають на процес обробки. Часто ця взаємодія має стохастичний характер, що підвищує складність керування процесом свердління додатково обтяженого такими чинниками, як ковзання стружки титанового сплаву по поверхні отвору у вуглепластику, швидким абразивним зношування інструмента та адгезію матеріалу заготовки на різальному інструменті. Проте, їхній вплив навряд чи можна врахувати в рамках класичної методології планування експерименту. Умови різання можуть змінюватися у широкому діапазоні значень геометрії інструмента, типів покриттів і способів подачі охолоджувальної рідини.

Слід підкреслити, що жодна технологія не може задовольнити всі суперечливі вимоги щодо забезпечення належних значень усіх параметрів пошкодження та вимог до точності отворів. Найскладнішим завданням під час оброблення пакетів вуглепластик/титановий сплав є уникнення термічного пошкодження вуглепластику, витягування волокна, утворення задирок, збільшення діаметра отвору, відхилення від круглості та циліндричності. Ці параметри є чутливими до виділення тепла в зоні різання, ковзанням металевої стружки, температурного розширенням свердла, адгезії матеріалу заготовки та сильного зношення інструмента. Частково ці проблеми вирішуються оптимізацією режимів різання та геометрії свердла. Можна зробити висновок, що позитивний ефект від використання різноманітних технік охолодження дозволяє успішно вирішити проблему тепловідведення із зони різання. Проте, майбутні дослідження технології вібраційного свердління, покращення стратегій свердління, що мають супроводжуватися покращенням геометрії свердла, шляхом вдосконалення геометрії передньої поверхні свердла стружколамними канавками, можуть бути перспективним напрямком для вирішення проблем пошкоджень обробленої поверхні та забезпечення точності отворів.

Вплив параметрів процесу свердління

Як зазначено вище, пошкодження отвору та параметри точності сильно залежать від складної взаємодії багатьох факторів. Проте, найістотніший вплив на характер та величину пошкодження отворів і параметри точності отворів спричинений параметрами процесу різання. Параметри процесу можна розділити на дві основні групи. Перша група — це параметри оброблення або режими

різання: швидкість різання, подача, час затримки (для однопрохідного свердління), частота і амплітуда руху інструмента (для вібраційного свердління), потік і тиск охолоджувальної рідини (для MQL та змащувально-охолоджувальних рідин), які є факторами процесу. Друга група відповідає фізичним характеристикам процесу свердління: осьова сила та крутний момент, температура різання, які є відгуками.

Детальний статистичний аналіз наявних тенденцій в оцінці різних умов процесу підкреслив існування тенденції визначення або описування процесу свердління через вимірювання осьової сили та крутного моменту [21], розшарування [5], [27]—[31], температури свердління [32], [33] та інших характеристик процесу.

Вплив режимів різання

Основними технологічними факторами, які забезпечують процес свердління, є швидкість різання і подача. Ці параметри є найзагальніші для будь-якої технології свердління. Однак вони можуть варіюватися в широкому діапазоні значень, враховуючи, що оброблення може реалізовуватись техніками однопрохідного свердління, циклічного свердління, вібраційного свердління (VAD, UAD) або спірального фрезерування. В результаті аналізу літературних джерел можна підсумувати, що найпоширенішими значеннями швидкості різання для пакетів вуглепластик/титановий сплав у разі однопрохідного свердління є діапазон значень від 17 до 62 м/хв (рис. 1). При цьому подача змінювалася від 0,018 до 0,081 мм/об (рис. 2). Підкреслено, що подачі є вагомим фактором, який впливає на збільшення осьової сили та крутного моменту під час «сухого» свердління вуглепластику, ніж швидкість різання, оскільки безпосередньо впливає на пом'якшення епоксидної матриці. Розм'якшення матриці є фоном для збільшення довжини витягування волокна.

Використання техніки ультразвукового свердління дозволило зменшити осьову силу у шарі вуглепластику на 47%, а у шарі титанового сплаву на 26%, тоді як крутний момент зменшився на 49% і 29% відповідно, у порівнянні з традиційним свердлінням. Аналогічна тенденція позитивного впливу накладання ультразвукових вібрацій на різальний інструмент під час свердління пакета спостерігається і для температури свердління. Проте, використовуючи техніку введення охолодженого повітря, що знижувало температуру різання, витягування волокна зменшилося від 25 до 55% в залежності від комбінації

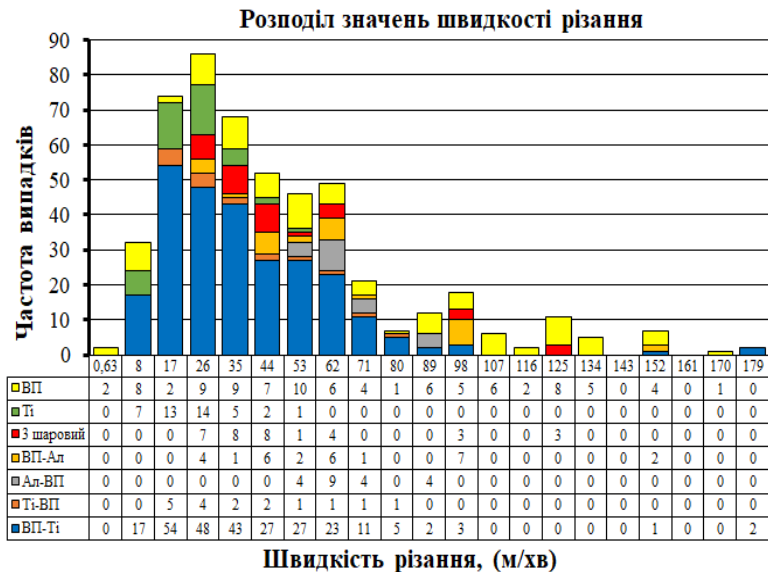


Рис. 1. Статистичний аналіз швидкості різання у залежності від комбінацій пакетів: ВП — вуглепластик; Ті — титановий сплав; Ал — алюмінієвий сплав

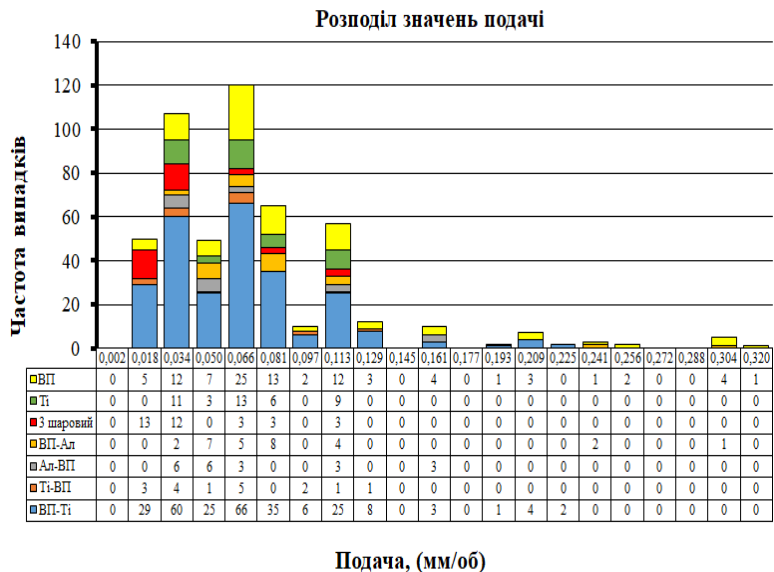


Рис. 2. Статистичний аналіз швидкості різання у залежності від комбінацій пакетів: ВП — вуглепластик; Ті — титановий сплав; Ал — алюмінієвий сплав

значень швидкості різання, подачі та інтенсивності зношення спірального свердла під час оброблення вуглепластику, тоді як коефіцієнт розшарування зменшився на 7...20 %.

Збільшення подачі та зменшення частоти обертання шпинделя зумовлює зниження температури свердління у перехідній зоні шарів пакета.

Зауважимо, що вплив швидкості різання в діапазоні від 17 до 35 м/хв і подачі в діапазоні від 0,018 до 0,07 мм/об під час свердління пакетів вуглепластик/титановий сплав на характеристики процесу свердління є достатньо вивченим. Проте, майбутні дослідження можуть зосередитись на оцінюванні ефективності свердління в діапазоні швидкості різання від 44 м/хв до 90 м/хв та подачі від 0,08 мм/об до 0,12 мм/об, особливо за використання технології однопрохідного чи циклічного свердління та поглиблення розуміння впливу температурного розширення свердла на якість оброблення [4].

Вплив різального інструмента

Геометрія різального інструмента, інструментальний матеріал та покриття є важливими факторами, які впливають на умови процесу свердління. Оптимізація геометрії різального інструмента здебільшого стосувалася визначення впливу подвійного головного кута [27], [34], ширини поперечної різальної кромки [35], спеціальної та ступінчастої геометрії свердла [5], [28], [31], конструкції допоміжної різальної кромки [30], [36], а також інструментального матеріалу [37], [38], покриття інструмента [39] на параметри якості отворів або характеристик процесу свердління.

Найпоширенішою модифікацією конструкції свердла є поєднання підточеної поперечної різальної кромки та подвійного головного кута свердла. Подібна пріоритезація досліджень пов'язана з суттєвим впливом цих геометричних параметрів свердла на осьову силу та коефіцієнт розшарування. Для свердління пакетів найчастіше використовуються свердла з подвійним головним кутом 140°, 135° та 120°. Ці кути визначено як оптимальні для обробки отворів, як у шарі вуглепластику, так і у шарі титанового сплаву [31], [36]. Кут підйому гвинтової лінії змінюється від 15° до 30°. Кут підйому гвинтової лінії безпосередньо впливає на процес виведення стружки із зони різання та морфологію обробленої поверхні отвору у вуглепластику. У ході експериментів вплив заднього та переднього кута мало досліджувався [40]. Проте у експериментальних дослідженнях ортогонального різання та в процесі моделювання методом скінчених елементів суттєву увагу приділяли вивченню впливу цих параметрів на процес стружкоутворення. Найдослідженішими є значення переднього кута: 6°, 14°, 30°, 10° і 9°, тоді як вплив заднього кута вивчався за значень 6°, 8°, 10° і 12° [29].

Виявлено, що геометрія свердла має вирішальний вплив на формування стружки. Зокрема, під час вивчення впливу ступінчастого свердла на характеристики процесу свердління виявлено, що подібна геометрія різального інструмента краще сприяє відведенню стружки із зони різання у порівнянні з традиційними спіральними свердлами, знижує осьову силу на 39,4 %, а крутний момент на 17,4 % [41].

Температура різання та розсіювання тепла із зони різання є важливими аспектами, які можуть впливати на оброблені поверхні отворів з вуглепластику. Висока температура різання може призвести до термічної деградації епоксидної матриці та висмикування волокна. Поліпшення умов взаємодії інструмент–заготовка можна досягти шляхом модифікації передньої поверхні стружколамної канавки, що зменшує довжину стружки [39]. Одним з можливих способів покращення умов теплового потоку зони розділу є використання різних матеріалів покриття. Однак використання інструментів із покриттям не є загальноприйнятою практикою під час свердління пакетів через низьку стійкість матеріалу покриття до впливу вуглепластику.

Таким чином, різальні інструменти з алмазним або нанокompозитними покриттям (TiN/AlTiN/CrAl-SiN), характеризуються високими теплопровідними властивостями і відносно низьким коефіцієнтом тертя [38]. Таке поєднання термомеханічних властивостей інструмента з покриттям призводить до зниження температури механічного оброблення та мінімізації термічної деградації матриці композиційного матеріалу. Дослідження механізму зношення різального інструменту показали, що зношення на головних та допоміжних різальних кромках свердла зумовлено інтенсивним тертям вуглецевого волокна.

Покриття AlCrN є найвигіднішим для забезпечення більшого періоду стійкості твердосплавного свердла, тоді як використання свердел з покриттям TiN і TiAlN дозволяє забезпечити вищу розмірну точність отвору та менше відхилення від циліндричності [38]. Основні аспекти впливу геометричних параметрів та структури пакета на коефіцієнт розшарування, точність отвору, види пошкодження отвору, морфологію обробленої поверхні, осьову силу та крутний момент подано в табл. 1.

Підсумкова таблиця огляду впливу геометричних параметрів свердла на характеристики процесу свердління пакетів вуглепластик/титановий сплав

Посилання	Послідовність пакета	Тема дослідження	Основні висновки
Wang та ін. [34]	титановий сплав/вуглепластик [T800]	Дослідження впливу поперечної кромки ступінчастого свердла та адгезію титанового сплаву	Адгезія частинок титанового сплаву на різальний інструмент спостерігається поблизу поперечної різальної кромки, що супроводжується катастрофічним зношенням. Ключовим аспектом підвищення періоду стійкості свердла є зменшення адгезії титанового сплаву
Yasar та ін. [42]	вуглепластик [(0°/45°)/титановий сплав]	Вивчення впливу головного кута та типу покриття на величину зношення на формування наросту	Максимальний нарост спостерігався при головному 130°, але саме для покриття TiAlN, що пов'язано із вмістом титану у нітридній формі. Оскільки для свердла з алмазним покриттям формування наросту не спостерігалось, хоча цей тип покриття виявився чутливим до взаємодії з вуглепластиком
Qiu та ін. [27]	вуглепластик [-45°/90°/ /-45°/0°/45°/90°/45°/ /0°/0°/45°/45°/ /-45°/90°/-45°] _s / /титановий сплав	Вплив головного кута та заднього кута на висоту задирок титанового сплаву	Визначено, що використання свердла з подвійним головним кутом 90° призводить до 4 кратного збільшення висоти задирок у порівнянні зі ступінчастим свердлом з подвійним головним кутом 120°
Jia та ін. [28]	титановий сплав/ /P2352 вуглепластик [(-45°/0°/45°/90°) ₂ / /0°/0°]	Порівняння багатолезової та однолезової допоміжної різальної кромки на розмірну точність, відхилення від циліндричності та висоту задирок у титановому сплаві	Експериментально визначено, що багатолезова допоміжна різальна кромка ефективно забезпечує розмірну точність отворів у шарах вуглепластику та титанового сплаву. У два рази знижує відхилення від круглості та висоту задирки у титановому сплаві.
Pardo та ін. [36]	вуглепластик [45°/135°/0°/0°/45°/ /135°/0°/0°/90°/0°] _{4s} / /титановий сплав	Вивчення впливу головного кута в плані та гвинтової канавки на діаметр отвору та розмір міжшарової задирки	Відхилення номінального розміру отвору збільшується зі зростанням головного кута в плані в діапазоні 118°... 180°. Збільшення міжшарового зазору провокує інтенсивніший абразивний вплив титанової стружки на стінку отвору у вуглепластику. Взаємозв'язок міжшарового зазору та міжшарової задирки не виявлено.
Xu та ін. [5]	вуглепластик (T700)	Про вплив ступінчастого свердла на коефіцієнт розшарування та розмірну точність отворів	Використання ступінчастого свердла дозволяє забезпечити на 27 % ліпші параметри коефіцієнта розшарування, та до 14 % менші відхилення від циліндричності
Shu та ін. [30]	вуглепластик [0°/90°] ₄ / /титановий сплав	Вивчення впливу спеціальної геометрії допоміжної різальної кромки на температуру свердління	Використання спеціальної геометрії допоміжної різальної кромки дозволило знизити осьову силу та температуру різання у два рази
Fu та ін. [29]	вуглепластик/ /титановий сплав	Аналіз впливу переднього кута на довжину пошкодження від розшарування, довжину крихкого руйнування та довжину пошкодження від зсуву	Виявлено, що малий передній кут призводить до більшої довжини розшарування. Оптимальне значення переднього кута для одночасної обробки вуглепластик/титановий сплав становить 10...14°, що забезпечує зменшення довжини розшарування, довжини крихкого руйнування та довжини пошкодження зсуву

Вплив змащувально-охолоджувальних середовищ (ЗОС)

Одним із можливих способів поліпшення умов процесу свердління є використання різних методів охолодження. Технології, що використовують охолоджувальні рідини можна розділити на: традиційну подачу охолоджувальної рідини, техніку малого змащення (MQL) і криогенні методи. Найчастіше використовуваним середовищем різання є механічне оброблення в сухих умовах. Проте, вплив ЗОС, криогенних і методів MQL також вивчається.

Теоретичні основи використання охолоджувальних середовищ під час оброблення пакетів вуглепластик/титановий сплав базуються на тому, що охолоджувальні агенти можуть покращувати умови тертя в зоні контакту інструмент-деталь і поглинати тепло, як це практично доведено для однорідних матеріалів, таких як сталь і сплави. Проте, отримані результати аналізу літературних джерел у аспекті використання ЗОС під час оброблення пакетів є суперечливими.

Технологія MQL досліджувалася для поліпшення оброблюваності пакетів CFRP/Ti під час свердління твердосплавним свердлом без покриття за один прохід [25]. Кількісна оцінка сили свердління,

морфології поверхні та геометричної точності отвору не показує істотної різниці порівняно зі звичайним свердлінням з охолоджувачем або без нього. Підсумовано, що сила свердління відповідає швидкості подачі, а не умовам змащення [25]. На висоту задирок також впливає середовище різання [43]. Хоча використання MQL зменшує накопичення теплоти в об'єктах зони різання, зокрема, використання техніки MQL дозволяє знизити температуру свердла з 800 °С до 400 °С [43]. Ху та ін. також зазначили, що MQL зменшує таке накопичення, але не зменшує абразивного впливу вуглецевого волокна на допоміжну різальну кромку твердосплавного свердла, як з алмазним, так і TiAlN покриттями.

Кріогенне свердління з використанням LCO₂ збільшує сили різання та коефіцієнт розшарування. До того ж, поєднання охолодження LCO₂ і MQL може зменшити розшарування завдяки кращим умовам змащування в зоні контакту інструмент–заготовка [44]. Свердління в середовищі LN₂ усуває те, що низькі температури збільшують розмір отворів у верхній і нижній частині шару композиту до 20 мкм порівняно зі свердлінням без ЗОР за аналогічних режимів різання. Таке явище можна пояснити підвищенням жорсткості ВПКМ, мікротвердості, залишкової напружки [45] за низьких температур. Рівень змащування за використання техніки MQL впливає на адгезію стружки титанового сплаву на передній поверхні свердла з алмазним покриттям. Вищий рівень змащування (до 15 мл/год) знижує коефіцієнт тертя і температуру різання [37]. Всупереч роботі Rajkumar та ін., John та ін. провели дослідження впливу гарячого охолодженого повітря на розшарування та шорсткість вуглепластику. Підсумовано, що свердління вуглепластику за 60 °С і 90 °С підігрітого повітря зменшує осьову силу за низької подачі ($f_m = 100$ мм/хв), хоча шорсткість поверхні не корелює з використанням подачі гарячого повітря [46].

Аналіз робіт з досліджень впливу технічного середовища на параметри процесу свердління, виявив тенденцію, що більшість дослідників зосереджувалися на оцінюванні впливу технічних середовищ на параметри точності отвору, розшарування та морфології поверхні, осьову силу та крутний момент, а також досліджено температури свердління (табл. 2).

Таблиця 2

Аналіз впливу змащувально-охолоджувальних середовищ під час оброблення пакетів вуглепластик/титановий сплав

Посилання	Послідовність пакета/різальний інструмент	Характеристики охолодження	Параметр, на який впливає охолодження	Характер впливу
Ху та ін. [25]	Вуглепластик [0°/-45°/45°/90°] ₄ / /титановий сплав. Твердосплавне спіральне свердло без покриття	Техніка малого змащення (MQL)	Коефіцієнт розшарування	↑
			Висота вихідної задирки	↓
			Середній діаметр	↓
			Середнє відхилення від циліндричності	Не впливає
			Зношення	Зменшення наростотворення
Kumar та ін. [21]	Титановий сплав/Вуглепластик [0°/90°/+45°/-45°] ₅ / /титановий сплав. Спіральне свердло з алмазним покриттям	Кріогенне LN ₂ (витрата потоку = 0,25 л/хв; тиск = 1,10 bar)	Осьова сила	↑
			Крутний момент	↓
			Максимальне коло з урахуванням коефіцієнта пошкодження	↓
			Міжшарова задирка, Висота вихідної задирки	↓
			Середній розмір отвору	↓
			Відхилення від перпендикулярності	↓
			Відхилення від циліндричності (Титановий сплав)	Не впливає
			Відхилення від циліндричності (Вуглепластик)	↓
Rodríguez та ін. [47]	вуглепластик/титановий сплав Спіральне свердло з алмазним покриттям	Кріогенне CO ₂	Температура інструмента	↓
			Точність отвору (Вуглепластик/титановий сплав)	↓
			Висота задирки	↓
			Адгезія титанового сплаву	↓
			Потужність різання	Не впливає

Продовження табл. 2

Посилання	Послідовність пакета/різальний інструмент	Характеристики охолодження	Параметр, на який впливає охолодження	Характер впливу
Нои та ін. [33]	Вуглепластик [±45°/90°/90°/45°/45°/0°/-45°/-45°/0°/45°/0°/-45°/0°/45°/0°/45°/0°/90°/90°/-45°/0°/45°/0°]с/титановий сплав, твердосплавне спіральне свердло без покриття	Свердління зі змащувально-охолоджувальною рідиною, внутрішня подача (Voelube 70104, Castrol Syntilo 9828)	Радіус заокруглення різальної кромки	↓
			Фаска зношення	↓
			Осьова сила	↓
			Температура свердління	Не значний ефект
			Шорсткість	Не значний ефект
Agrawal та ін. [48]	Вуглепластик (TC33-12K)	Кріогенне LN ₂	Осьова сила	↑
			Крутний момент	↓
			Питома енергія різання	↓
			Коефіцієнт розшарування на виході	↓
			Коефіцієнт розшарування на вході	↑
			Середній розмір отвору	↓
			Відхилення від циліндричності	↓

Охолоджувальні середовища частково позитивно впливають на поліпшення умов поглинання тепла та тертя в зоні різання, водночас вони сильно негативно впливають на морфологію поверхні та точність отворів у вуглепластику. Найсуперечливішим є використання кріогенної техніки, це надзвичайно впливає на фізичні та механічні властивості вуглепластику та титанового сплаву. Техніка MQL не має істотного впливу на умови тертя під час свердління вуглепластику, що може зменшити термін служби вуглепластику в болтових або заклепкових з'єднаннях літаків через поглинання охолоджувальної рідини в структурі шару вуглепластику.

Висновки

Запропоновано огляд останніх досягнень свердління пакетів вуглепластик/титановий сплав. Проведено комплексний аналіз наукової літератури, щоби запропонувати представникам виробничого сектора всебічне розуміння основних механізмів свердління та поведінки пакетів вуглепластик/титановий сплав. Також критично розглянуто різні аспекти свердління пакетів, включно з утворенням пошкоджень, механічними/термічними дефектами, впливом умов процесу свердління, параметрами якості отвору та механізмами зносу інструмента. На основі комплексної оглядової роботи можна підсумувати та окреслити перспективи для проведення майбутніх досліджень.

Зменшення пошкодження отворів і серйозної деградації поверхонь стінок отвору у вуглепластику під час свердління пакетів вуглепластик/титановий сплав все ще є складним завданням через важкі умови різання, що супроводжуються високими температурами свердління та подальшою термічною деградацією епоксидної матриці. Попри те, що докладено багато зусиль для забезпечення якості отвору шляхом вдосконалення техніки свердління, геометрії інструмента, режимів різання та середовища охолодження, жодне з рішень не могло задовольнити всі протиріччя та обмеження свердління пакетів. Сьогодні теплове розширення свердла все ще погано вивчений і може бути фактором, який не враховується для забезпечення точності отвору.

Вплив режимів різання на умови процесу свердління пакетів ретельно і всебічно вивчено. Проте, вплив часової затримки під час свердління послідовних отворів на якість отвору враховано недостатньо. У майбутньому більше уваги слід приділяти використанню ступінчастого різального інструмента та уточнення вичерпного переліку значущих факторів, що впливають на морфологію обробленої поверхні отвору. Зазначено, що використання різних охолоджувальних середовищ має досить обмежений позитивний вплив на поліпшення термомеханічних умов свердління. Перспективними є майбутні дослідження щодо розробки передових методів вібраційного свердління (LFVAD) та (UAD), що можуть значно покращити механіку видалення стружки та точність отворів.

Використання різних охолоджувальних середовищ навряд чи може підвищити період стійкості різального інструмента. Тим не менш, використання техніки MQL може зменшити адгезійне зношення та утворення наростів. Хоча вплив зносу інструмента не можна виключати як факт, що впливає на параметри процесу свердління, використання нанокompозитних покриттів може збільшити термін служби інструмента для оброблення пакетів вуглепластик/титановий сплав.

На сьогодні більшість наявних досліджень механізмів утворення пошкоджень у зоні з'єднання

шарів пакета, ґрунтуються на традиційних експериментальних методах та методах моделювання. У будь-якому разі, розробка точної та надійної моделі матеріалів пакета, з урахуванням впливу термомеханічного зв'язку та накопичення пошкоджень є ключем до виявлення складних механізмів пошкодження шарів пакета на мікрорівні.

До того ж, найефективнішим способом усунення дефектів утворення отворів у пакетах вуглепластик/титановий сплав є розробка високопродуктивних спеціалізованих свердел, поліпшення умов різання та застосування нових технологій виробництва. У майбутньому якісне свердління багат шарових пакетів буде розвиватися у напрямку гнучкості, цифровізації та використання штучного інтелекту як для оброблення експериментальних даних, так і для прогнозування параметрів якості механічної обробки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] J. Y. Xu, M. El Mansori, J. Voisin, M. Chen, and F. Ren, "On the interpretation of drilling CFRP/Ti6Al4V stacks using the orthogonal cutting method: Chip removal mode and subsurface damage formation," (Eng.), *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 44, pp. 435-447, Aug. 2019, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.05.052>.
- [2] F. Impero, M. Dix, A. Squillace, U. Prisco, B. Palumbo, and F. Tagliaferri, "A comparison between wet and cryogenic drilling of CFRP/Ti stacks," (Eng.), *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 33, no. 12, pp. 1354-1360, 2018, <https://doi.org/10.1080/10426914.2018.1453162>.
- [3] J. Xu, M. El Mansori, M. Chen, and F. Ren, "Orthogonal cutting mechanisms of CFRP/Ti6Al4V stacks," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 103, no. 9-12, pp. 3831-3851, August 01, 2019, <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03734-x>.
- [4] V. Kolesnyk et al., "Application of ANN for Analysis of Hole Accuracy and Drilling Temperature When Drilling CFRP/Ti Alloy Stacks," (Eng.), *Materials*, vol. 15, no. 5, p. 21, Mar. 2022, Art no. 1940, <https://doi.org/10.3390/ma15051940>.
- [5] J. Y. Xu, T. Y. Lin, J. P. Davim, M. Chen, and M. El Mansori, "Wear behavior of special tools in the drilling of CFRP composite laminates," (Eng.), *Wear*, vol. 476, p. 11, Jul. 2021, Art no. 203738, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203738>.
- [6] Q. Wang, and X. L. Jia, "Optimization of cutting parameters for improving exit delamination, surface roughness, and production rate in drilling of CFRP composites," (Eng.), *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Article vol. 117, no. 11-12, pp. 3487-3502, Dec. 2021, <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07918-2>.
- [7] J. Y. Xu, M. El Mansori, M. Chen, and F. Ren, "Orthogonal cutting mechanisms of CFRP/Ti6Al4V stacks," (Eng.), *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 103, no. 9-12, pp. 3831-3851, Aug. 2019, <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03734-x>.
- [8] R. Zitoune, V. Krishnaraj, F. Collombet, and S. Le Roux, "Experimental and numerical analysis on drilling of carbon fibre reinforced plastic and aluminium stacks," (Eng.), *Composite Structures*, vol. 146, pp. 148-158, Jun. 2016, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.02.084>.
- [9] Y. Yang et al., "Topography characteristics and formation mechanism of the bolt-hole contact interface during the bolt installation of interference-fit composite structure," *Thin-Walled Structures*, vol. 179, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109642>.
- [10] M. M. A. Ammar, B. Shirinzadeh, K. Z. Lai, and W. C. Wei, "On the Sensing and Calibration of Residual Stresses Measurements in the Incremental Hole-Drilling Method," (Eng.), *Sensors*, vol. 21, no. 22, p. 19, Nov. 2021, Art no. 7447, <https://doi.org/10.3390/s21227447>.
- [11] M. Ali, L. Xiang, D. Yue, and G. J. Liu, "Assessment of Cutting Performance of Cemented Tungsten Carbide Drills in Drilling Multidirectional T700 CFRP Plate," (Eng.), *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 2, no. 3, p. 14, Sep. 2018, no. 43, <https://doi.org/10.3390/jmmp2030043>.
- [12] Y. X. Li, F. Jiao, Z. Q. Zhang, Z. B. Feng, and Y. Niu, "Research on entrance delamination characteristics and damage suppression strategy in drilling CFRP/Ti6Al4V stacks," (Eng.), *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 76, pp. 518-531, Apr. 2022, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.02.018>.
- [13] Y. Karpat, U. Karaguzel, and O. Bahtiyar, "A thermo-mechanical model of drill margin-borehole surface interface contact conditions in dry drilling of thick CFRP laminates," (Eng.), *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 154, p. 15, Jul. 2020, no. 103565, <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103565>.
- [14] M. Alvarez-Alcon, L. N. L. de Lacalle, and F. Fernandez-Zacarias, "Multiple Sensor Monitoring of CFRP Drilling to Define Cutting Parameters Sensitivity on Surface Roughness, Cylindricity and Diameter," (Eng.), *Materials*, vol. 13, no. 12, p. 17, Jun. 2020, no. 2796, <https://doi.org/10.3390/ma13122796>.
- [15] D. X. Geng, Y. H. Liu, Z. Y. Shao, M. L. Zhang, X. G. Jiang, and D. Y. Zhang, "Delamination formation and suppression during rotary ultrasonic elliptical machining of CFRP," (Eng.), *Composites Part B-Engineering*, vol. 183, p. 12, Feb. 2020, no. 107698, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107698>.
- [16] R. Hussein, A. Sadek, M. A. Elbestawi, and M. Attia, "Low-frequency vibration-assisted drilling of hybrid CFRP/Ti6Al4V stacked material," (Eng.), *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 98, no. 9-12, pp. 2801-2817, Oct. 2018, <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2410-2>.
- [17] A. S. S. Balan et al., "Numerical Modelling and Analytical Comparison of Delamination during Cryogenic Drilling of CFRP," (Eng.), *Polymers*, vol. 13, no. 22, p. 15, Nov. 2021, no. 3995, <https://doi.org/10.3390/polym13223995>.
- [18] C. W. Han, K. B. Kim, S. W. Lee, M. B. G. Jun, and Y. H. Jeong, "Thrust Force-Based Tool Wear Estimation Using Discrete Wavelet Transformation and Artificial Neural Network in CFRP Drilling," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 22, no. 9, pp. 1527-1536, Sep. 2021, <https://doi.org/10.1007/s12541-021-00558-2>.
- [19] R. Hussein, A. Sadek, M. A. Elbestawi, and M. H. Attia, "An Investigation into ToolWear and Hole Quality during Low-Frequency Vibration-Assisted Drilling of CFRP/Ti6Al4V Stack," (Eng.), *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 3, no. 3, p. 19, Sep. 2019, no. 63, <https://doi.org/10.3390/jmmp3030063>.
- [20] M. H. Hassan, J. Abdullah, and G. Franz, "Multi-Objective Optimization in Single-Shot Drilling of CFRP/Al Stacks Using Customized Twist Drill," (Eng.), *Materials*, vol. 15, no. 5, p. 25, Mar. 2022, no. 1981, <https://doi.org/10.3390/ma15051981>.
- [21] D. Kumar, S. Gururaja, and I. S. Jawahir, "Machinability and surface integrity of adhesively bonded Ti/CFRP/Ti hybrid composite laminates under dry and cryogenic conditions," (Eng.), *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 58, pp. 1075-1087, Oct. 2020, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.08.064>.
- [22] D. I. Poor, N. Geier, C. Pereszlay, and J. Y. Xu, "A critical review of the drilling of CFRP composites: Burr formation,

- characterisation and challenges,” (Eng.), *Composites Part B-Engineering*, Review vol. 223, p. 17, Oct. 2021, no. 109155. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109155>.
- [23] Z. Y. Jia, C. Chen, F. J. Wang, C. Zhang, and Q. Wang, “Analytical model for delamination of CFRP during drilling of CFRP/metal stacks,” (Eng.), *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 106, no. 11-12, pp. 5099-5109, Feb. 2020. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05029-y>.
- [24] V. Kolesnyk *et al.*, “Experimental Study of Drilling Temperature, Geometrical Errors and Thermal Expansion of Drill on Hole Accuracy When Drilling CFRP/Ti Alloy Stacks,” (Eng.), *Materials*, vol. 13, no. 14, p. 17, Jul. 2020, no. 3232. <https://doi.org/10.3390/ma13143232>.
- [25] J. Y. Xu, M. Ji, M. Chen, and F. Ren, “Investigation of minimum quantity lubrication effects in drilling CFRP/Ti6Al4V stacks,” (Eng.), *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 34, no. 12, pp. 1401-1410, Sep. 2019. <https://doi.org/10.1080/10426914.2019.1661431>.
- [26] Z. Y. Shao *et al.*, “The interface temperature and its influence on surface integrity in ultrasonic-assisted drilling of CFRP/Ti stacks,” (Eng.), *Composite Structures*, vol. 266, no. 113803, p. 13, Jun. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113803>.
- [27] X. Y. Qiu *et al.*, “Influence of main cutting edge structure on hole defects in CFRP/titanium alloy stacks drilling,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 69, pp. 503-513, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.07.061>.
- [28] Z. Y. Jia, C. Zhang, F. J. Wang, R. Fu, and C. Chen, “Multi-margin drill structure for improving hole quality and dimensional consistency in drilling Ti/CFRP stacks,” (Eng.), *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 276, no. 116405, p. 9, Feb. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116405>.
- [29] Q. Fu, S. J. Wu, C. H. Li, J. Y. Xu, and D. Z. Wang, “Delamination and chip breaking mechanism of orthogonal cutting CFRP/Ti6Al4V composite,” (Eng.), *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 73, pp. 183-196, Jan. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.11.015>.
- [30] L. M. Shu *et al.*, “Study on dedicated drill bit design for carbon fiber reinforced polymer drilling with improved cutting mechanism,” (Eng.), *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, vol. 142, no. 106259, p. 17, Mar. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.106259>.
- [31] F. J. Wang, M. Zhao, R. Fu, J. B. Yan, S. Qiu, and J. X. Hao, “Novel chip-breaking structure of step drill for drilling damage reduction on CFRP/Al stack,” (Eng.), *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 291, no. 117033, p. 9, May 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.117033>.
- [32] C. Y. Xu, Y. W. Wang, J. Z. Xu, and X. L. Liu, “Design of internal-chip-removal drill for CFRP drilling and study of influencing factors of drilling quality,” (Eng.), *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 106, no. 5-6, pp. 1657-1669, Jan. 2020. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04698-8>.
- [33] G. Y. Hou *et al.*, “Comparative tool wear and hole quality investigation in drilling of aerospace grade T800 CFRP using different external cooling lubricants,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 106, no. 3-4, pp. 937-951, Jan. 2020. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04554-9>.
- [34] Q. Wang, F. J. Wang, C. Zhang, and C. Chen, “Combined effects of various materials on tool wear in drilling of Ti/CFRP stacks,” (Eng.), *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C-Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 234, no. 14, pp. 2750-2759, Jul. 2020, Art no. 0954406219868246. <https://doi.org/10.1177/0954406219868246>.
- [35] G. Basmaci, A. S. Yoruk, U. Koklu, and S. Morkavuk, “Impact of Cryogenic Condition and Drill Diameter on Drilling Performance of CFRP,” (Eng.), *Applied Sciences-Basel*, vol. 7, no. 7, p. 12, Jul. 2017, Art no. 667. <https://doi.org/10.3390/app7070667>.
- [36] A. Pardo, J. Le Gall, R. Heinemann, and L. Bagshaw, “The impact of tool point angle and interlayer gap width on interface borehole quality in drilling CFRP/titanium stacks,” (Eng.), *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 114, no. 1-2, pp. 159-171, May 2021. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06733-z>.
- [37] J. Fernandez-Perez, J. L. Cantero, J. Diaz-Alvarez, and M. H. Miguelez, “Hybrid Composite-Metal Stack Drilling with Different Minimum Quantity Lubrication Levels,” (Eng.), *Materials*, vol. 12, no. 3, p. 13, Feb. 2019, no. 448. <https://doi.org/10.3390/ma12030448>.
- [38] A. Iqbal *et al.*, “Between-the-holes cryogenic cooling of the tool in hole-making of Ti-6Al-4V and CFRP,” *Materials*, vol. 14, no. 4, pp. 1-19, 2021, no. 795. <https://doi.org/10.3390/ma14040795>.
- [39] S. Samsudeensadham, and V. Krishnaraj, “Drilling study on CFRP/Ti-6Al-4V stacks using chip breaker grooved drill,” (Eng.), *Materials and Manufacturing Processes*; [Electronic resource]. Available: p. 15. <https://doi.org/10.1080/10426914.2022.2030872>.
- [40] Z. C. Qi, E. N. Ge, J. L. Yang, F. C. Li, and S. F. Jin, “Influence mechanism of multi-factor on the diameter of the stepped hole in the drilling of CFRP/Ti stacks,” (Eng.), *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 113, no. 3-4, pp. 923-933, Mar. 2021. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06678-3>.
- [41] C. Li, J. Y. Xu, M. Chen, Q. L. An, M. El Mansori, and F. Ren, “Tool wear processes in low frequency vibration assisted drilling of CFRP/Ti6Al4V stacks with forced air-cooling,” (Eng.), *Wear*; Proceedings Paper vol. 426, pp. 1616-1623, Apr. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.01.005>.
- [42] N. Yasar, M. E. Korkmaz, M. K. Gupta, M. Boy, and M. Gunay, “A novel method for improving drilling performance of CFRP/Ti6Al4V stacked materials,” (Eng.), *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 117, no. 1-2, pp. 653-673, Nov. 2021. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07758-0>.
- [43] R. Hussein, A. Sadek, M. A. Elbestawi, and H. Attia, “The Effect of MQL on Tool Wear Progression in Low-Frequency Vibration-Assisted Drilling of CFRP/Ti6Al4V Stack Material,” (Eng.), *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 5, no. 2, p. 20, Jun. 2021, Art no. 50. <https://doi.org/10.3390/jmmp5020050>.
- [44] I. Rodriguez, D. Sorianoa, G. Ortiz-de-Zaratea, M. Cuestaa, F. Pušavecb, and P. J. Arrazola “Effect of Tool Geometry and LCO2 Cooling on Cutting Forces and Delamination when Drilling CFRP Composites Using PCD Tools,” *Procedia CIRP*, pp. 752-757, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.03.116>.
- [45] T. Wu *et al.*, “Experimental Analysis of Residual Stresses in CFRPs through Hole-Drilling Method: The Role of Stacking Sequence, Thickness, and Defects,” (Eng.), *Journal of Composites Science*, vol. 6, no. 5, p. 21, May 2022, Art no. 138. <https://doi.org/10.3390/jcs6050138>.
- [46] K. M. John and S. T. Kumaran, “A feasible strategy to produce quality holes using temperature-assisted drilling on CFRP,” (Eng.), *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 110, no. 11-12, pp. 3113-3127, Oct. 2020. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06089-w>.
- [47] A. Rodriguez, A. Calleja, L. N. L. de Lacalle, O. Pereira, A. Rubio-Mateos, and G. Rodriguez, “Drilling of CFRP-Ti6Al4V stacks using CO2-cryogenic cooling,” (Eng.), *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 64, pp. 58-66, Apr. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.01.018>.

[48] C. Agrawal et al., "Experimental investigation on the effect of dry and multi-jet cryogenic cooling on the machinability and hole accuracy of CFRP composites," (Eng.), *Journal of Materials Research and Technology-Jmr&T*, vol. 18, pp. 1772-1783, May–Jun., 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.03.096>.

Рекомендована кафедрою галузевого машинобудування ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 15.09.0223

Колесник Віталій Олександрович — канд. техн. наук, старший викладач кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів, e-mail: v.kolesnik@tmvi.sumdu.edu.ua ;

Лисенко Богдан Григорович — аспірант кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів;

Басов Вадим Васильович — аспірант кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів;

Довгополов Андрій Юрійович — канд. техн. наук, старший викладач кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів;

Некрасов Юрій Олександрович — аспірант кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів;

Панченко Андрій Васильович — аспірант кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів;

Ярош Віталій Юрійович — аспірант кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів.

Сумський державний університет, Суми

V. O. Kolesnyk¹
B. H. Lysenko¹
V. V. Basov¹
A. Yu. Dovgopolo¹
Yu. O. Nekrasov¹
A. V. Panchenko¹
V. Yu. Yarosh¹

Critical Analysis of the Current Trends in Ensuring the Holes Quality when Drilling CFRP/Titanium Alloy Stacks

¹Sumy State University

In recent decades, CFRP/titanium alloy stacks have become widespread in the production of aircraft components, as opposed to the use of separate FRP and metal alloys, which is due to the higher physical-mechanical and operational properties of the stacks compared to alloys. Along with the expansion of the scope of application of CFRP/titanium alloy stacks, the gross share of mechanical operations also increased, which is largely related to the need to connect CFRP layers with the layers of titanium or aluminum alloy. In this context, the most common machining operation is drilling holes. The simultaneous machining of stacks with different structures, chemical composition, and physic-mechanical properties raises a number of challenges for both researchers and engineers in terms of ensuring the economic accuracy and quality of the machining at the same time in the layers of CFRP and titanium alloy. Despite the large amount of research devoted to the drilling of CFRP /titanium alloy stacks, a comprehensive understanding of the basic parameters of drilling and their influence on the accuracy and quality of holes is insufficient.

This paper aims to provide a critical review of drilling mechanisms and their impact on machining parameters in the fabrication of holes in CFRP/titanium alloy stacks for the research and manufacturing communities. In this regard, a comprehensive analysis of the literature was conducted to summarize the current achievements in the field of stack machining. Aspects considered include the influence of cutting parameters and machining technologies, hole quality parameters. Particular attention was paid to the discussion of various parameters of drilling at the interface of the layers of the package, as well as the influence of different strategies and sequences of drilling on the results of drilling CFRP/titanium alloy stacks. In addition, current research shortcomings and future research trends are indicated. The review aims to provide the scientific and industrial community with a comprehensive understanding of stacks drilling mechanisms.

Keywords: drilling, CFRP/Ti alloy stack, quality, wear, cutting parameters, machining techniques.

Kolesnyk Vitalii O. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair of Manufacturing Technology, Machines and Tools, e-mail: v.kolesnik@tmvi.sumdu.edu.ua ;

Lysenko Bohdan H. — Post-Graduate Student of the Chair of Manufacturing Technology, Machines and Tools;

Basov Vadym V. — Post-Graduate Student of the Chair of Manufacturing Technology, Machines and Tools;

Dovgopolo¹ Andrii Yu. — Cand. Sc. (Eng.), Senior lecturer of the Chair of Manufacturing Technology, Machines and Tools;

Nekrasov Yurii O. — Post-Graduate Student of the Chair of Manufacturing Technology, Machines and Tools;

Panchenko Andrii V. — Post-Graduate Student of the Chair of Manufacturing Technology, Machines and Tools;

Yarosh Vitalii Yu. — Post-Graduate Student of the Chair of Manufacturing Technology, Machines and Tools