

**Олександр Дмитрович Петров<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>аспірант кафедри конструювання машин

Національний технічний університет України «КПІ» ім. Ігоря Сікорського (Київ, Україна)

E-mail: petrovsasha69@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9995-2246>

## **ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ОТВОРІВ У ДЕТАЛЯХ ІЗ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ СВЕРДЛАМИ З МОДИФІКОВАНИМИ РОБОЧИМИ ПОВЕРХНЯМИ**

*Стаття є оглядово-інформаційною. Тенденції останніх років у різних галузях машинобудування свідчать про дедалі ширше використання композиційних матеріалів (КМ). Серед широкого класу використовуваних КМ для виготовлення різноманітних деталей в авіа-, ракето-, суднобудуванні, енергетичному машинобудуванні значного поширення набули полімерні композиційні матеріали (ПКМ). Висока питома міцність, технологічність і жорсткість, порівняно низька собівартість роблять ПКМ незамінною альтернативою металевих матеріалів, які використовували раніше. Деталі та конструкції з ПКМ збираються з деталями та конструкціями з металевих матеріалів. Переважна більшість таких з'єднань виконують шляхом установки сполучних елементів (болтів, заклепок) у попередньо оброблені отвори, створюючи зокрема точкові механічні з'єднання. Основним технологічним чинником забезпечення надійності цих з'єднань насамперед є якість поверхні та точності одержаних отворів. Недотримання якісних параметрів може призвести до високих контактних навантажень, зниження ресурсу та руйнування конструкції (вузла). Технологічні процеси, що забезпечують якісні параметри отворів після механічної обробки, значною мірою залежать і визначаються використанням спеціального різального інструменту. Питання використання різального інструменту з модифікованими робочими поверхнями у вигляді дискретних ділянок для обробки деталей із полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) на сьогоднішній час достатньо не вивчене, тому є актуальним.*

**Ключові слова:** композитні матеріали (КМ); полімерні композитні матеріали (ПКМ); свердло; свердління; механічна обробка отворів; спеціальний ріжучий інструмент, якість отворів в деталях з ПКМ.

Рис.: 2. Табл.: 1. Бібл.: 14.

**Актуальність теми дослідження.** ПКМ є переважною альтернативою традиційним металевим матеріалам, у багатьох пріоритетних і наукомістких галузях машинобудування (авіа-, ракето-, судно-, енергетика, медицина, космос). Поверхні деталей з ПКМ можуть бути будь-якої вихідної складності та криволінійності. Використовуючи деталі з ПКМ, можна вирішити такі завдання, як підвищення міцності, корозійної стійкості, зниження ваги, зменшення радіолокаційної помітності тощо. Ціна виробництва деталей порівняно з металевими матеріалами зменшується через зниження частки механічної обробки та збільшення коефіцієнта використання матеріалу. При використанні деталей та конструкцій з ПКМ досягається збільшення ресурсу експлуатації у 2-5 разів, зниження маси конструкції та матеріаломісткості конструкції на 30...50 %, а також зниження трудомісткості виробництва на 20...40 % [1; 6]. Основний спосіб кріплення таких деталей і конструкцій із ПКМ, точкове механічне з'єднання (болтове/заклепувальне/шпилькове), при цьому виникає питання якості отриманих отворів, оскільки механічна обробка деталей із ПКМ має свою специфіку. Технологічний процес отримання якісного отвору деталей із ПКМ визначає наступну міцність та надійність з'єднання.

**Постановка проблеми.** Свердління є основною технологічною та найбільш трудомісткою операцією при механічній обробці деталей з ПКМ [1; 2; 10]. Важливою умовою є вибір різального інструменту та режимів різання, що дозволить на стадії технологічної підготовки виробництва керувати точністю та якістю поверхні отворів із забезпеченням високої продуктивності процесу свердління. Різальний інструмент, повинен забезпечувати необхідну точність і якість оброблюваної поверхні, мати високий опір зносу. Підвищення технологічності виготовлення дозволить знизити вартість інструменту і, як наслідок, вартість виробу з ПКМ. Тому питання щодо підвищення продуктивності інструменту та забезпечення якості оброблюваних отворів у ПКМ є актуальним.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Неоднорідність ПКМ, що складається з двох і більше компонентів, серед яких виділяють матрицю (основу, яка виконує роль зв'язника), що забезпечує спільну роботу армуючих елементів і наповнювача (уцільнювача, волокон та дисперсних частинок), який виконує функцію армування, з можливістю отримання заздалегідь поставлених характеристик [3]. Механічні властивості КМ можна адаптувати для конкретного застосування шляхом зміни розташування армуючих елементів та за рахунок зміни пропорції «армуючі елементи/зв'язник». Фізико-механічними характеристиками ПКМ, відмінні від металів, тому є відмінності в механічній обробці виробів з ПКМ. До таких властивостей належать: анізотропія; абразивна дія наповнювача на ріжучий інструмент; пружність матеріалу, що обробляється, збільшує сили тертя; низька теплопровідність ПКМ; термічна деструкція; висока твердість наповнювача та низька пластичність зв'язуючого (матриці).

На міцність волокнистого полімерного композитного матеріалу (ПКМ) впливає багато факторів, що спричинено анізотропією цього матеріалу. Один із важливих факторів, який впливає на міцність, - це направлення прикладеної сили  $F$  (по осі  $z$ ) відносно волокнистого, армуючого, наповнювача (рис. 1), направлення під кутом  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  та  $135^\circ$  ( $-45^\circ$ ).

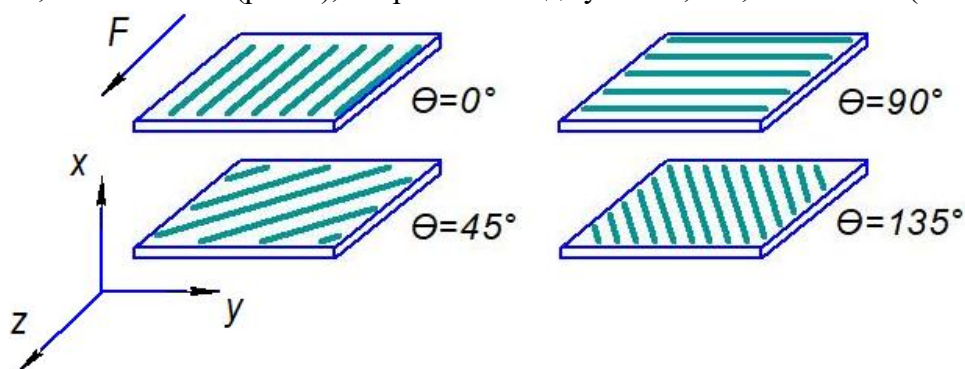


Рис. 1. Схема направлення волокон [6]

Питома міцність (межа міцності/густина) та жорсткість (модуль пружності/густина) високоміцного волокнистого наповнювача, особливо з вуглецю, вище ніж в інших матеріалах, у тому числі й металах, які застосовуються в аерокосмічній галузі. Це зумовлює найвищу структурну ефективність вуглепластиків у порівнянні з алюмінієвими та титановими сплавами. Поведінку композиту визначає співвідношення властивостей армуючих елементів і матриці, а також міцністю зв'язку між ними.

Ефективність та працездатність матеріалу залежить від правильного вибору вихідних компонентів та технології їх суміщення, призначеної забезпечити міцний зв'язок між компонентами при збереженні їхніх первісних характеристик. У результаті поєднання армуючих елементів і матриці утворюється комплекс властивостей композиту, який не тільки відображає вихідні характеристики його компонентів, а й включає у себе властивості, які ізольовані компоненти не мають. У полімерних композиційних матеріалах використовуються безперервні та короткі волокна діаметром  $(5 \dots 200) \cdot 10^{-6}$  м, які є армуючими елементами або є основою для виготовлення ниток, джгутів, стрічок і тканин із різними типами плетіння. Нині при виготовленні ПКМ переважно застосовують скляні, борні, вуглецеві та високомодульні органічні волокна. Полімерні композитні матеріали широко використовуються в аерокосмічній, літакобудівній, суднобудівній, автомобілебудівній галузях дають суттєві переваги в масі, міцності, довговічності виготовлених виробів. Можливість зменшення маси без втрати та/або покращення механічних та міцностних характеристики дозволяє впроваджувати нові конструкції та удосконалювати наявні.

Полімерні композитні матеріали мають певні властивості, що значно відрізняються від традиційних металів та сплавів за своїми механічними властивостями і водночас вони мають меншу вагу. Фізико-механічні властивості полімерних композитних матеріалів характеризуються здатністю матеріалу набувати заданих параметрів у всьому діапазоні функціональних властивостей за допомогою різноманітних технологічних процесів і це накладає вимоги до технології обробки та переробки. Попри вдосконалення попередніх технологічних методів, таких як пресування, лиття, намотка, найпоширенішим процесом формування виробів із волокнистих полімерних композитних матеріалів є механічна обробка абразивним та лезвійним інструментом.

У конструкціях із полімерних композитних матеріалів найчастіше використовуються заклепувальні та шпильково-болтові з'єднання. Вони є найпоширенішими видами з'єднання, які забезпечують міцність, якість і найголовніше це необхідна надійність і ресурс роботи конструкцій. У конструкціях літальних апаратів основним видом з'єднання силових вузлів, таких як лонжерони, шпангоути нервюри є заклепувальні з'єднання. Для утворення механічного точкового з'єднання дуже відповідальною операцією є одержання отвору, від якості якого багато в чому залежить міцність з'єднання загалом. Сучасні літальні апарати можуть містити сотні тисяч кріпильних елементів або винищувач, де встановлюється 200...300 тис. заклепок або транспортний літак 1,5...3,0 млн заклепок залежно від розміру. Для встановлення заклепок необхідно виготовити якісні отвори в деталях, що з'єднуються. Оскільки ресурс літального апарату пропорційно залежить від ресурсу планера, основна причина його руйнування - це руйнування втомі, до 80 % яких починаються в місцях з'єднань його елементів [1; 6]. Специфіка конструкції накладає певні обмеження щодо застосування стандартного обладнання, у зв'язку з чим широко використовують ручні свердлильні машини. Основний метод отримання отворів у складальних елементах – це свердління отворів. Лезова обробка композитних матеріалів використовується для доведення деталей та виробів до заданих розмірів, а також для досягнення необхідної точності та якості поверхні та отримання складних конфігурацій виробу. Проведення аналогій з механічною обробкою металів не дає бажаного результату, оскільки процес різання композитних полімерних матеріалів істотно відрізняється від процесу різання металів. Різання осьовим інструментом складається з простої кінематики процесу, а саме надання обертального руху інструменту з певною швидкістю різання, переміщення та із заданою подачею. Цей процес можна реалізувати як ручний, так і автоматизований, що у свою чергу робить свердління найпоширенішою і найбільш доступним методом обробки отворів. Найбільш поширеною і одночасно найбільш трудомісткою операцією при обробці ПКМ є свердління. Трудомісткість свердлильних операцій на деяких виробках досягає 70...80 % загальної трудомісткості процесу механічної обробки. Природно, що в цих умовах неправильний вибір різального інструменту та режимів різання призводить до значних витрат.

Найпоширенішими видами з'єднання в конструкціях з ПКМ є заклепувальні та шпильково-болтові з'єднання, які забезпечують міцність, якість, надійність та ресурс роботи конструкцій [1; 4]. Утворення механічного точкового з'єднання є відповідальною операцією, від якості отвору залежить міцність з'єднання. Якість отвору визначається виконанням наступних вимог: розмірна точність діаметрів отворів; просторове положення осі отвору щодо поверхні; шорсткість отриманої поверхні; відхилення від циліндричності отриманого отвору (точність форми); кромки отвору не повинні мати сколів, тріщин, розривів, розшарування.

За даними літературних джерел [8] до виробів з ВПКМ ставляться різні вимоги залежно від специфіки призначення виробу. Так, для наукоємних виробництв, до яких відноситься аерокосмічна галузь вимоги: до точності та шорсткості поверхні, отриманої при свердлінні - IT 10 – 11, Rz ≤ 80мкм.

Одним з основних параметрів, що характеризують процес різання виробів із полімерних композитних матеріалів, є абразивний вплив наповнювача на різальний інструмент. Наявність у зоні різання твердих складових (скляні, борні чи вугільні волокна) призводить до абразивного зношування інструменту. Пружність матеріалу, що обробляється, особливо склотекстоліту, сприяє зростанню сил тертя на поверхні інструменту, що контактує з обробленим матеріалом (головним чином на задній поверхні).

Теплопровідність полімерних композитних матеріалів дуже низька (порівняно з теплопровідністю сталі вона меншою в 500...600 разів). Це зумовлює слабе відведення теплоти зі стружкою та в оброблюваний виріб, тому при обробці полімерних композитних матеріалів основна частка теплоти відводиться через різальний інструмент. Дослідження, проведені авторами [5; 7], показують, що при обробці склопластиків сталевим інструментом йому передається 99,2...99,8 % тепла, що виділяється. Підвищення температури полімерних композитів в області, прилеглої до зони різання, змінює механічні властивості цього шару, причому тим інтенсивніше, чим нижче теплостійкість оброблюваного матеріалу. Властивості, притаманні волокнистим полімерним композитним матеріалам, які мають властивості низької теплостійкості, визначають особливості теплових явищ при різанні. Термодеструкція і розкладання для більшості композитних матеріалів настає за температури більше ніж 300 °С. Це спричиняє збільшення дефектного шару у вигляді припалу на обробленій поверхні та збільшення загальної кількості дефектів. Знизити температуру можна за рахунок використання нових інструментальних матеріалів, що мають високу теплопровідність і це дозволить відводити температуру в інструмент або застосування переривчастого різання.

**Мета і задачі дослідження.** Метою цих досліджень є пошук шляхів забезпечення точності та якості отворів у деталях з ПКМ при обробці різанням.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Визначити критерії оцінки якості отворів.
2. Дослідити фактори, що впливають на показники точності та якості отворів.
3. Дослідити умови підвищення ефективності механічної обробки та забезпечення якості отворів у деталях із ВПКМ інструментом з модифікованими робочими поверхнями.

**Матеріали та методи дослідження.**

Основний показник оброблених отворів – це їхня якість, він включає: розмірну точність діаметрів отворів, точність форми, взаємне розташування отворів, шорсткість поверхонь. Отримана шорсткість повною мірою не забезпечує інформацією про якість обробленої поверхні. Аналіз явищ, супутніх процесам різання полімерних композитних матеріалів, показує, що простий перенос закономірностей процесу різання металів для цих матеріалів неприпустимий. Необхідно враховувати природу полімерних композитних матеріалів, їхню структуру та властивості. При затупленні інструменту - через низьку адгезію сполучного з армуючим волокном при збільшенні сил різання утворюються тріщини між волокном і матрицею, відбувається викрашування матриці з оброблюваної поверхні виробу, особливо в місцях входу та виходу інструменту, що позначається на якості обробки. Складна структура призводить до того, що при підвищених зносах інструменту відбувається розшарування матеріалу. Крім того, при перерізанні армуючих волокон, особливо при перехресному армуванні, спостерігається розпушування переріжаних волокон, що погіршує якість обробленої поверхні і змушує іноді застосовувати додаткову операцію доведення. У деталях з волокнистого полімерного композитного матеріалу, традиційно використовувани параметри шорсткості обробленої поверхні не забезпечують повної інформації про мікрорельєф і якість поверхні отворів унаслідок наявності, ворсистості – виступання над поверхневим шаром незрізаних волокон волокнистого наповнювача. Характерним пошкодженням поверхонь отворів у деталях із волокнистого

полімерного композитного матеріалу являються міжшарові тріщини та термічна деструкція. Види пошкоджень поверхні отворів з волокнистого полімерного композитного матеріалу розглянуті [2; 3; 4; 5; 6; 7] (табл. 1).

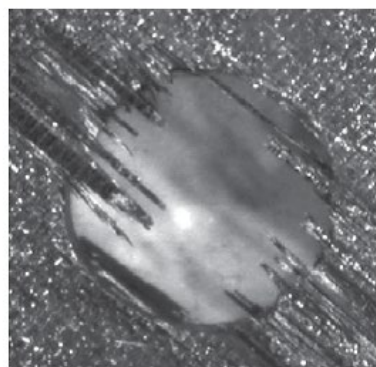
*Таблиця 1 – Види пошкоджень поверхні отворів із волокнистого полімерного композитного матеріалу*

Вид пошкодження	Характеристика	Причина виникнення
Розшарування зовнішніх шарів у поверхні врізання ріжучого інструменту	Рівномірне розшарування шарів на поверхні врізання інструменту	Сила різання, діюча зі сторони стрічки й перемички, більша міцність міжшарового зв'язку верхнього шару
Розшарування зовнішніх шарів у поверхні виходу ріжучого інструменту	Частина волокон на виході інструменту з отвору залишається незрізаною	Не зрізання нижнього шару через його деформацію і відшарування
Міжшарові тріщини	Формування міжшарових тріщин багатшарового ВПКМ в середині отвору	Осьова сила різання, велика міцність міжшарового зв'язку
Витягування волокон	Витягування волокон з матриці	Незначна адгезія волокон до матриці за умов дії осьової сили
Сколювання кромки	Мікроруйнування кромки отвору	Підвищена крихкість, вібрації при різанні
Термічна деструкція	Пошкодження поверхні отвору через підвищену температуру	Температура різання вища за допустиму

Розглядаючи параметри якості оброблених отворів при свердлінні полімерних композитних матеріалах визначаємо основну особливість це виникнення осьової сили, вздовж осі отвору, що призводить до розшарування на вході та виході інструменту, утворення міжшарових тріщин. Розшарування - це характерний вид пошкодження отворів із полімерних композитних матеріалів, коли сили різання прагнуть відірвати один шар від іншого оскільки дії сили різання часто прикладено перпендикулярно до площини армування. Також до полімерних композитних матеріалів застосовують показники пошкоджуваності оброблених отворів, до яких належать: відколи кромки отворів, витягування волокон, ворсистість, термічна деструкція, розпушування волокон та інших ушкоджень отворів. Як уже було зазначено, характерним видом пошкодження отворів в деталях з волокнистих полімерних композитних матеріалів являється розшарування. Попри різні механізми виникнення дефекту розшарування, зрештою вони призводять до порушення цілісності структури волокнистих полімерних композитних матеріалів. Залежно від причини виникнення дефекту розглядають розшарування зовнішнього шару на поверхні врізання ріжучого інструменту(рис. 2, а) та розшарування зовнішнього шару на поверхні виходу ріжучого інструменту(рис. 2, б).



а



б

Рис. 2. Дефекти обробленої поверхні

Цей вид пошкодження відрізняється від міжшарової тріщини тим, що формується виключно на зовнішніх шарах волокнистих полімерних композитних матеріалів. До основних причин розшарування навіть при обробці «гострим» інструментом (свердлом) можна віднести: при розшаруванні зовнішнього шару на поверхні врізання ріжучого інструменту – наявність перемички в інструмента та негативних передніх кутів у цій зоні, а також велика подача; при розшаруванні зовнішнього шару на поверхні виходу ріжучого інструменту, переважно велика подача. Додатково розшарування зовнішніх шарів у поверхні врізання ріжучого інструменту виникає через дію сил, притискаючих верхні шари волокнистих полімерних композитних матеріалів. Частина зрізаного матеріалу, тобто формована стружка, починає намотуватись (закручуватись) у стружку вивідних канавках свердла й ущільнювати ще до того, як він буде повністю відділено від відповідного слою волокнистого полімерного композитного матеріалу, як наслідок, у зоні контакту обробленої поверхні виникають відносно великі сили тертя, особливо за великої подачі. Ці сили призводять до того, що переміщується вздовж стружкової канавки досить сильно ущільнена частина зрізаного шару, впливає на верхні шари заготовки, які в цій зоні утримуються тільки силами міжшарових зв'язків та прагне їх розділити.

Таким чином, схильність до розшарування біля поверхні врізання визначається властивостями оброблюваного та інструментального матеріалів, режимом різання, конструкцією інструменту і величинами діючих сил різання, в першу чергу осьових. Розшарування зовнішніх шарів біля поверхні виходу ріжучого інструменту - пошкодження, яке відбувається в міжшарових областях нижніх шарів волокнистих полімерних композитних матеріалів при виході різального інструменту з контакту з шаруватою заготовкою. За певних умов напруження, що виникає в результаті дії осьової сили різання, може перевищувати міцність міжшарових зв'язків у ще повністю незрізаних шарах формованого отвору.

Під дією осьової сили ще незрізані шари згинаються, що призводить до порушення умови міцності між шарами, формування та поширення тріщини в міжшаровому просторі й до розриву адгезійних зв'язків між окремими шарами та розшарування незрізаних шарів листа волокнистого полімерного композитного матеріалу. Експерименти показали, що розшарування при свердлінні найбільш активно відбувається в момент впливу поперечної ріжучої кромки на шари, що попереду лежать («нижні») і її виходу з контакту з заготовкою. Експериментально доведено [9], що при свердлінні розшарування біля поверхні врізання набагато менше, ніж у поверхні виходу з отвору. Розшарування зовнішніх шарів сприяє не зрізанню волокнистого наповнювача, особливо якщо на поверхні листа волокнистого полімерного композитного матеріалу присутній односпрямований шар. Тому пов'язані з розшаруванням ушкодження вздовж отвору нерівномірні. Область пошкодження навколо отвору має частково еліптичну форму, причому велика вісь цього еліпса орієнтується вздовж напрямку волокон. Незрізані волокна можуть спостерігатися на поверхні входу свердла в заготовку, так і на поверхні виходу свердла з отвору. Залежно від властивостей волокон оброблюваного листа волокнистого полімерного композитного матеріалу та схеми їх укладання ушкодження можуть мати вигляд задирок та/або розпушених волокон [8]. Задирки є окремими незрізаними волокнами достатньо правильної форми, а розпушування - відносно велика кількість незрізаних волокон по периметру отвору. Розпушування зазвичай виникає в області різання з гострим кутом направлення волокон відносно ріжучої кромки в умовах коли обробка виконується інструментом зі збільшеним радіусом скруглення ріжучої кромки.

На точність впливають пружна деформація системи під дією сили різання та пружне відновлення обробленого матеріалу, усадка обробленого отвору характерна особливість обробки полімерних композитних матеріалів. Зменшення радіуса ріжучої кромки зменшує залишкову деформацію отворів [9; 10], та/або збільшують задні кути. Зношування

інструменту призводить до збільшених сил різання, збільшення задирки, розшарування, термічної деструкції, збільшення шорсткості. Великий вплив на точність і якість обробленої поверхні, стійкість і міцність інструменту мають геометричні параметри ріжучого інструменту. Вибір їх оптимальних величин має велике практичне значення. Основними геометричними параметрами ріжучої частини свердла є: кут при вершині  $2\phi$ ; задній кут  $\alpha$ ; передній кут  $\gamma$ . Рекомендовані форми заточування різальної частини свердла зі швидкорізальних і твердосплавних сталей розглянуті [12]. Найбільший вплив на якість оброблених отворів та знос свердлів надає кут при вершині свердла  $2\phi$ . Зі зменшенням цього кута знижується осьова сила, збільшується довжина ріжучої кромки, а отже, питомий тиск на одиницю довжини ріжучої кромки стає менше, а це у свою чергу призводить до меншого зношування свердла. Однак надмірне зменшення кута  $2\phi$  впливає на тепловідведення, що призводить до перегріву свердла та погіршенню якості отвору. Тільки розгортання та свердління по кондуктору дозволяє більш точно виконувати отвори. Зі збільшенням заднього, кута  $\alpha$  відбувається зменшення тертя по задній грані, що сприяє меншому викрашуванню матриці і, як наслідок, підвищенню чистоти кромки отворів. Однак при значному збільшенні відбувається погіршення чистоти отвору. Зі збільшенням переднього кута  $\gamma$  шорсткість отворів збільшується. У стандартних свердел здебільшого передні кути великі, що й викликає розшарування кромки отворів, особливо у момент виходу свердла з отворів. Неправильно вибрані геометричні параметри свердла та робота з великим його зносом різко погіршують якість оброблюваної поверхні отвору. Під якістю поверхні маються на увазі не тільки шорсткість обробленої поверхні, а і стан отворів на вході та виході свердла, а також точність обробленої поверхні. На вході свердла, особливо при свердлінні у напрямку, перпендикулярно армуючим волокнам, можуть з'являтися розпушування матеріалу. На виході свердла з'являються розшарування та сколи. Висока пружність полімерних композитних матеріалів призводить у процесі свердління до пружного стискаючої навантаження по всій довжині ріжучої частини свердла. Після вилучення свердла стискаючі навантаження зникають, і матеріал, після пружної деформації, відновлюється, що призводить до зменшення діаметра отвору.

Пружне відновлення залежить не лише від характеристик оброблюваного матеріалу, але і від геометричних параметрів свердла, сил різання, режимів обробки. При застосуванні свердел оптимальної геометрії може бути зведено до мінімуму. У зв'язку з цим рекомендується збільшувати діаметр свердла в порівнянні з необхідним діаметром отвору. З іншого боку, биття свердла і шпинделя свердлильного верстата впливає на точність обробки в значно більшою мірою, ніж явище усадки отвору. Дослідження, проведені в роботах [9], дозволяють зробити висновок про те, що при виборі діаметра свердла немає потреби враховувати пружне відновлення матеріалу, оскільки, по-перше, воно компенсується розбиванням отвору за рахунок биття свердла та шпинделя, по-друге, допуск 11...12 квалітетів досить великий і діаметри просвердлених отворів не вийдуть за межі.

На точність отвору впливають технологічні умови свердління - за розміткою або кондуктором. При свердлінні за кондуктором дещо зменшується биття, що призводить до підвищення точності свердління. Однак практично за будь-яких технологічних умов свердління отворів у ПКМ швидкорізальними та твердосплавними свердлами забезпечує отримання отворів 11...12 квалітетів з шорсткістю  $Rz = 20...40$  мкм.

При оптимальній геометрії свердла якість поверхні визначається шорсткістю, яка залежить від режимів різання та інших факторів. Проведені у роботах [6] дослідження дозволяють зробити висновок, що збільшення подачі та діаметра свердління призводить до погіршення шорсткості поверхні. На якість отвору (особливо на вході та виході ріжучого інструменту) впливає і знос свердла. Роботи ряду дослідників [12; 13; 14] показують, що при зносі свердла позадньої поверхні  $h_3 = 0 - 0,15$  мм параметр шорсткості мало змінюється і становить  $Rz = 20 - 40$  мкм.

Однак при  $h_3 > 0,15$  мм спостерігається суттєве розшарування матеріалу, особливо на вході свердла. На виході свердла спостерігаються розшарування або відколи оброблюваного матеріалу.

Збільшення швидкості різання та подачі призводить до зниження стійкості, причому найбільш сильний вплив на зміну стійкості надає швидкість різання. В основному зношування інструменту при обробці композитів відбувається по задній поверхні інструменту внаслідок пружного відновлення матеріалу. Знос по передній поверхні інструменту незначний і є наслідком абразивного зносу матеріалу заготовки, що руйнується, а також тертя стружки по передній поверхні і значних температур в зоні різання. Головною умовою при різанні композитів є гострота ріжучої кромки інструменту, яка повинна запобігти будь-якому тертю між інструментом і заготовкою. На теперішній час багато досліджень присвячені пошуку нових видів обробки різанням, таким як, наприклад, гідрорізання та ультразвукового різання [10], застосування нових прогресивних схем різання – із застосуванням реверсивного руху [11], дослідженню та розробки нових конструкцій та геометрії різального інструменту [10; 11], визначенню оптимальних режимів обробки, нових інструментальних матеріалів та покриттів на різальний інструмент для обробки волокнистих полімерних композитних матеріалів. Однак у більшості випадків із прагненням підвищити якість обробки виробів із волокнистих полімерних композитних матеріалів знижується продуктивність, а використання нових альтернативних методів обробки потребує залучення допоміжного обладнання, та пристосувань, що в кінцевому випадку вплине на собівартість виробу.

При збільшенні сил різання та затуплені інструменту утворюються тріщини між волокном і матрицею, відбувається викрашування матриці з оброблюваної поверхні виробу, особливо в місцях входу та виходу інструменту.

Експерименти [4; 5] показали, що розшарування при свердлінні найбільш активно відбувається в момент впливу поперечної ріжучої кромки на шари, що лежать попереду («нижні») і її виходу з контакту із заготовкою. Пов'язані з розшаруванням ушкодження вздовж отвору нерівномірні. Область пошкодження навколо отвору має частково еліптичну форму [5; 10]. На точність впливають пружна деформація системи під дією сили різання та пружне відновлення обробленого матеріалу, усадка обробленого отвору характерна особливість обробки полімерних композитних матеріалів. Зменшення радіуса ріжучої кромки та/або збільшення заднього кута зменшує залишкову деформацію отворів [4; 8]. Зношування інструменту призводить до збільшених сил різання, збільшення задирок, розшарування, термічної деструкції, збільшення шорсткості. Здебільшого зношування інструменту при обробці композитів відбувається по задній поверхні інструменту внаслідок пружного відновлення матеріалу. Знос по передній поверхні інструменту незначний і є наслідком абразивного зносу матеріалу заготовки, що руйнується, а також тертя стружки по передній поверхні та значних температур у зоні різання.

Термодеструкція і розкладання для більшості ПКМ наступає за температури більше ніж  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , збільшення дефектного шару у вигляді припалу та збільшення загальної кількості дефектів. Знизити температуру можна за рахунок використання нових інструментальних матеріалів, що мають високу теплопровідність і це дозволить відводити температуру в інструмент або застосування переривчастого різання.

Використання швидкорізальних сталей обмежене через слабкий опір абразивному зношуванню, що ускладнює зрізання волокон у результаті чого спостерігається їх виривання з матриці та розшарування. З метою підвищення продуктивності використовують нанесення покриттів у різний спосіб, таких як CVD, PVD. Великий вплив на точність і якість обробленої поверхні, стійкість і міцність інструменту мають геометричні параметри ріжучого інструменту. Основними геометричними параметрами ріжучої частини



свердла  $\epsilon$ : кут при вершині  $2\phi$ ; задній кут  $\alpha$ ; передній кут  $\gamma$ . Найбільший вплив на якість оброблених отворів та знос свердла надає кут при вершині свердла  $2\phi$ . Зі зменшенням кута  $2\phi$  знижується осьова сила, збільшується довжина ріжучої кромки. Надмірне зменшення кута  $2\phi$  впливає на тепловідведення, що призводить до перегріву свердла та погіршенню якості отвору. Зі збільшенням заднього, кута  $\alpha$  відбувається зменшення тертя по задній грані, що сприяє меншому викрашуванню матриці і, як наслідок, підвищенню чистоти кромки отворів. Однак при значному збільшенні відбувається погіршення чистоти отвору. Зі збільшенням переднього кута  $\gamma$  шорсткість отворів збільшується.

**Висновки.** У вітчизняній та зарубіжній літературі практично відсутні систематизовані відомості про механічну обробку отворів в деталях з ПКМ.

А саме:

- відсутність методик розрахунку, що визначають вплив температурних факторів процесу різання на точність отворів деталей з ПКМ;

- відсутність коректних моделей, що описують вплив режимів різання на якість поверхні та точність отворів залежно від матеріалу та геометрії інструменту в деталях із ПКМ;

- відсутність різних конструкцій інструменту (свердла) для обробки ПКМ вітчизняного виробництва, серійного виконання. Весь інструмент має дуже високу вартість і не гарантує отримання необхідної точності отворів;

- відсутні також рекомендації щодо вибору різальних інструментів, обладнання та оптимальних режимів обробки.

Нині на підприємствах, що спеціалізуються на виробництві виробів з ПКМ, такі види механічної обробки, як свердління виробляються найчастіше лезовим осьовим інструментом. У результаті проведення науково-технічних досліджень та патентних досліджень виявлено, що технічний рівень підготовки різального інструменту для обробки ПКМ, не до кінця досліджений.

Проведений аналіз існуючих рішень та методів обробки для підвищення та забезпечення якості оброблюваної поверхні показав, що одним із перспективних напрямів вирішення проблеми є дослідження щодо модифікування робочої поверхні свердла шляхом нанесення на нього покриття дискретного типу є актуальним.

### Список використаних джерел

1. Martin, R. Reducing Costs in Aircraft: The Metals Affordability Initiative Consortium / R. Martin, D. Evans // *Journal of Operations Management*. – 2000. – Vol. 52, № 3. – Pp. 24-28.
2. Drilling of composite structures / F. Lachaud, R. Piquet, F. Collombet, L. Surcin // *Composite Structures*. – 2001. – Vol. 52. – Pp. 511-516.
3. Faria P. E. Dimensional and Geometric Deviations Induced by Drilling of Polymeric Composite / P. E. Faria, J. C. Campos Rubio, A. M. Abrao // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. – 2009. – Vol. 28, № 19. – Pp. 2353-2364.
4. Sheikh-Ahmad, J. Y. Machining of Polymer Composites / J. Y. SheikhAhmad. – *Technology & Engineering*, 2008. – 230 p.
5. Campbell, F. C. Manufacturing Processes for Advanced Composites / F. C. Campbell // *Elsevier Science*. – 2004. – № 1. – 532 p.
6. Механическая обработка композиционных материалов при сборке летательных аппаратов (аналитический обзор): монография / Д. В. Криворучко, В. А. Залогова, В. А. Пасечник, В. А. Колесник, С. С. Емельяненко. – Сумы, 2013. – 272 с.
7. Лабунець, В. Ф. Перспективи використання композиційних матеріалів в авіакосмічній галузі / В. Ф. Лабунець, Є. В. Корбут, Ю. І. Адаменко // *Проблеми тертя та зношування*. – 2011. – Вип. 56. – С. 89-96.
8. Тарасюк, А. П. Технологии механической обработки полимерных композитов: монография / А. П. Тарасюк, О. Л. Кондратюк, Н. В. Везуб. – Харьков : Точка, 2015. – 226 с.

9. Тарасюк, А. П. Вибір раціональних умов різання полімерних композитів, що забезпечують максимальні показники якості поверхні / А. П. Тарасюк // Вісник Сумського державного університету. Сер. : Технічні науки. – 2012. – № 4. – С. 155-161.
10. Wang, X. Investigation on trust in vibration drilling of fiber-reinforced plastics / X. Wang, I. Wang // *Journal Mater. Process. Technol.* – 2004. – Vol. 1486. – Pp. 239-244.
11. Comparison of Tool Effects on Hybrid Laminates after Drilling / L. M. Durao, J. M. Tavares, A. T. Marques [ et al.] // 5th International Conference on Mechanics and Materials in Design. – Porto, 2006. – Pp. 1-14.
12. Kim, D. Drilling process optimization for graphite/bismaleimide–titanium alloy stacks / D. Kim, M. Ramulu // *Composite Structures.* – 2004. – Vol. 63, № 1. – Pp. 101-114.
13. Лупкин Б. В. Сверление ПКМ сверлами с подрезающими режущими кромками / Б. В. Лупкин, О. М. Кошкина, А. Л. Касс // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2011. – № 49. – С. 68-80.
14. Проблеми ефективного впровадження процесів високошвидкісного різання / Ю. Н. Внуков, И. Н. Павлюченко, К. О. Папашев, А. Г. Саржинская // Сучасні технології в машинобудуванні. – 2006. – Т. 1. – С. 43-57.

### References

1. Martin, R., & Evans, D. (2000). Reducing costs in aircraft: The Metals Affordability Initiative Consortium. *Journal of Operations Management*, 52(3), 24–28.
2. Lachaud, F., Piquet, R., Collombet, F., & Surcin, L. (2001). Drilling of composite structures. *Composite Structures*, 52, 511–516.
3. Faria, P. E., Campos Rubio, J. C., & Abrao, A. M. (2009). Dimensional and geometric deviations induced by drilling of polymeric composite. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 28(19), 2353–2364.
4. Sheikh-Ahmad, J. Y. (2008). *Machining of polymer composites*. Technology & Engineering.
5. Campbell, F. C. (2004). *Manufacturing processes for advanced composites* (Issue 1). Elsevier Science.
6. Kryvoruchko, D. V., Zaloga, V. A., Pasechnik, V. A., Kolesnyk, V. A., & Emelyanenko, S. S. (2013). *Mekhanicheskaya obrabotka kompozitsionnykh materialov pri sborke letatel'nykh apparatov (analiticheskii obzor) [Mechanical processing of composite materials during the assembly of aircraft (analytical review)]*. Sumy.
7. Labunets, V. F., Korbut, Ye. V., & Adamenko, Yu. I. (2011). Perspektyvy vykorystannya kompozytsiynykh materialiv v aviakosmichniy haluzi [Prospects for the use of composite materials in the aerospace industry]. *Problemy terya ta znoshuvannya – Friction and wear problems*, 56, 89–96.
8. Tarasyuk, A. P., Kondratiuk, O. L., & Verezub, N. V. (2015). *Tekhnolohiya mekhanichnoyi obrobky polimernykh materialiv [Technology of Mechanical Processing of Polymer Materials]*.
9. Tarasyuk, A. P. (2012). Vybir ratsionalnykh umov rizannya polimernykh kompozytiv, shcho zabezpechuyut maksymalni pokaznyky yakosti poverkhni [Selection of rational conditions for cutting polymer composites that provide maximum surface quality indicators]. *Visnyk SumDU, Seriya "Tekhnichni nauky" – Bulletin of Sumy State University, Series "Technical Sciences"*, 4, 155–161.
10. Wang, X., & Wang, I. (2004). Investigation on trust in vibration drilling of fiber-reinforced plastics. *Journal of Materials Processing Technology*, 148(6), 239–244.
11. Durao, L. M., Tavares, J. M., Marques, A. T., et al. (2006). Comparison of tool effects on hybrid laminates after drilling. In *5th International Conference on Mechanics and Materials in Design* (pp. 1–14). Porto.
12. Kim, D., & Ramulu, M. (2004). Drilling process optimization for graphite/bismaleimide–titanium alloy stacks. *Composite Structures*, 63(1), 101–114.
13. Lupkin, B. V., Koshkina, O. M., & Kass, A. L. (2011). Kass Sverdlinnya PKM sverdlami z pidrizuyuchymy rizuchymy kromkami [Kass PCM drilling with drills with undercutting cutting edges]. *Viddkryti informatsiyni ta kompyuterni intehrovani tekhnolohiyi – Open information and computer integrated technologies*, 49, 68–80.

14. Vnukov, Yu. N., Pavlyuchenko, I. N., Papashev, K. O., & Sarzhynska, A. H. (2006). Problemy efektyvnoho vprovadzhennya protsesiv vysokoshvydkisnoho rizannya [Problems of effective implementation of high-speed cutting processes]. *Suchasni tekhnolohiyi v mashynobuduvanni – Modern technologies in mechanical engineering*, 1, 43–57.

Отримано 19.12.2024

UDC 621.891

**Oleksandr Petrov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>PhD student at the Department at the Machine Design

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [petrovsasha69@gmail.com](mailto:petrovsasha69@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9995-2246>

## **ENSURING THE QUALITY OF HOLES IN PARTS MADE OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS WITH DRILLS WITH MODIFIED WORKING SURFACES**

*The article is an overview and information. Trends in recent years in various branches of mechanical engineering indicate the increasingly widespread use of composite materials (CM). Among the wide class of CM used for the manufacture of various parts in aircraft, rockets, shipbuilding, and power engineering, polymer composite materials (PCM) have become widely used. High specific strength, manufacturability and rigidity, and relatively low cost make PCM an indispensable alternative to metal materials used earlier. Parts and structures made of PCM are assembled with parts and structures made of metal materials. The vast majority of such connections are made by installing connecting elements (bolts, rivets) in pre-machined holes, creating, among other things, point mechanical connections. The main technological factor for ensuring the reliability of these connections is, first of all, the quality of the surface and the accuracy of the holes obtained. Failure to comply with quality parameters can lead to high contact loads, reduced service life, and destruction of the structure (unit). Technological processes that ensure the quality parameters of holes after machining are largely dependent and determined by the use of a special cutting tool. The issue of using cutting tools with modified working surfaces in the form of discrete areas for machining parts made of polymer composite materials (PCM) has not been sufficiently studied to date, therefore it is relevant.*

**Keywords:** composite materials (CM); polymer composite materials (PCM); drill; drilling; machining of holes; special cutting tool, quality of holes in PCM parts.

Fig.: 2. Table: 1. References: 14.