

Колесник В.О., Лисенко Б.Г., Нешта А.О., Забара М.О.
Сумський державний університет**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ НА ШОРСТКІСТЬ ОБРОБЛЕНОЇ ПОВЕРХНІ ПРИ СВЕРДЛІННІ ОТВОРІВ У ПАКЕТАХ «ВУГЛЕПЛАСТИК/ ТИТАНОВИЙ СПЛАВ»**

В даний час свердління пакетів вуглепластик / титановий сплав все ще є одним із найбільш широко використовуваних методів механічної обробки для виготовлення отворів для кріплення вузлів у цивільних літаках. Низька оброблюваність матеріалів пакету обумовлена поєднанням анізотропної структури композиційного матеріалу, високої твердості та міцності титанового сплаву. Це створює виклики у механічній обробці подібних з'єднань, що пов'язано з труднощами вибору раціональних режимів різання як для шару вуглепластику та і для шару титанового сплаву. Одним з аспектів механічної обробки пакетів вуглепластик/ титановий сплав є необхідність забезпечення задовільних параметрів шорсткості поверхні отворів. У цій роботі досліджувалися вплив технологічних факторів на шорсткість обробленої поверхні отворів. У ході експериментального дослідження контрольованими параметрами були температура свердління та шорсткість поверхні. Вимірювання температури свердління здійснювалося у режимі реального часу за допомогою спеціально розробленого пристрою WICUTEM, що апаратно поєднує метод штучної термопари та технологію Bluetooth для бездротової передачі даних. Контроль шорсткості здійснювався за допомогою профілографічного методу на профілографі SurfCOM 5000. Експериментальна установка була реалізована на базі 5 координатного фрезерного оброблювального центру DMU 85V. Планування експерименту здійснювалося за методикою Тагучі, на основі ортогонального масиву L_8 , шляхом варіювання факторів швидкості різання та подачі на трьох рівнях. Результати показують, що при обробці шару вуглепластику значення аналізованих параметрів шорсткості підпорядковуються тренду до збільшення параметрів при збільшенні подачі, в той час як при свердлінні шару титанового сплаву навпаки до зниження, за винятком тих що стали локальними мінімумами.

Ключові слова: пакети вуглепластик/титановий сплав; метод штучної термопари, температура свердління; шорсткість поверхні.

ВСТУП

Свердління - це найпоширеніша механічна операція при виготовленні отворів для з'єднання компонентів літальних апаратів. Хоча питання забезпечення якості отворів у пакетах вуглепластик/ метал знаходиться в центрі досліджень протягом останніх 15 років, свердління отворів в пакетах за один прохід все ще залишається складним завданням. Якість отворів у пакетах вуглепластик/титановий сплав характеризується такими параметрами: титановий сплав - шорсткість поверхні (R_a) [1], розмірна точність отвору, геометрична точність (відхилення від круглості) [2], розмір вихідної задирки [3]; а у вуглепластику - коефіцієнтом розшарування (F_d) [4,5], значенням термічного руйнування та коефіцієнтом пошкодження (Q_d) [6]. У експериментальних дослідженнях найчастіше вимірюються осьова сила (F , Н) [1,5], крутний момент (M_c , Н·мм) [1,5], температура різання (T , °С) [7-14], механізм формування стружки [14,15], а також такі технічні параметри, як фаска зношування [16,17] та період стійкості інструменту [18]. Вищезазначені параметри як правило використовуються для пояснення фізичної природи впливу режимів різання [3,19], геометрії інструменту [20] та матеріалу інструменту, а також впливу технологічних середовищ [7,21-23] на показники якості отворів. При свердлінні пакету титановий сплав/ вуглепластик/ алюмінієвий сплав було виявлено, що подача (0,05-0,15 мм/об) має значний вплив на осьову силу на рівні 40% у титановому сплаві, 31% у вуглепластику та 20 % у алюмінієвому сплаві, а також на крутний момент на рівні 72% в титановому сплаві і 24% в алюмінієвому сплаві [3]. При дослідженні впливу різних режимів роботи було встановлено, що свердління пакету вуглепластик/ титановий сплав зі швидкістю різання $v = 45$ м/хв та подачею $f = 0,09$ мм/об свердлом з головним кутом в плані 130° та кутом підйому гвинтової лінії 20° забезпечить діаметр отвору відповідно до Н9 і відхиленням від круглості 0,015 мм. Було визначено, що основним значущими факторами, що впливали на розшарування вуглепластику, є подача [18,24,25] та головний кут у плані [19,25], хоча на розмір задирок у титановому сплаві в основному впливає хвилинна подача [26], інструментальний матеріал [26], та зношення інструментів [17]. Вплив зношення інструменту може бути зменшений за допомогою техніки малого змащення (MQL) [7,27,28], криогенного свердління (LN_2) [16,29], вібраційного свердління (VAD) [21] та ультра швидкісного свердління (UAD) [9,22]. За дослідженням Бенезеха та ін. [20], було визначено, що оптимальна геометрія свердла для обробки пакету вуглепластик/алюмінієвий сплав складає - $2\phi = 135^\circ$, $\omega = 30^\circ$. Ще одним важливим фактором,

який впливає на діаметр отвору незалежно від швидкості різання, є конструкція стрічки допоміжної різальної кромки свердла [23]. Було визначено, що свердло з потрійною стрічкою може створювати більш точні отвори за рахунок зменшення вібрацій через збільшення контакту з оброблюваною поверхнею [14]. Значний інтерес для вивчення фізики процесу різання при свердлінні пакетів являє вимірювання температури різання та температурного градієнту.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Наразі відомі способи та методи вимірювання температури різання можна класифікувати за методами вимірювання на калориметричні, термопари [10,12-14,17], термографічні методи [7,10,11,13,15,21,22]. Найпоширенішими методами вимірювання температури різання при обробці пакетів є термографічний метод та вимірювання за допомогою термопари.

При порівняльному дослідженні експериментального та чисельного моделювання фрезерування вуглепластика фрезами різного типу термографічним методом було виміряно, що температура фрези досягає 250 °С незалежно від типу фрези, швидкості різання та подачі. За допомогою термопари, вбудованої в заготовку вуглепластик, було виявлено, що лише 16% теплової енергії перемістилося в заготовку, від 30% до 46% у фрезу, а решта була відведена у стружку та повітря [13]. Під час фрезерування одно-направленого вуглепластика з орієнтацією волокна, від 0 ° до 135 °, з сферичною фрезою Ø10 мм з різною швидкістю різання (200 - 375 м/хв) і подачею (0,063 мм/об), температура фрези була виміряна за допомогою термопари типу К. Діаметри свердла коливаються від 4,09 мм до 12,94 мм, швидкість різання коливається від 38 м/хв до 112 м/хв, швидкість подачі 0,07 мм/об до 0,17 мм/об. Було визначено, що підвищення температури свердління призводить до збільшення відхилення розміру отвору незалежно від високої подачі через погані умови видалення стружки [11]. Було визначено, що температура свердління знижується залежно від подачі для вуглепластику (122 °С - 85 °С) та збільшується у шарі титанового сплаву (180°С - 260°С) [14], що пов'язано з низькою теплопровідністю титанового сплаву [15]. Проаналізувавши результати наукових досліджень процесу свердління пакетів вуглепластик /титановий сплав можна зробити висновок, що вплив режимів різання на шорсткість поверхні у шарах пакету залишається мало вивченим.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є дослідження впливу режимів різання на шорсткість обробленої поверхні отворів пакетах вуглепластик/ титановий сплав, що дозволить поглибити розуміння можливих резервів для технологічного забезпечення якості отворів. Для досягнення поставленої мети було розроблено методику експериментального дослідження, що дозволила забезпечити варіювання режимів різання згідно матриці планування експерименту. Крім того було запропоновано методику вимірювання температури свердління, що була реалізована за допомогою бездротового пристрою WICUTEM, що дозволяє у режимі реального часу відстежувати варіації температури свердління в залежності від режимів різання. Шорсткість поверхні вимірювалось профілографічним методом.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Експериментальне дослідження впливу режимів різання на шорсткість оброблювальної поверхні здійснювалося при свердлінні пакету вуглепластик/титановий сплав. Шар вуглепластику, що було використано у пакетах, складався з 45 одно-направлених шарів вуглецевого волокна IM7 товщиною 0,20 мм. Епоксидною зв'язкою шарів вуглепластику була епоксидна смола Larit (LR 285). Вуглепластик було виготовлено за технологію вакуумного формування з ручною укладкою шарів вуглецевого волокон за схемою 0°/90°. Загальна товщина шару вуглепластику становила $9 \pm 0,01$ мм із вмістом волокна 60 %. Металевий шар пакету було виготовлено з титанового сплаву - Ti-2.5Al-2Mn із наступними механічними властивостями (табл. 1). Фактичний хімічний склад титанового сплаву: Ti - 96,42 %, Al - 1,92 %, C - 0,21 %, O - 0,19 %, Si - 0,17 %, Mn - 0,89 %, Fe - 0,20 %.

У результаті з'єднання шару вуглепластику та титанового сплаву було утворено пакет загальною товщиною 17 мм.

Різальним інструментом для обробки отворів було обрано свердло Ø10 мм з твердого сплаву WC9 з покриттям TiN - TiAlN (5510-R-RT100U Guhring). У результаті вимірювання геометричних параметрів свердла на універсальній автоматичній вимірювальній машині Zoller Genius 3s, було визначено: головний кут в плані ($2\phi = 140,60^\circ$), задній кут ($\alpha = 7,50^\circ - 8,26^\circ$), кут нахилу поперечної різальної кромки ($\psi = 45,33^\circ - 55,62^\circ$), кут підйому гвинтової лінії ($\omega = 29,81^\circ - 30,10^\circ$), діаметр свердла (D, мм) і радіальне биття свердла (табл. 2).

Таблиця 1 - Механічні властивості сплаву Ti-2.5Al-2Mn

Межа міцності на розрив, (МПа)	Модуль пружності, (ГПа)	Густина, (кг/м³)	Подовження (%)	Теплопровідність, (Вт/(м·К))	Твердість, (HV)
735	115	4550	10	9.63	178

Таблиця 2 - Геометрія свердла 5510-R-RT100U Guhring

Геометричні параметри	Номер свердла відповідно до номеру досліджу								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
D , мм	10,008	10,003	10,003	10,003	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000
Радіальне биття, мм	0,010	0,012	0,016	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008

Таблиця 3 – Матриця варіювання факторів за методикою Тагучі L_8

Код	Назва фактору	Рівень			Кодування відповідно до Taguchi L_8								
		1	2	3	Номер досліджу								
					1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	Швидкість різання, v (м/хв)	15	40	65	1A	1A	1A	2A	2A	2A	3A	3A	3A
B	Подача, f (мм/об)	0,02	0,05	0,08	1B	2B	3B	1B	2B	3B	1B	2B	3B

На основі ортогонального масиву L_8 за методикою рабастного планування було отримано план експерименту, що складався з варіюванні двох факторів: швидкість різання (v , м/хв) та подачі (f , мм/об), на трьох рівнях, що дозволило сформувавши матрицю кодування та таблицю декодування факторів та їх рівнів (табл. 3). Механічна обробка пакету вуглепластик/титановий сплав проводилась з постійними значеннями рівнів факторів у межах досліджу для обох шарів пакету. Для вивчення впливу режимів різання на температуру різання було запропоновано проводити вимірювання градієнту температури у різальному інструменті методом штучної термопар.

Експериментальна установка була реалізована на базі 5-осьового фрезерного центра DMU 85V CNC (рис. 1). Заготовка вуглепластик/титановий сплав була закріплена в машинних лещатах Schunk Konte's KSC-F-125 з похибкою базування 0,02 мм, які були закріплені на столі верстата. Безпосередньо у ході досліджу контрольованим параметром була температура свердління. Температура свердління вимірювалась за допомогою бездротового пристрою (WICUTEM) методом штучної термопар. Пристрій був закріплений на цанговій оправці HSK40, встановлений у шпинделі верстата. Функціонування пристрою базується на поєднанні вимірювання ефекту Зеебека з компенсацією холодного спаю та бездротовою передачею сигналу від термопар з високою частотою (2,4 ГГц) через канал Bluetooth. Живлення пристрою здійснювалося за допомогою літій-іонних акумуляторів. Вимірювальний блок пристрою складався з термопар хромель-алюмель (К-типу), підключеної до підсилювача сигналу термопар, який передавав сигнал на модуль Bluetooth з частотою дискретизації 200 Гц.

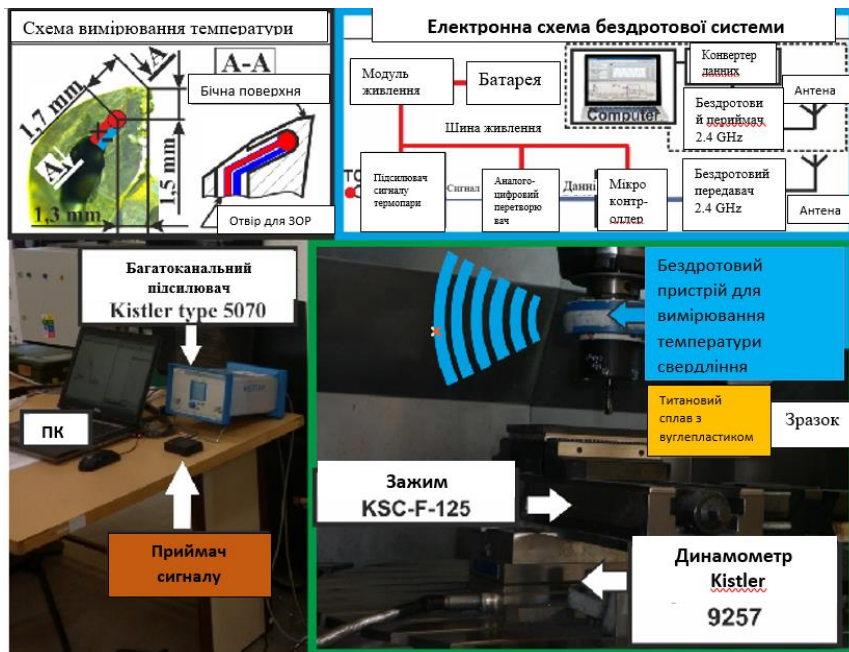


Рисунок 1 – Експериментальна установка на базі фрезерного оброблювального центру DMU 85V [30,31]

Сигнал надходив на Bluetooth приймач мобільного пристрою. Запис результатів вимірювання та їх подальший експорт у файл у форматі *.xls здійснювався за допомогою спеціально розробленого додатку для мобільних пристроїв на операційній системі Android, що дозволило фіксувати результати вимірювання температури свердління у режимі реального часу. Діапазон вимірювань термопар К - типу становив від 0 °С до 1036 °С з точністю ± 1.2 °С. Підвид термопар до задньої поверхні свердла здійснювався через канал для подачі ЗОР свердла. З метою наближення термопар до різальної кромки та захисту сенсора від стружки під задньою поверхнею свердла було оброблено канал, що дозволило розмістити термопару на відстані 1,3 мм від різучої кромки та 1,7 мм від вершини свердла (рис. 1).

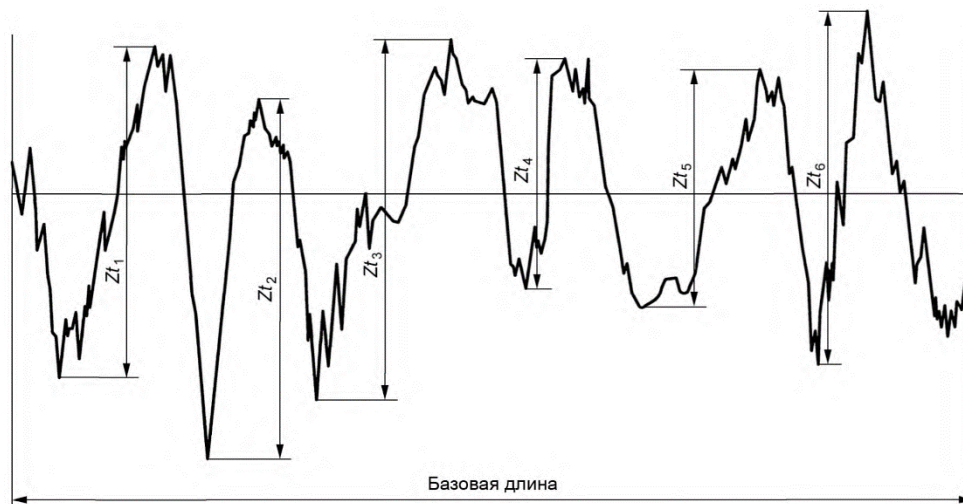


Рисунок 2 – Профіль мікронерівностей за параметром R_q

Шорсткість отворів вимірювалась на профілографі Profilograph Surfcom 5000. Контроль шорсткості здійснювався по чотирьом параметрам, а саме R_q , R_t , R_v , R_{Sm} [32]. Значення шорсткості по наведеним параметрам визначалося як середнє арифметичне трьох вимірювань по першому отвору у кожному з дев'яти дослідів.

Параметр R_q – середньоквадратичне відхилення, що визначається як середнє значення виміряних відхилень від середньої лінії, на базовій довжині вимірювання. Може застосовуватись для оцінки чистих поверхонь, являє собою середньоквадратичне відхилення розподілу висот профілю і в повній мірі характеризує профіль, що розраховується за формулою (рис. 2, формула 1) [32].

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} Z^2 x dx} \quad (1)$$

де l_r – базова довжина вимірювання, мм

Z – відстань між найбільшою вершиною та западиною профілю мікро нерівності, мкм.

Параметр R_t – повна висота профілю. Сума найбільшої висоти виступу і найбільшої глибини западини профілю в межах базової довжини. Параметр $R_t \geq R_z$, але в разі, коли вони рівні, рекомендується застосувати R_t (рис. 2., формула 2) [32].

$$R_t = (R_{vi}) + \max(R_{pi}) \quad (2)$$

де R_v – найбільша глибина впадини, мкм;

R_p – найбільша висота вершини, мкм.

Параметр R_v – максимальна глибина западини профілю на базовій довжині, застосовується у виробництві, так як глибокі западини часто служать концентраторами напружень.

Параметр R_{Sm} – середня ширина елементів профілю. Цей параметр вимагає висотної і крокової дискримінації. Якщо не обговорюються окремо, то висотне обмеження елемента профілю повинно бути 10% від R_z , крокові має становити 1% від базової довжини (формула 3).

$$R_{Sm} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_{si} \quad (3)$$

У ході експериментального дослідження було проведено дев'ять дослідів у результаті яких було просвердлено по одному отвору для кожного досліді. Свердління отворів у кожному досліді здійснювалося новим свердлом, що дозволило виключити вплив зношення свердла від попередніх дослідів.

Аналіз кривих температур свердління при обробці отвору № 1 для всіх дослідів виявив, що температура свердління в процесі обробки вуглепластику коливалася від 48,6 °С до 136 °С (рис. 3), а для шару титанового сплаву - від 189,8 °С до 461,4 °С (рис. 4).

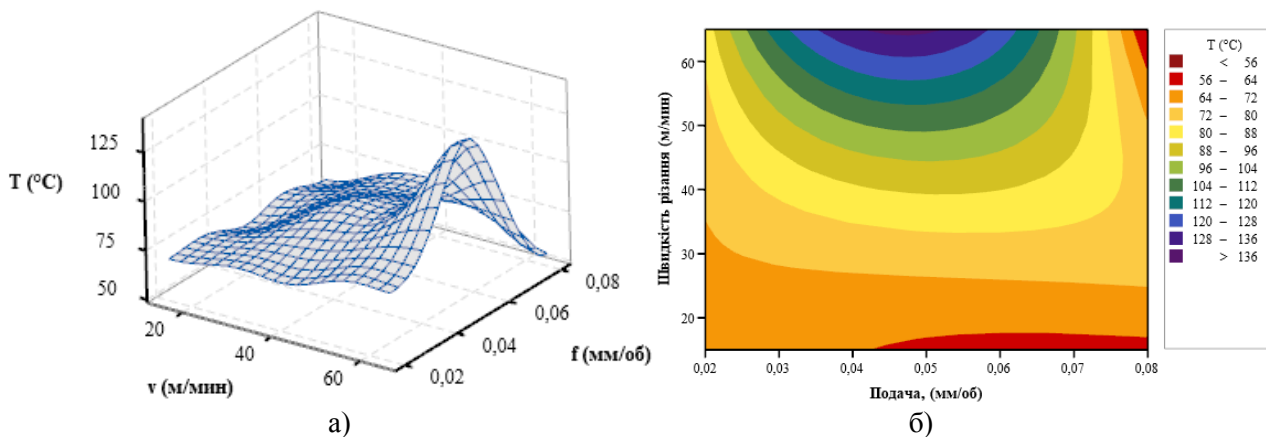


Рисунок 3 – Температура свердління у шарі вуглепластику

Максимальні значення температури свердління у вуглепластику було виміряно при таких режимах різання $v = 65$ м/хв і $f = 0,08$ мм/об, тоді як для титанового сплаву $v = 65$ м/хв і $f = 0,05$ мм/об. Менша швидкість різання створювала більш сприятливі умови для переходу тепла, що утворюється в зоні різання в матеріал заготовки та стружку, ніж у свердло.

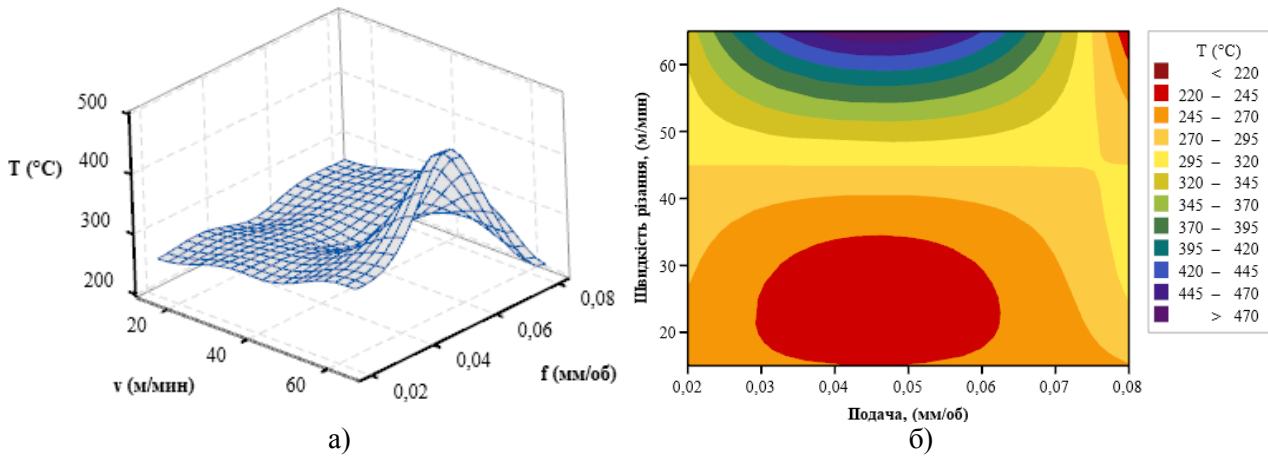


Рисунок 4 – Температура свердління у шарі титанового сплаву

У результаті виконання експериментального дослідження по вивченню впливу режимів різання, було отримано дані про глибину та характер мікронерівностей. Довжина вимірювання складала 4 мм, базова довжина 0,8 мм. Отримані результати були оброблені за допомогою програмного продукту Minitab 19, що дозволило отримати графіки залежності аналізованих параметрів окремо для кожного шару пакету.

Таким чином значення шорсткості по параметру R_q у шарі вуглепластику в залежності від режимів різання варіювалося в діапазоні від 3 до 13,5 мкм (рис. 5 а). Локальний мінімум значення параметру R_q спостерігався для подачі 0,05 мм/об. Вплив швидкості різання для подачі 0,05 мм/об був не суттєвим, про що свідчить незначні відмінності у значенні параметру 3,0 – 3,7 мкм. Однак для комбінації режимів $v = 15$ м/хв – 65 м/хв, $f = 0,02$ мм/об шорсткість поверхні варіювалася в діапазоні R_q 4,75 – 8,65 мкм, збільшуючись зі зростанням швидкості різання. Аналогічна динаміка зберіглася і для режимів різання $v = 15$ м/хв – 65 м/хв, $f = 0,08$ мм/об. Найбільш не сприятливим, з точки зору забезпечення мінімальної шорсткості виявилися режими $v = 65$ м/хв, $f = 0,02$ мм/об та $v = 65$ м/хв, $f = 0,08$ мм/об. З огляду на те, що параметр R_v характеризує максимальну глибину западин на базовій довжині, та враховуючи що подібні западини є концентраторами напружень, то найбільш раціональним виглядає обробка з режимами $v = 40$ м/хв, $f = 0,05$ мм/об. Локальні максимуми параметру, у досліджуваному діапазоні режимів різання були виміряні на режимах з максимальною швидкістю різання $v = 65$ м/хв та $f = 0,02$ мм/об та 0,08 мм/об відповідно (рис. 5 б).

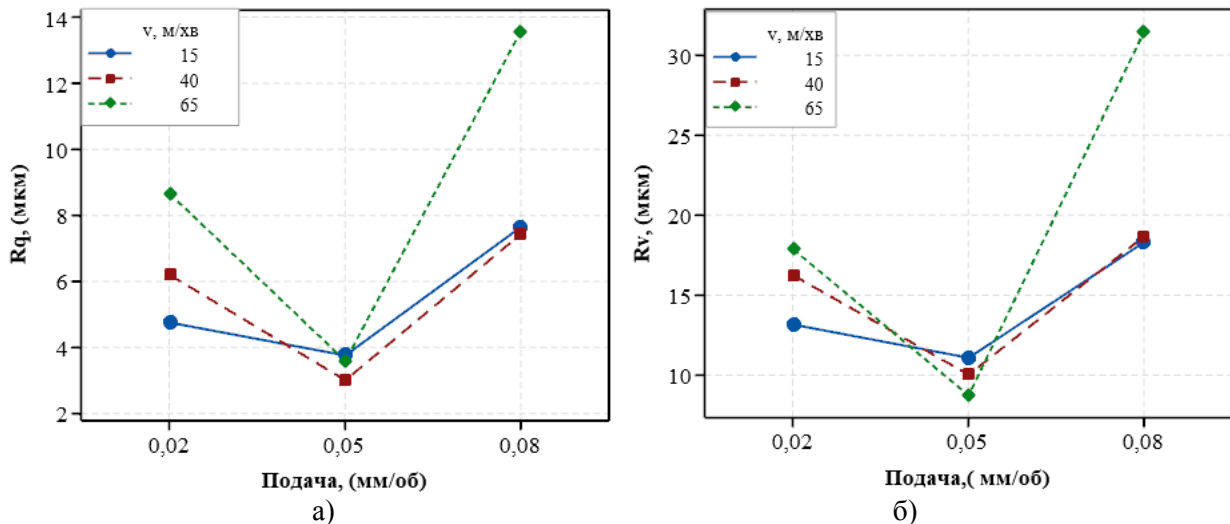


Рисунок 5 – Шорсткість поверхні отвору у шарі вуглепластику за параметрами R_q , R_v вуглепластик

При аналізі значень максимальних виступів та западин, що характеризуються параметром R_s , мінімуми параметру, що варіювалися у діапазоні 21,86 – 24,22 мкм були отримані при подачі 0,05 мм/об зменшуючись зі збільшенням швидкості різання (рис. 6 а). Але в цілому поєднання високої швидкості різання та подачі призводить до формування найбільш несприятливої комбінації висоти виступів та западин на мікрорельєфі обробленої поверхні сягаючи 103,6 мкм при режимі $v = 65$ м/хв та $f = 0,08$

мм/об, що є передумовою для абразивного впливу стінки отвору у шарі вуглепластику на болтове або заклепкове з'єднання і може призвести до зниження ресурсу з'єднання (рис. 6 а).

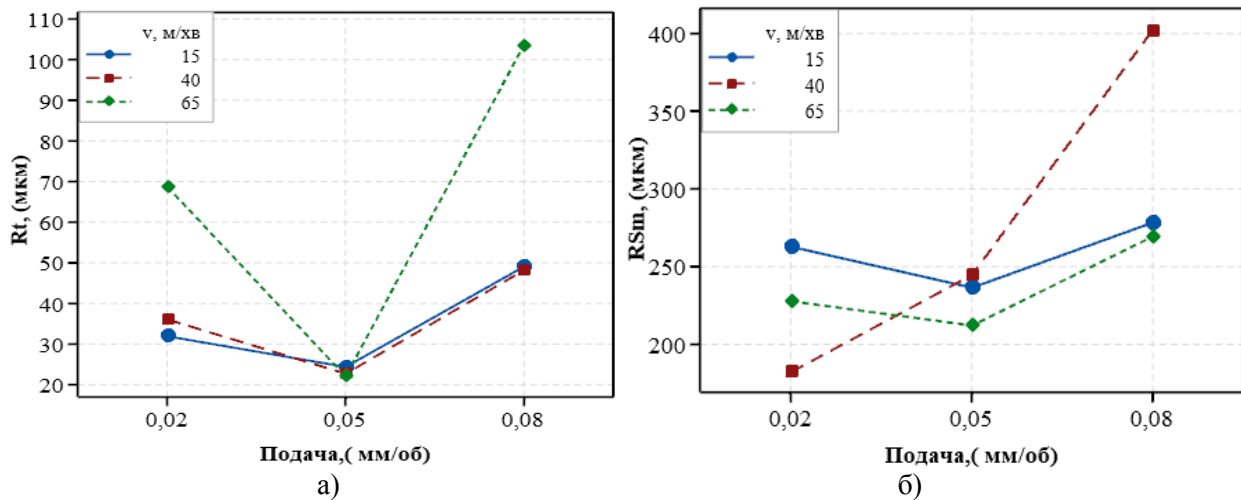


Рисунок 6 – Шорсткість поверхні отвору у шарі вуглепластику за параметрами R_t , R_{Sm} вуглепластик

Середня ширина елементів профілю змінювалася від 182 до 400 мкм, що характеризує хвилястість мікрорельєфу обробленої поверхні. Чим більше значення цього параметру тим більший період появи впадин та вершин мікронерівностей (рис. 6 а). Великі значення ширини елементів профілю свідчать про витягування вуглеволокна з матриці, що є значним дефектом обробленої поверхні. Найменше значення $R_{Sm} = 182$ мкм було отримано при обробці $v = 40$ м/хв та $f = 0,02$ мм/об, в той час як найбільше при $v = 40$ м/хв та $f = 0,08$ мм/об. Однак, розглядаючи розсіювання результатів вимірювання в цілому, слід зазначити що групування мінімуму значення параметру R_{Sm} відбувається на умовній лінії подачі 0,05 мм/об змінюючись в межах від 212 до 246 мкм (рис. 6 б).

Аналіз даних по параметру R_v як і для параметру R_q засвідчив локальний мінімум на режимах різання з подачею 0,05 мм/об, змінюючись в діапазоні від 8,7 до 11,05 мкм, хоча мінімальне значення було отримано на режимі $v = 65$ м/хв, $f = 0,05$ мм/об (рис. 7 а).

Значення шорсткості по параметру R_q у шарі титанового сплаву в залежності від режимів різання варіювалося в діапазоні від 0,91 до 2,38 мкм (рис. 7 б). Локальний мінімум значення параметру R_q в титановому сплаві, як у вуглепластику спостерігався при подачі 0,05 мм/об. Вплив швидкості різання для подачі 0,05 мм/об був суттєвим, про що свідчить відмінності у значенні параметру 2,0 – 2,19 мкм, що зростав зі збільшенням швидкості.

Однак для комбінації режимів $v = 15$ м/хв – 65 м/хв, $f = 0,02$ мм/об шорсткість поверхні варіювалася в діапазоні R_q 2,22 – 2,38 мкм, збільшуючись зі зростанням швидкості різання. Таким чином при зменшенні подачі при умові зростання швидкості різання не забезпечило мінімізацію значення параметру R_q мікронерівностей. Зі зростання подачі до 0,08 мм/об зростання швидкості різання призводило до зниження значення параметру до 1,46 мкм (рис. 7 а). Зниження значень параметру R_q відбувалося за умов зростання подачі при $v = const$.

Мінімальне значення найбільшої глибини западини $R_v = 2,3$ мкм було отримано при свердлінні на $v = 40$ м/хв, $f = 0,05$ мм/об, хоча у решті дослідів зі зростанням швидкості різання значення параметру зростало при $f = const$, що відрізняє отримані результати від результатів вимірювання у вуглепластику (рис. 7 б).

Поєднання високої швидкості різання та мінімальної подачі призвело до зростання $R_v = 4,87$ мкм, що коливалося у діапазоні від 3,89 до 4,87 мкм. При зростанні подачі до максимальної відбулося зниження параметру до (2,99-3,27 мкм) таким чином, при більших значеннях швидкості різання зменшувалася глибина западини (рис. 7 б).

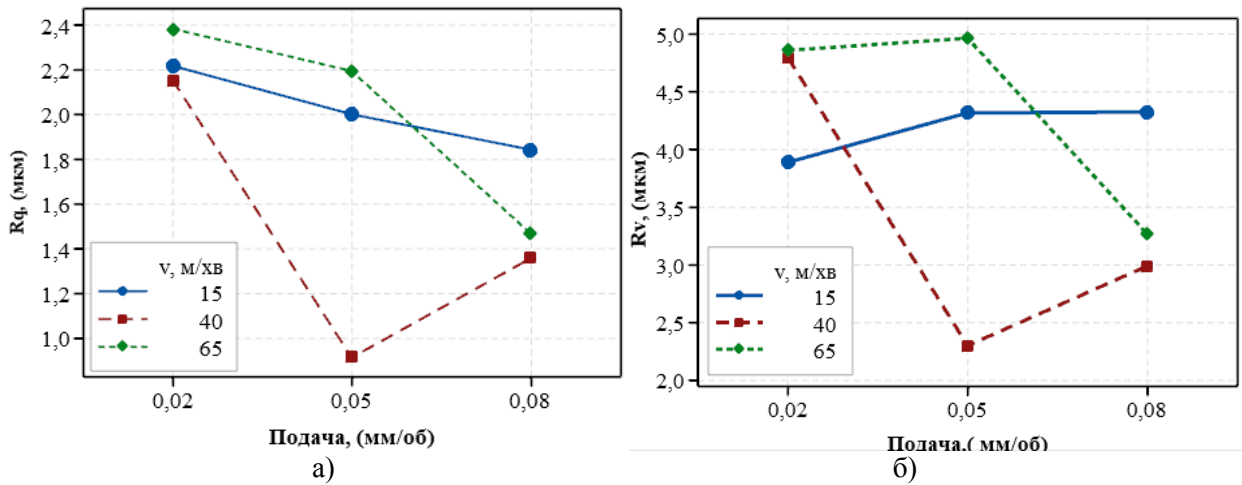


Рисунок 7 – Шорсткість поверхні отвору у шарі титанового сплаву за параметром R_q , R_v у титановому сплаві

Аналізуючи значення різниці максимальних вершин і максимальних запади було виявлено, що поєднання мінімальної подачі та швидкості різання практично не впливає на значення параметру R_t при свердлінні шару титанового сплаву, що змінювався від 13,95 до 14,97 мкм. Стрімке зниження $R_t = 5,4$ мкм було отримано при $v = 40$ м/хв, $f = 0,05$ мм/об (рис. 8 а). Слід відзначити, що у порівнянні з результатами вимірювання у вуглепластику, де параметр зростає з збільшенням подачі, у титановому сплаві спостерігається стійкий тренд до зниження параметру при збільшенні подачі.

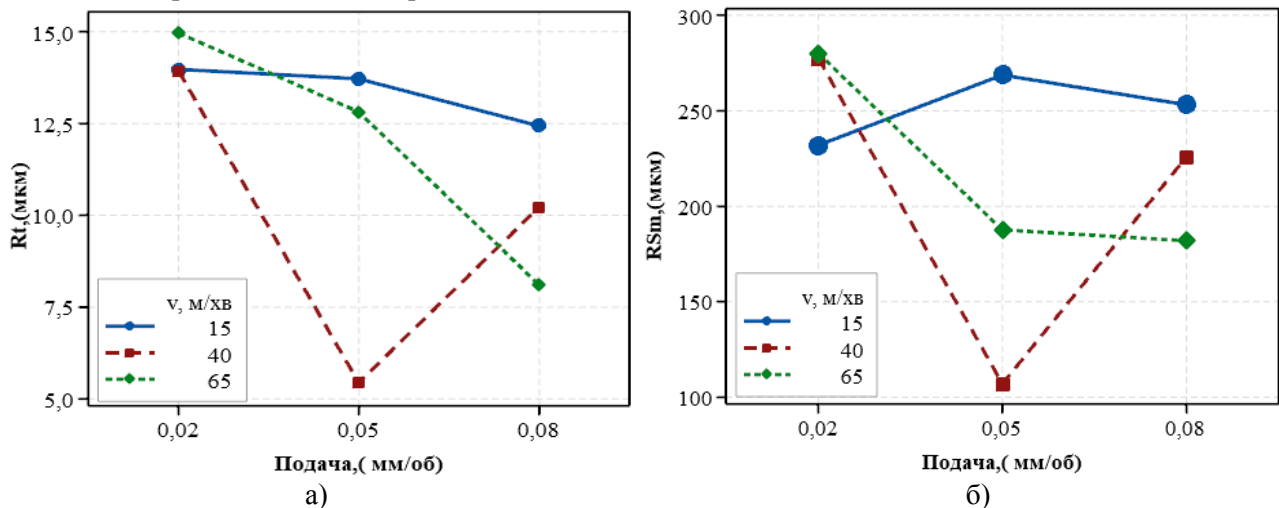


Рисунок 8 – Шорсткість поверхні отвору у шарі вуглепластику за параметрами R_t , R_{Sm} титановий сплав

Середня ширина елементів профілю змінювалася від 106,7 до 280,52 мкм, що характеризує хвилястість мікрорельєфу обробленої поверхні. Найменше значення $R_{Sm} = 106,7$ мкм було отримано при обробці $v = 40$ м/хв та $f = 0,05$ мм/об, в той час як найбільше при $v = 40$ м/хв та $f = 0,08$ мм/об. Максимальне значення параметру було отримано при $v = 40 - 65$ м/хв та $f = 0,02$ мм/об. Аналізуючи криві залежності ізольовано одна від одної впадає в око стабільність параметру R_{Sm} при обробці $v = 15$ м/хв та $f = 0,02 - 0,08$ мм/об, що може свідчити про досягнення балансу сил різання та реакції оброблювального матеріалу (фізико-механічних властивостей), хоча показники параметру R_{Sm} при цих режимах є в середньому найбільші в порівнянні з іншими режимами різання (рис. 8 б). При обробці $v = 65$ м/хв та $f = 0,02 - 0,08$ мм/об значення параметру R_{Sm} підпорядковуються тренду до зниження при збільшенні подачі.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

На основі огляду наукової літератури визначено доцільність проведення експериментального дослідження, щодо виявлення міри впливу режимів різання на шорсткість поверхні отворів при свердлінні пакетів вуглепластик/титановий сплав. Розроблена методика дослідження температури свердління дозволила визначити діапазони вимірюваного параметру у шарі вуглепластику та

титанового сплаву при однопрохідному свердлінні обох шарів пакету при однакових режимах різання у діапазоні швидкості різання 15 м/хв – 65 м/ хв та подачі 0,02 мм/об -0,08 мм/об. Використання бездротового пристрою (WICUTEM) для вимірювання температури свердління, що поєднав в собі метод штучної термопари, що встановлювалась безпосередньо у свердло в процесі механічної обробки, та технологію Bluetooth для безперервної бездротової передачі даних, дозволило забезпечити безперервний збір та обробку результатів вимірювання впродовж усього процесу обробки отворів. Таким чином, було визначено значення температури свердління для кожного шару пакету вуглепластик/ титановий сплав для варійованих режимів різання. На основі використання профілографічного методу дослідження обробленої поверхні отворів було кількісно визначено значення параметрів шорсткості поверхні шарів пакету. Вивчення мікрорельєфу обробленої поверхні як в шарі вуглепластику та і в шарі титанового сплаву здійснювалось за чотирма критеріями шорсткості, що дозволило відстежити вплив режимів різання, як на мікро так і на макрорівні обробленої поверхні. Було з'ясовано, що при збільшенні подачі відбувається збільшення параметрів шорсткості у шарі вуглепластику, та зменшення у шарі титанового сплаву. У результаті обробки результатів вимірювання параметрів шорсткості визначено локальні мінімуми для параметрів середньоквадратичного відхилення профілю мікронерівностей, повної висоти профілю, максимальної глибини западин профілю на базовій довжині та середньої ширини елементів профілю.

ВИСНОВКИ

У результаті вимірювання температури свердління методом штучної термопари було визначено, що локальний мінімум вимірюваного параметру при обробці шару вуглепластику групується в діапазоні режимів різання $v = 15$ м/хв та $f = 0,05 - 0,08$ мм/об, а максимум $v = 65$ м/хв та $f = 0,05$ мм/об. Для титанового сплаву групування локального мінімуму та максимуму відбувалося при $v = 15$ м/хв, $f = 0,05$ мм/об та $v = 65$ м/хв, $f = 0,05$ об/хв, досягаючи 220 °С та 461 °С відповідно.

Аналіз результатів вимірювання засвідчив, що мінімальні або близькі до мінімальних значення середньоквадратичного відхилення профілю мікронерівностей, повної висоти профілю $R_t = 5,4$ мкм, максимальної глибини западин профілю на базовій довжині становила $R_v = 2,3$ мкм, та середньої ширини елементів профілю R_{Sm} від 212 до 246 мкм були отримані при $v = 40$ м/хв та $f = 0,05$ мм/об.

Групування локальних мінімумів аналізованих параметрів шорсткості обробленої поверхні у шарі титанового сплаву відбувалося навколо значень отриманих при обробці з $v = 40$ м/хв та $f = 0,05$ мм/об.

Визначено, що при обробці шару вуглепластику значення аналізованих параметрів шорсткості підпорядковується тренду до збільшення параметрів при збільшенні подачі, в той час як при свердлінні шару титанового сплаву навпаки до зниження, за винятком тих що стали локальними мінімумами.

Було наочно доведено, що комбінація швидкості різання 40 м/хв та подачі 0,05 мм/об дозволяє забезпечити мінімальні значення аналізованих параметрів мікрорельєфу обробленої поверхні, як в шарі вуглепластику так і титанового сплаву .

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1.Kim, D.; Ramulu, M. Study on the drilling of titanium/graphite hybrid composites. Journal of Engineering Materials and Technology-Transactions of the ASME 2007, 129, 390-396, doi:10.1115/1.2744397.

2.Isbilir, O.; Ghassemieh, E. COMPARATIVE STUDY OF TOOL LIFE AND HOLE QUALITY IN DRILLING OF CFRP/TITANIUM STACK USING COATED CARBIDE DRILL. Machining Science and Technology 2013, 17, 380-409, doi:10.1080/10910344.2013.806098.

3.Shyha, I.; Soo, S.L.; Aspinwall, D.K.; Bradley, S.; Dawson, S.; Pretorius, C.J. Drilling of Titanium/CFRP/Aluminium Stacks. Advanced Precision Engineering 2010, 447-448, 624, doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.447-448.624.

4.Chen, W.C. Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates. International Journal of Machine Tools & Manufacture 1997, 37, 1097-1108, doi:10.1016/s0890-6955(96)00095-8.

5.Davim, J.P.; Rubio, J.C.; Abrao, A.M. A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates. Composites Science and Technology 2007, 67, 1939-1945, doi:10.1016/j.compscitech.2006.10.009.

6.Voss, R.; Henerichs, M.; Rupp, S.; Kuster, F.; Wegener, K. Evaluation of bore exit quality for fibre reinforced plastics including delamination and uncut fibres. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 2016, 12, 56-66, doi:10.1016/j.cirpj.2015.09.003.

7. Giasin, K.; Ayvar-Soberanis, S. Evaluation of Workpiece Temperature during Drilling of GLARE Fiber Metal Laminates Using Infrared Techniques: Effect of Cutting Parameters, Fiber Orientation and Spray Mist Application. *Materials* 2016, 9, 17, doi:10.3390/ma9080622.
8. Wang, C.Y.; Chen, Y.H.; An, Q.L.; Cai, X.J.; Ming, W.W.; Chen, M. Drilling Temperature and Hole Quality in Drilling of CFRP/Aluminum Stacks Using Diamond Coated Drill. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 2015, 16, 1689-1697, doi:10.1007/s12541-015-0222-y.
9. Ghafarizadeh, S.; Lebrun, G.; Chatelain, J.F. Experimental investigation of the cutting temperature and surface quality during milling of unidirectional carbon fiber reinforced plastic. *Journal of Composite Materials* 2016, 50, 1059-1071, doi:10.1177/0021998315587131.
10. Moghaddas, M.A.; Yi, A.Y.; Graff, K.F. Temperature measurement in the ultrasonic-assisted drilling process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2019, 103, 187-199, doi:10.1007/s00170-019-03487-7.
11. Park, J.M.; Kwon, D.J.; Wang, Z.J.; Gu, G.Y.; DeVries, K.L. A new strategy of carbon fiber reinforced plastic drilling evaluation using thermal measurement. *Journal of Composite Materials* 2013, 47, 2005-2011, doi:10.1177/0021998312453358.
12. Rizal, M.; Ghani, J.A.; Nuawi, M.Z.; Haron, C.H.C. An embedded multi-sensor system on the rotating dynamometer for real-time condition monitoring in milling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2018, 95, 811-823, doi:10.1007/s00170-017-1251-8.
13. Yashiro, T.; Ogawa, T.; Sasahara, H. Temperature measurement of cutting tool and machined surface layer in milling of CFRP. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 2013, 70, 63-69, doi:10.1016/j.ijmachtools.2013.03.009.
14. Wei, Y.Y.; An, Q.L.; Ming, W.W.; Chen, M. Effect of drilling parameters and tool geometry on drilling performance in drilling carbon fiber-reinforced plastic/titanium alloy stacks. *Advances in Mechanical Engineering* 2016, 8, 16, doi:10.1177/1687814016670281.
15. Celik, Y.H. INVESTIGATING THE EFFECTS OF CUTTING PARAMETERS ON THE HOLE QUALITY IN DRILLING THE Ti-6Al-4V ALLOY. *Materiali in Tehnologije* 2014, 48, 653-659.
16. Basmaci, G.; Yoruk, A.S.; Koklu, U.; Morkavuk, S. Impact of Cryogenic Condition and Drill Diameter on Drilling Performance of CFRP. *Applied Sciences-Basel* 2017, 7, 12, doi:10.3390/app7070667.
17. Janos, L.; Janos, K. Tool Wear and Cutting Temperature at Machining of Composites. *Advances in Abrasive Technology XIV* 2011, 325, 381-386, doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.325.381.
18. Sauer, K.; Dix, M.; Putz, M. Process Forces Analysis and a New Feed Control Strategy for Drilling of Unidirectional Carbon Fiber Reinforced Plastics (UD-CFRP). *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 2018, 2, 7, doi:10.3390/jmmp2030046.
19. Xu, J.Y.; El Mansori, M. Experimental study on drilling mechanisms and strategies of hybrid CFRP/Ti stacks. *Composite Structures* 2016, 157, 461-482, doi:10.1016/j.compstruct.2016.07.025.
20. Benezech, L.; Landon, Y.; Rubio, W. Study of Manufacturing Defects and Tool Geometry Optimisation for Multi-Material Stack Drilling. In *Innovating Processes*, Karama, M., Ed.; Advanced Materials Research; Trans Tech Publications Ltd: Stafa-Zurich, 2012; Volume 423, pp. 1-11.
21. Hussein, R.; Sadek, A.; Elbestawi, M.A.; Attia, M. Low-frequency vibration-assisted drilling of hybrid CFRP/Ti6Al4V stacked material. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2018, 98, 2801-2817, doi:10.1007/s00170-018-2410-2.
22. Onawumi, P.Y.; Roy, A.; Silberschmidt, V.V.; Merson, E. Ultrasonically assisted drilling of aerospace CFRP/Ti stacks. *8th CIRP Conference on High Performance Cutting (HPC 2018)* 2018, 77, 383-386, doi:10.1016/j.procir.2018.09.041.
23. Xu, J.Y.; Ji, M.; Davim, J.P.; Chen, M.; El Mansori, M.; Krishnaraj, V. Comparative study of minimum quantity lubrication and dry drilling of CFRP/titanium stacks using TiAlN and diamond coated drills. *Composite Structures* 2020, 234, 13, doi:10.1016/j.compstruct.2019.111727.
24. Caggiano, A.; Angelone, R.; Teti, R. Image Analysis for CFRP Drilled Hole Quality Assessment. *10th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering - CIRP ICME '16* 2017, 62, 434-439, doi:10.1016/j.procir.2017.03.045.
25. Zitoune, R.; Krishnaraj, V.; Collombet, F.; Le Roux, S. Experimental and numerical analysis on drilling of carbon fibre reinforced plastic and aluminium stacks. *Composite Structures* 2016, 146, 148-158, doi:10.1016/j.compstruct.2016.02.084.
26. Abdelhafeez, A.M.; Soo, S.L.; Aspinwall, D.K.; Dowson, A.; Arnold, D. Burr formation and hole quality when drilling titanium and aluminium alloys. *CIRPE 2015 - Understanding the Life Cycle Implications of Manufacturing* 2015, 37, 230-235, doi:10.1016/j.procir.2015.08.019.

27. Fernandez-Perez, J.; Cantero, J.L.; Diaz-Alvarez, J.; Miguelez, M.H. Hybrid Composite-Metal Stack Drilling with Different Minimum Quantity Lubrication Levels. *Materials* 2019, 12, 13, doi:10.3390/ma12030448.
28. Kim, D.; Beal, A.; Kang, K.; Kim, S.Y. Hole quality assessment of drilled CFRP and CFRP-Ti stacks holes using polycrystalline diamond (PCD) tools. *Carbon Letters* 2017, 23, 1-8, doi:10.5714/cl.2017.23.001.
29. Giasin, K.; Ayvar-Soberanis, S. Microstructural investigation of drilling induced damage in fibre metal laminates constituents. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing* 2017, 97, 166-178, doi:10.1016/j.compositesa.2017.02.024.
30. Kolesnyk, V.; Peterka, J.; Kuruc, M.; Simna, V.; Moravcikova, J.; Vopat, T.; Lisovenko, D. Experimental Study of Drilling Temperature, Geometrical Errors and Thermal Expansion of Drill on Hole Accuracy When Drilling CFRP/Ti Alloy Stacks. *Materials* 2020, 13, 17, doi:10.3390/ma13143232.
31. Kolesnyk, V.; Peterka, J.; Alekseev, O.; Neshta, A.; Xu, J.Y.; Lysenko, B.; Sahul, M.; Martinovic, J.; Hrbal, J. Application of ANN for Analysis of Hole Accuracy and Drilling Temperature When Drilling CFRP/Ti Alloy Stacks. *Materials* 2022, 15, 21, doi:10.3390/ma15051940.
32. Структура поверхні профільний метод. 2012 ДСТУ ISO 4287:2012.

REFERENCES

1. Kim, D.; Ramulu, M. Study on the drilling of titanium/graphite hybrid composites. *Journal of Engineering Materials and Technology-Transactions of the ASME* 2007, 129, 390-396, doi:10.1115/1.2744397.
2. Isbilir, O.; Ghassemieh, E. Comparative study of tool life and hole quality in drilling of CFRP/titanium stack using coated carbide drill. *Machining Science and Technology* 2013, 17, 380-409, doi:10.1080/10910344.2013.806098.
3. Shyha, I.; Soo, S.L.; Aspinwall, D.K.; Bradley, S.; Dawson, S.; Pretorius, C.J. Drilling of Titanium/CFRP/Aluminium Stacks. *Advanced Precision Engineering* 2010, 447-448, 624+, doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.447-448.624.
4. Chen, W.C. Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 1997, 37, 1097-1108, doi:10.1016/s0890-6955(96)00095-8.
5. Davim, J.P.; Rubio, J.C.; Abrao, A.M. A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates. *Composites Science and Technology* 2007, 67, 1939-1945, doi:10.1016/j.compscitech.2006.10.009.
6. Voss, R.; Henerichs, M.; Rupp, S.; Kuster, F.; Wegener, K. Evaluation of bore exit quality for fibre reinforced plastics including delamination and uncut fibres. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 2016, 12, 56-66, doi:10.1016/j.cirpj.2015.09.003.
7. Giasin, K.; Ayvar-Soberanis, S. Evaluation of Workpiece Temperature during Drilling of GLARE Fiber Metal Laminates Using Infrared Techniques: Effect of Cutting Parameters, Fiber Orientation and Spray Mist Application. *Materials* 2016, 9, 17, doi:10.3390/ma9080622.
8. Wang, C.Y.; Chen, Y.H.; An, Q.L.; Cai, X.J.; Ming, W.W.; Chen, M. Drilling Temperature and Hole Quality in Drilling of CFRP/Aluminum Stacks Using Diamond Coated Drill. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 2015, 16, 1689-1697, doi:10.1007/s12541-015-0222-y.
9. Ghafarizadeh, S.; Lebrun, G.; Chatelain, J.F. Experimental investigation of the cutting temperature and surface quality during milling of unidirectional carbon fiber reinforced plastic. *Journal of Composite Materials* 2016, 50, 1059-1071, doi:10.1177/0021998315587131.
10. Moghaddas, M.A.; Yi, A.Y.; Graff, K.F. Temperature measurement in the ultrasonic-assisted drilling process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2019, 103, 187-199, doi:10.1007/s00170-019-03487-7.
11. Park, J.M.; Kwon, D.J.; Wang, Z.J.; Gu, G.Y.; DeVries, K.L. A new strategy of carbon fiber reinforced plastic drilling evaluation using thermal measurement. *Journal of Composite Materials* 2013, 47, 2005-2011, doi:10.1177/0021998312453358.
12. Rizal, M.; Ghani, J.A.; Nuawi, M.Z.; Haron, C.H.C. An embedded multi-sensor system on the rotating dynamometer for real-time condition monitoring in milling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2018, 95, 811-823, doi:10.1007/s00170-017-1251-8.
13. Yashiro, T.; Ogawa, T.; Sasahara, H. Temperature measurement of cutting tool and machined surface layer in milling of CFRP. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 2013, 70, 63-69, doi:10.1016/j.jmachtools.2013.03.009.

14. Wei, Y.Y.; An, Q.L.; Ming, W.W.; Chen, M. Effect of drilling parameters and tool geometry on drilling performance in drilling carbon fiber-reinforced plastic/titanium alloy stacks. *Advances in Mechanical Engineering* 2016, 8, 16, doi:10.1177/1687814016670281.
15. Celik, Y.H. Investigating the effects of cutting parameters on the hole quality in drilling the Ti-6Al-4V ALLOY. *Materiali in Tehnologije* 2014, 48, 653-659.
16. Basmaci, G.; Yoruk, A.S.; Koklu, U.; Morkavuk, S. Impact of Cryogenic Condition and Drill Diameter on Drilling Performance of CFRP. *Applied Sciences-Basel* 2017, 7, 12, doi:10.3390/app7070667.
17. Janos, L.; Janos, K. Tool Wear and Cutting Temperature at Machining of Composites. *Advances in Abrasive Technology XIV* 2011, 325, 381-386, doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.325.381.
18. Sauer, K.; Dix, M.; Putz, M. Process Forces Analysis and a New Feed Control Strategy for Drilling of Unidirectional Carbon Fiber Reinforced Plastics (UD-CFRP). *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 2018, 2, 7, doi:10.3390/jmmp2030046.
19. Xu, J.Y.; El Mansori, M. Experimental study on drilling mechanisms and strategies of hybrid CFRP/Ti stacks. *Composite Structures* 2016, 157, 461-482, doi:10.1016/j.compstruct.2016.07.025.
20. Benezech, L.; Landon, Y.; Rubio, W. Study of Manufacturing Defects and Tool Geometry Optimisation for Multi-Material Stack Drilling. In *Innovating Processes*, Karama, M., Ed.; Advanced Materials Research; Trans Tech Publications Ltd: Stafa-Zurich, 2012; Volume 423, pp. 1-11.
21. Hussein, R.; Sadek, A.; Elbestawi, M.A.; Attia, M. Low-frequency vibration-assisted drilling of hybrid CFRP/Ti6Al4V stacked material. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2018, 98, 2801-2817, doi:10.1007/s00170-018-2410-2.
22. Onawumi, P.Y.; Roy, A.; Silberschmidt, V.V.; Merson, E. Ultrasonically assisted drilling of aerospace CFRP/Ti stacks. *8th CIRP Conference on High Performance Cutting (HPC 2018)* 2018, 77, 383-386, doi:10.1016/j.procir.2018.09.041.
23. Xu, J.Y.; Ji, M.; Davim, J.P.; Chen, M.; El Mansori, M.; Krishnaraj, V. Comparative study of minimum quantity lubrication and dry drilling of CFRP/titanium stacks using TiAlN and diamond coated drills. *Composite Structures* 2020, 234, 13, doi:10.1016/j.compstruct.2019.111727.
24. Caggiano, A.; Angelone, R.; Teti, R. Image Analysis for CFRP Drilled Hole Quality Assessment. *10th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering - CIRP ICME '16* 2017, 62, 434-439, doi:10.1016/j.procir.2017.03.045.
25. Zitoune, R.; Krishnaraj, V.; Collombet, F.; Le Roux, S. Experimental and numerical analysis on drilling of carbon fibre reinforced plastic and aluminium stacks. *Composite Structures* 2016, 146, 148-158, doi:10.1016/j.compstruct.2016.02.084.
26. Abdelhafeez, A.M.; Soo, S.L.; Aspinwall, D.K.; Dowson, A.; Arnold, D. Burr formation and hole quality when drilling titanium and aluminium alloys. *Cirpe 2015 - Understanding the Life Cycle Implications of Manufacturing* 2015, 37, 230-235, doi:10.1016/j.procir.2015.08.019.
27. Fernandez-Perez, J.; Cantero, J.L.; Diaz-Alvarez, J.; Miguelez, M.H. Hybrid Composite-Metal Stack Drilling with Different Minimum Quantity Lubrication Levels. *Materials* 2019, 12, 13, doi:10.3390/ma12030448.
28. Kim, D.; Beal, A.; Kang, K.; Kim, S.Y. Hole quality assessment of drilled CFRP and CFRP-Ti stacks holes using polycrystalline diamond (PCD) tools. *Carbon Letters* 2017, 23, 1-8, doi:10.5714/cl.2017.23.001.
29. Giasin, K.; Ayvar-Soberanis, S. Microstructural investigation of drilling induced damage in fibre metal laminates constituents. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing* 2017, 97, 166-178, doi:10.1016/j.compositesa.2017.02.024.
30. Kolesnyk, V.; Peterka, J.; Kuruc, M.; Simna, V.; Moravcikova, J.; Vopat, T.; Lisovenko, D. Experimental Study of Drilling Temperature, Geometrical Errors and Thermal Expansion of Drill on Hole Accuracy When Drilling CFRP/Ti Alloy Stacks. *Materials* 2020, 13, 17, doi:10.3390/ma13143232.
31. Kolesnyk, V.; Peterka, J.; Alekseev, O.; Neshta, A.; Xu, J.Y.; Lysenko, B.; Sahul, M.; Martinovic, J.; Hrbal, J. Application of ANN for Analysis of Hole Accuracy and Drilling Temperature When Drilling CFRP/Ti Alloy Stacks. *Materials* 2022, 15, 21, doi:10.3390/ma15051940.
32. Структура поверхні профільний метод. 2012 ДСТУ ISO 4287:2012.

V. Kolesnyk, B. Lysenko, A. Neshta, M. Zabara. Investigation of cutting parameters influence the roughness when drilling CFRP/ Ti alloy stacks.

Currently, the drilling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) / titanium alloy stacks is still one of the most widely used machining methods for making holes for fastening assemblies in civil aircraft. The low machinability of the materials which forms the stack is explained by combination of the anisotropic structure

of the carbon fiber reinforced plastic, high hardness and strength of the titanium alloy. This poses challenges in machining such joints, which makes it difficult to choose rational cutting parameters for both the carbon fiber reinforced plastic layer and the titanium alloy layer. One of the aspects of machining of carbon fiber reinforced plastic/ titanium alloy stacks is the necessity to ensure satisfactory surface roughness parameters. In this work, the influence of technological factors on the roughness of the machined surface of the holes was investigated. During the experimental study, the controlled parameters were drilling temperature and surface roughness. Drilling temperature was measured in real time using a specially designed device WICUTEM, which combines the method of artificial thermocouple and Bluetooth technology for wireless data transmission. Roughness control was performed using the profilographic method on the SurfCOM 5000 profilograph. The experimental setup was implemented on the basis of the 5 coordinate milling machining center DMU 85V. The experiment was planned according to the Taguchi method, based on the orthogonal array L8, by varying the factors of cutting speed and feed at three levels. The results show that when processing the carbon fiber layer the values of the analyzed roughness parameters are subject to the trend to increase the parameters with increasing feed, while when drilling a layer of titanium alloy on the contrary to decrease, except for local lows.

Keywords: CFRP/ Ti alloy stack, thermocouple method, drilling temperature, surface roughness.

КОЛЕСНИК Віталій Олександрович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри «Технологія машинобудування, верстати та інструменти», e-mail: v.kolesnik@tmvi.sumdu.edu.ua. <https://orcid.org/0000-0002-0417-3801>.

ЛИСЕНКО Богдан Григорович – аспірант кафедри «Технологія машинобудування, верстати та інструменти», e-mail: b.lysenko@tmvi.sumdu.edu.ua

НЕСХТА Анна Олександрівна - кандидат технічних наук, старший викладач кафедри «Технологія машинобудування, верстати та інструменти», e-mail: anna_neshta@tmvi.sumdu.edu.ua

ЗАБАРА Микола Олександрович - студент кафедри «Технологія машинобудування, верстати та інструменти», e-mail: mykolazabara@gmail.com

Vitalii KOLESNYK – PhD in Engineering, Senior Lecturer at the Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools, Sumy State University, e-mail: v.kolesnik@tmvi.sumdu.edu.ua. <https://orcid.org/0000-0002-0417-3801>.

Bohdan LYSENKO - PhD student, at the Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools, Sumy State University, e-mail: b.lysenko@tmvi.sumdu.edu.ua

Anna NESHTA - PhD in Engineering, Senior Lecturer at the Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools, Sumy State University, e-mail: anna_neshta@tmvi.sumdu.edu.ua

Mykola ZABARA – bachelor student

DOI 10.36910/automash.v1i18.767