

ЗАКЛАД ВИЩОЇ ОСВІТИ УКРАЇНИ
«Сумський державний університет»

Факультет технічних систем та енергоефективних технологій
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Технологія машинобудування, верстати та інструменти
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи (проєкту)

другий (магістерський)
(освітній рівень)

на тему **«Експериментальне дослідження впливу технологічних параметрів при свердлінні циліндричних отворів у пакетах вуглепластик/ титановий сплав на шорсткість поверхні»**

Виконав: студент II курсу, групи ТМ.м-11
спеціальності: 131 – Прикладна механіка
(шифр і назва спеціальності)

освітньої програми: Технології
машинобудування
(назва освітньої програми)

Баскаков Е.В.
(прізвище та ініціали)

Керівники Колесник В. О.
(прізвище та ініціали)

Петерка Й.
(прізвище та ініціали)

Рецензент Бондарев С. Г.
(прізвище та ініціали)

Суми – 2022 року

ЗАКЛАД ВИЩОЇ ОСВІТИ УКРАЇНИ
«Сумський державний університет»

Інститут, факультет	Факультет технічних систем та енергоефективних технологій
Кафедра	Технології машинобудування, верстатів та інструментів
Освітній рівень	другий (магістерський) <small>(назва)</small>
Спеціальність	131 – прикладна механіка <small>(шифр і назва)</small>
Освітня програма	технології машинобудування <small>(назва освітньої програми, за наявності)</small>

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри технології
машинобудування, верстатів та
інструментів

_____ Віталій ІВАНОВ

«__» _____ 2022 року

ЗАВДАННЯ
ДО КВАЛІФІКАЙНОЇ РОБОТИ (ПРОЄКТУ) СТУДЕНТУ

Баскаков Едуард Владиславович <small>(прізвище, ім'я, по батькові)</small>	
1. Тема проєкту (роботи)	«Експериментальне дослідження впливу технологічних параметрів при свердлінні циліндричних отворів у пакетах вуглепластик/титановий сплав на шорсткість поверхні»
Керівник проєкту	Колесник Віталій Олександрович, канд. техн. наук <small>(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)</small>
затверджені наказом вищого навчального закладу від «10» листопада 2022 року за № 1049-VI	
2. Строк подання студентом роботи (проєкту)	«16» грудня 2022 року
3. Вихідні дані до роботи (проєкту)	Технічне завдання про проведення експериментального дослідження впливу технологічних параметрів свердління отворів у пакетах вуглепластик/ титановий сплав
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)	1. Аналіз основних тенденцій проведення досліджень по свердлінню пакетів вуглепластик/ титановий сплав. 2. Обґрунтування методики експериментального дослідження шорсткості та температури при свердлінні отворів у пакетах вуглепластик/титановий сплав. 3. Проведення аналізу результатів експериментального дослідження по

виявленню впливу режимів різання на температуру свердла та шорсткість поверхні при свердлінні отворів у пакетів вуглепластик/ титановий сплав.

4. Проведення аналізу питань охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи (проєкту)	Строк виконання етапів роботи (проєкту)	Примітка
1	Аналіз основних тенденцій проведення досліджень по свердлінню пакетів вуглепластик/ титановий сплав.	25.09.2022	Виконано
2	Обґрунтувати методику експериментального дослідження шорсткості та температури при свердлінні отворів у пакетах вуглепластик/титановий сплав	10.09.2022	Виконано
3	Провести аналізу результатів експериментального дослідження по виявленню впливу режимів різання на температуру свердла та шорсткість поверхні при свердлінні отворів у пакетів вуглепластик/ титановий сплав.	15.10.2022	Виконано
4	Провести аналіз вимог по охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях, аналіз характеристик та впливу на організм людини шкідливих речовин у повітрі робочої зони. Виконати розрахунок штучної вентиляції виробничого приміщення	15.11.2022	Виконано
5	Формулювання загальних висновків	11.12.2022	Виконано
6	Підготовка доповіді	12.12.2022	Виконано
7	Підготовка презентації	12.12.2022	Виконано
8	Оформлення роботи	14.12.2022	Виконано

Студент

_____ (підпис)

Едуард БАСКАКОВ

(прізвище та ініціали)

Керівники роботи (проєкту)

_____ (підпис)

Віталій КОЛЕСНИК

(прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Йозеф ПЕТЕРКА

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота містить: чотири розділи, 55 с., 4 табл., 16 рис., 3 формула, 3 додатки, 74 джерела.

Об'єкт дослідження - процес свердління отворів у пакетах вуглепластик/титановий сплав.

Предмет дослідження – параметри шорсткості обробленої поверхні отворів у пакетах вуглепластик/ титановий сплав.

Метою дипломного проекту було дослідити вплив режимів різання на параметри шорсткості, зокрема середньоквадратичне відхилення профілю мікронерівностей, повну висоту профілю, максимальну глибину западин профілю на базовій довжині та середню ширину елементів профілю, як важливі характеристики що зумовлюють ресурс болтових та заклепкових з'єднань пакетів вуглепластик/ титановий сплав.

Методи дослідження - основи технології машинобудування, основні положення теорії різання. Експериментальне дослідження здійснювалося згідно методики планування експерименту за методом Тагучі. Експериментальні дані про температуру свердла було отримано в результаті натурного експерименту за допомогою бездротової пристрою для вимірювання температура методом штучної термопари з передачею даних з використанням технології Bluetooth. Шорсткість обробленої поверхні визначалася на профілографі.

У результаті виконання дипломного проекту було визначено вплив режимів різання на параметри шорсткості поверхні при однопрохідному свердлінні шарів пакету твердосплавним свердлом на однакових режимах різання для кожного з шарів. Визначено режим різання, що дозволяє забезпечити мінімальні значення параметрів шорсткості для вуглепластику та титанового сплаву.

ВУГЛЕПЛАСТИК, ТЕМПЕРАТУРА СВЕРДЛІННЯ, ТИТАНОВИЙ СПЛАВ, ШОРСТКІСТЬ.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Сумський державний університет

Кафедра «Технологія машинобудування, верстати та інструменти»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідуючий кафедрою

_____ Віталій ІВАНОВ

«___» грудня 2022 р.

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ
ПАРАМЕТРІВ ПРИ СВЕРДЛІННІ ЦИЛІНДРИЧНИХ ОТВОРІВ У
ПАКЕТАХ ВУГЛЕПЛАСТИК/ ТИТАНОВИЙ СПЛАВ НА ШОРСТКІСТЬ
ПОВЕРХНІ**

Кваліфікаційна робота (проект) магістра

Спеціальність 131 – прикладна механіка

Освітня програма – технології машинобудування

Студент

Е.В. Баскаков

Керівники

В. О. Колесник

Йозеф Петерка

Консультант з розділу охорони праці

та безпеки в надзвичайних ситуаціях

Нормоконтроль

В. В. Фалько

О. В. Івченко

Суми – 2022

ЗМІСТ

1.	Основні тенденції проведення досліджень по свердлінню пакетів вуглепластик/ титановий сплав	8
1.1	Вступ у тенденції обробки отворів у пакетах вуглепластик/ титановий сплав	8
1.2	Огляд основних параметрів якості отворів у пакетах вуглепластик/ титановий сплав	11
1.3	Огляд основних параметрів точності отворів у пакетах вуглепластик/ титановий сплав	17
1.4	Вплив режимів різання на параметри процесу свердління пакетів вуглепластик/ титановий сплав	21
1.5	Висновки	24
2.	Методика експериментального дослідження шорсткості та температури при свердлінні отворів у пакетах вуглепластик/титановий сплав	26
2.1	Відомості про оброблюваний матеріал та різальний інструмент	26
2.2	Методика планування експерименту	27
2.3	Експериментальна установка	30
2.4	Методика вимірювання шорсткості отворів.....	32
2.5	Висновки	34
3.	Експериментальне дослідження впливу режимів різання на температуру свердла та шорсткість поверхні при свердлінні отворів у пакетів вуглепластик/ титановий сплав	36
3.1	Дослідження впливу режимів різання	36
3.2	Шорсткість поверхні у шарах вуглепластику та титанового сплаву.....	37
3.3	Висновок	43
4.	Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях.....	45
	Загальні висновок.....	46
	Список джерел посилань	47
	Додаток А.....	55

	7
Додаток Б.....	66
Б1. Загальні характеристики та дія на організм людини шкідливих речовин у повітрі робочої зони.....	67
Б.2 Нормування вмісту шкідливих речовин у повітрі.....	73
Б.3 Розрахунок витяжної вентиляції у виробничому приміщенні.....	73
Додаток В.....	76

1 ОСНОВНІ ТЕНДЕНЦІЇ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ПО СВЕРДЛІННЮ ПАКЕТІВ ВУГЛЕПЛАСТИК/ ТИТАНОВИЙ СПЛАВ

1.1 Вступ у тенденції обробки отворів у пакетах вуглепластик/ титановий сплав

Свердління - це найпоширеніша механічна операція при виготовленні отворів для з'єднання пакетів вуглепластик/ метал в аерокосмічній промисловості. Хоча питання забезпечення якості отворів у пакетах вуглепластик/ метал знаходиться в центрі уваги дослідницької діяльності протягом останніх 15 років, свердління пакетів за один прохід все ще залишається складним завданням.

Якість отвору у пакеті вуглепластик/титановий сплав характеризується у титановому сплаві такими параметрами: шорсткість поверхні (Ra) [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 пошкодження (Q_d) [6]. В експериментальних дослідженнях найчастіше вимірюються фізичні величини – осьова сила (F , Н) [1, 5], крутний момент (M_c , Н·мм) [1, 5], температура різання (T , °С) [7-12], механізм формування стружки [13, 14], а також такі технічні величини, як фаска зношування [15-17] та період стійкості інструменту [13]. Вищезазначені параметри зазвичай використовуються для пояснення фізичної природи впливу режимів різання [3, 18], геометрії інструменту [19, 20] та матеріалу інструменту, а також впливу технологічних середовищ [21-24] на показники якості отворів. При експериментальному дослідженні 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]. У дослідженні впливу режимів різання було встановлено, що свердління пакету вуглепластик/ титановий сплав зі швидкістю різання $V= 45$

м/хв та подачею $S = 0,09$ 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 найбільш значущими факторами, що впливали на розшарування вуглепластику, є подача [13, 25, 26] та головний кут у плані [18, 27], хоча на розмір задирок у титановому сплаві в основному впливає хвилинна подача [3] інструментальний матеріал [1], та зношення інструментів [15-17], хоча вплив останнього може бути зменшений за допомогою техніки малого змащення (MQL) [11, 24, 28], криогенного свердління (LN_2) [15, 29, 30], вібраційного свердління (VAD) [22] та ультра швидкісного свердління (UAD) [23, 31]. За даними Xu та Mansori [32], шорсткість поверхні у вуглепластику при свердлінні пакету в 3 рази гірша, ніж при свердлінні тільки вуглепластику, що пояснювалося ковзанням титанової стружки в стінці отвору у шарі вуглепластику [1]. Дослідженням Бенезеха та ін. [33], 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 [34]. Було визначено, що свердло з потрійною стрічкою може створювати більш точні отвори за рахунок зменшення вібрацій через збільшення контакту з оброблюваною поверхнею [35].

Виходячи з вищезазначеного, можна визначити, що в даний час існує декілька напрямків щодо дослідження точності та якості отворів при свердлінні пакетів вуглепластик/титановий сплав [36]. Один з них є вивчення фізичних величин, таких як осьова сила, крутний момент і температура різання, що дозволяє покращити розуміння механізмів формування стружки при обробці пакетів. Вплив осьової сили та крутного моменту при свердлінні пакетів добре вивчені, але температура різання та її вплив на якість отворів у пакетах все ще залишаються у центрі уваги наукових досліджень.

Наразі відомі способи та методи вимірювання температури різання можна класифікувати за методами вимірювання на калориметричні, термопари [10, 12, 13, 14, 17], термографічні методи [7, 10, 11, 13, 15, 22, 23, 31]. 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 [12]. 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. При експериментальному дослідженні термічного пошкодження вуглепластика та розміру отвору вимірювали температуру свердління за допомогою інфрачервоної камери. 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. Це призводило до того що до 80% тепла згенерованого у зоні різання, акумулювалося у інструменті, що супроводжувалося збільшенням висоти задиру [2].

Спираючись на результати вивчення наукових публікацій присвячених дослідженням процесу свердління пакетів вуглепластик /титановий сплав можна зробити висновок, що хоча вплив режимів різання, геометрії інструменту та механізмів зношення інструменту на якість отворів добре вивчено залишається мало вивченим вплив режимів різання на шорсткість поверхні у шарах пакету.

У поточному дослідженні пропонується дослідити вплив режимів різання на шорсткість обробленої поверхні отворів пакетах вуглепластик/ титановий сплав, що

дозволить поглибити розуміння можливих резервів для технологічного забезпечення якості отворів.

1.2 Огляд основних параметрів якості отворів у пакетах вуглепластик/титановий сплав

Якість отворів в пакетах вуглепластик/метал є ключем до забезпечення надійності та довговічності болтових і заклепкових з'єднань у авіабудуванні [37-39]. Тому більшість наукових робіт з обробки пакетів присвячені вивченню аспектів і факторів, що впливають на якість отворів. Ранні дослідження запропонували типізацію характерних пошкоджень поверхні отвору, у шарі вуглепластик та в шарі металу (титанового або алюмінієвого сплаву), що негативно впливають на характеристики обробки отворів та їх надійність. Збільшення коефіцієнта розшарування зменшує навантаження на розтяг і збільшує залишкову напругу [40]. У найзагальнішому випадку типові пошкодження отворів можна розділити на відхилення від геометричної точності та відхилення від форми: діаметр отвору, округлість і циліндричність та параметри морфології обробленої поверхні. Ашрафі та ін. помітили кореляцію між шорсткістю поверхні та витягуванням волокна, яку було запропоновано оцінювати шляхом розрахунку довжини витягування волокна [41]. Діаметр отвору можна оцінити за похибкою діаметра отвору (E_h) [42]. При дослідженні ознак ця класифікація була більш детально уточнена в термінах коефіцієнта розшарування [43] та значення якості [6] (табл.1.1).

Таблиця 1.1 – Узагальнені показники оцінки якості поверхні отворів у вуглепластику [6, 44, 45]

Розшарування	Математичні вирази для розрахунку	Примітка
1D традиційне розшарування	$F_d = \frac{D_{max}}{D_{nom}}$	D_{max} – максимальний діаметр розшарування;
Мінімальне розшарування	$F_{dmin} = \frac{D_{min}}{D_{nom}}$	D_{nom} – номінальний діаметр отвору; D_{min} – мінімальний діаметр отвору;
2D розшарування	$F_a = \left(\frac{A_{del}}{A_{nom}} \right) \%$	A_{del} – площа розшарування; A_{nom} – номінальна площа просвердленого отвору;
Співвідношення пошкоджень	$D_{RAT} = \frac{D_{MAR}}{A_{AVG}}$	D_{MAR} – площа периферійних

Розшарування	$F_d = \frac{A_d}{A}$	пошкоджень; A_{AVG} – номінальна площа
Скореговане розшарування	$F_{ad} = \alpha \left(\frac{D_{max}}{D_{nom}} \right) + \beta \left(\frac{A_{del}}{A_{nom}} \right)$	пошкодження; A_d – площа пошкодження з
Еквівалентне розшарування	$F_e = \frac{A_d}{A}$	урахуванням площі отвору; де α, β - зважені параметри
3D розшарування	$F_v = \frac{1}{P} \sum_{k=1}^P F_a^k$	$\alpha = 1 - \beta, \beta = \frac{A_{del}}{A_{max} - A_{nom}};$ $D_e = \sqrt{\frac{4(A_{del} + A_{nom})}{\pi}}$
Інтегрований показник якості	$Q_d = K[(w_1 F_{nd} + w_2 F_{ad}) + (w_3 F_{L,95\%} + w_4 F_{nom} + w_5 F_a)]$	де $F_a^k = \frac{A_d^k}{A_{nom}}$, коефіцієнт значущості 2D розшарування $k^{ого}$ шару вуглепластику; A_d^k - площа розшарування $k^{ого}$ шару вуглепластику; A_{nom} – the nominal drilled hole area P – загальна кількість розшарованих шарів вуглепластику; $F_{L,95\%} = \frac{L_{95\%} - L_{f,95\%}}{L_{95\%}}$ $L_{95\%}$ - загальна довжина кола 95% від D (мм).

На якість поверхні стінки отвору у вуглепластику значною мірою впливає швидкість нагрівання, яка залежить від контактних умов при взаємодії свердління та поверхні отвору. Перевищення температури склування (більше 180°C) суттєво впливає на температурно - залежні властивості матеріалу [46].

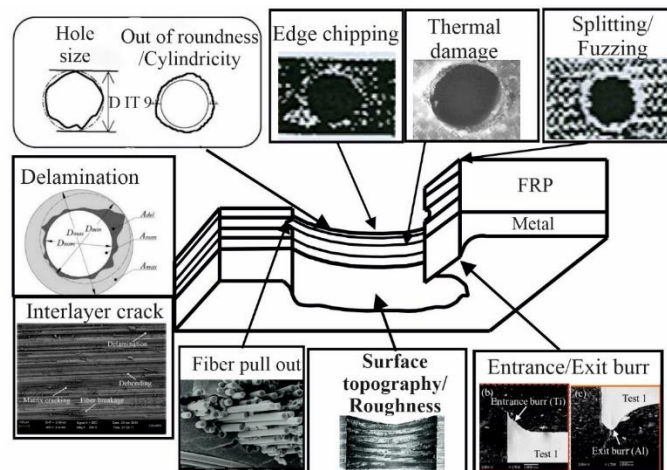


Рисунок 1.1 – Типові пошкодження отворів у пакетах вуглепластик/ титановий сплав [1, 35]

1.3 Типові пошкодження поверхні отворів у пакетах вуглепластик/ титановий сплав

Різноманітні типи пошкоджень отвору виникають через різні технологічні фактори. Ці фактори або їх комбінація можуть відрізнятися для вуглепластику і металевого шару пакетів. Найбільш значущими факторами, які впливають на пошкодження отворів [9, 14, 29, 47, 48] для пакетів вуглепластик/ метал, є: режим різання [4, 49-51] (швидкість різання, подача, затримка часу) [30, 52], технологія свердління (однопрохідне свердління, вібраційне свердління (VAD)) (ультразвукове свердління (UAD) [53], низькочастотне вібраційне свердління (LFVAD) [16, 22]), геометрія свердла [28], матеріал інструменту [2, 54, 55], послідовність з'єднання шарів пакетів [56].

На підставі результатів аналізу літератури можна стверджувати, що найбільш значними та поширеними видами пошкоджень поверхні вуглепластику під час свердління пакетів вуглепластик/ титановий сплав є: розшарування, витягування волокон, незрізані волокна (задирки), міжшарові тріщини, термічні пошкодження матриці та поверхневі подряпини. Для титанового шару такими пошкодженнями є задирки та шорсткість на вході/виході з отвору. Найважливішими факторами, що визначають розшарування верхнього та нижнього шарів вуглепластику, є головний кут в плані, кут підйому гвинтової лінії, подача, кут орієнтації волокон та температура різання. Кут підйому гвинтової лінії суттєво впливає на розшарування та утворення задирок у вуглепластику [57]. Головний кут в плані більше 135° було визначено як найбільш доцільний для одночасної обробки вуглепластику та титанового сплаву в поєднанні з малою подачею для мінімізації розшарування [58]. Хоча низька подача призводить до підвищення температури різання [8, 59]. Зона високої температури зосереджена в місці контакту між головною ріжучою кромкою інструменту та заготовкою [12]. Крім того, враховуючи умови температурного балансу, в поєднанні режимами різання, нижча подача та більша швидкість різання можуть призвести до серйозніших термічних пошкоджень [60]. Тепло, накопичене під час обробки титанового шару, призводить до підвищення температури різання. В свою чергу це спричиняє деградацію епоксидної матриці вуглепластику [31, 61],

яка характеризується карбонізацією епоксидної смоли у вигляді зміни її кольору на чорний. Як наслідок, це призводить до мікротріщин з наступним відділенням шарів вуглепластику. Супутнє розмазування матриці, та розшарування зв'язки «волокно/матриця», обумовлено високою температурою, що розподілилася з зони різання у матеріал заготовки [60]. Крім режимів різання або технології свердління, що впливає на підвищення температури різання, є фактор зношення різального інструменту. Втрата ріжучої здатності інструменту створює більш високі значення сили різання, збільшуючи значення вище згаданих дефекти [62]. Поєднання параметрів різання та зносу інструменту, що супроводжується термічним пошкодженням матриці, стимулює розвиток міжшарової тріщини під площиною різання. Траєкторія розповсюдження тріщини, у комбінованих режимах руйнування, відбувається у дав етапи та характеризується двом основними типами пошкоджень. Тип руйнування I та тип руйнування II, що в кінцевому підсумку призводить до «V-подібної» виїмки, зосередженої по лінії з'єднання вуглепластик/титановий сплав [63]. Найбільш очевидним способом зниження температури різання є використання різних охолоджуючих середовищ.

Позитивний вплив охолоджуючого середовища на зниження температури різання пов'язано з поліпшенням умов тертя в зоні різання та з поглинанням тепла. Дослідники запропонували ще один спосіб зниження температури різання. Це використання технології вібраційного свердління. Сприятливий вплив цієї технології на тепловіддачу із зони різання ґрунтується на короткому часі контакту ріжучої кромки з матеріалом заготовки та зміні механічного характеру взаємодії між інструментом і заготовкою внаслідок накладання вібрацій у широкому діапазоні амплітуд. Було виявлено, що низькочастотне вібраційне свердління (LFVAD) негативно впливає на розшарування на вході у отвір під час свердління шару вуглепластику у порівнянні з традиційним однопрохідним свердлінням. Коефіцієнт розшарування при однопрохідному свердлінні коливався від 1,0 до 1,4, в залежності від подачі, тоді як при LFVAD він змінювався від 1,4 до 2,0 при тих самих значеннях подачі та швидкості різання. Цей ефект можна пояснити значним впливом амплітуди вібрації, яка збільшила часткові навантаження на вуглепластик

на мікрорівні в зоні різання деталь–інструмент, стимулюючи міжшарові тріщини у верхніх шарах вуглепластику [64]. Така різниця в підсумкових результатах може бути пов'язана з тим, що Xu et al. [64] роблять висновок, враховуючи кількість отворів, тоді як Yang et al. [65], ймовірно, базується на результатах для одного або кількох отворів. Також різниця у висновках дослідників може бути обумовлена різними методами вимірювання розшарування [47]. Було визначено, що акустична емісія не є надійним методом вимірювання розшарування [44]. Однак Сui та ін. запропонували метод XGBoost – ARIMA для прогнозування коефіцієнта розшарування який був експериментально перевірений за допомогою коефіцієнта кореляції Пірсона [66]. Під час свердління вуглепластику абразивним інструментом на базі алмазу, було визначено, що зернистості абразивної частини інструменту є значним фактором, що впливає на розшарування. Зі збільшенням зернистості сила різання та коефіцієнт розшарування зменшуються [66]. Під час свердління вуглепластику спіральним свердлом розшарування має тенденцію до зменшення зі збільшенням швидкості різання [42]. Разом з тим, при ультразвуковому свердлінні (UAD) пакету вплив ультразвукових коливань було описано як сприятливий через зміну коефіцієнта розшарування в діапазоні 1,05 – 1,1; який при однопрохідному свердлінні коливався від 1,1 до 1,4 [67]. Фрагментація титанової стружки під впливом LFVAD [65] та UAD [67] зменшує витягування вуглеволокна на поверхні отвору порівняно зі звичайним свердлінням, що супроводжується безперервним утворенням титанової стружки та ковзанням стружки по поверхні вуглепластикового шару отвору. Покращення умов сходу стружки призводить до зменшення дефектів витягування волокна, що може бути досягнуто шляхом використання стружколавної канавки для гальмування стружки на передній поверхні свердла [34]. Застосування техніки малого змащення (MQL) негативно впливає на коефіцієнт розшарування, що призводить до збільшення розшарування від 117 % до 38 % у порівнянні зі свердлінням без змащення, яке ще називають сухим свердлінням. Менше з тим, морфологія поверхні отвору більш гладка при використанні MQL, ніж в умовах сухого свердління [68]. Висота задирок на виході із отвору на 0,1 – 0,23 мм нижча, ніж після традиційного однопрохідного

свердління без змащення [64]. Висота задирок на виході залежить не лише від змащувально-охолоджуючого середовища та технології свердління, а ще й від інструментального матеріалу. Однак кріогенне свердління може зменшити розмір задирок [21]. Під час LFVAD пакету свердло з діамантовим покриттям (PCD) забезпечує зменшення висоти задирок на 51% у порівнянні з традиційним свердлінням [5] твердосплавним інструментом (WC) [69] і техніка однопрохідного свердління. Було помічено, що висота заусенця не залежить від техніки свердління, збільшуючись зі зростанням подачі [35]. Шорсткість поверхні залежить від чотирьох основних механізмів руйнування матеріалу: руйнування волокон, викликане вигином, руйнування волокон, викликане зсувом, руйнування волокон, викликане стисненням, і роз'єднання волоконної матриці [33]. Зменшення коефіцієнта розшарування також пов'язане з геометрією ступінчастого свердла, що пояснюється меншим крутним моментом на калібруючій частині свердла [70]. Поліпшення умов видалення стружки вуглепластику, що забезпечується за рахунок всмоктування промисловим пирососом, значно збільшує шорсткість поверхні, округлість отвору та коефіцієнт розшарування при свердлінні вуглепластику [71]. У ході двомірного скінчено-елементного моделювання було визначено, що механічна обробка пакету у послідовності титановий сплав /вуглепластик призводить до прилипання титанової стружки до ріжучої кромки інструменту та збільшення шорсткості поверхні вуглепластику [72]. Конструкція конічної частини головного кута в плані свердла може ефективно перешкоджати утворенню задирок за умови попереднього свердління пілотного отвору та застосування охолодження рідким азотом. Отже, свердло з заточкою вершини підходить для свердління пакетів вуглепластик/ титановий сплав [73]. Хоу та ін. повідомили про позитивний вплив змащувально-охолоджуючої рідини на основі емульсії Voelube 70104 і Castrol Syntilo 9828, що подається у зону різання за рахунок зовнішнього охолодження та позитивно впливає на зношення інструменту, шорсткість поверхні, осьову силу, що пояснюється зниженням температури різання нижче температури склування матриці ($T_g = 205 \text{ }^\circ\text{C}$) [74]. Серйозні та нерівномірні термічні пошкодження, деградації матриці та вигоряння матриці відбуваються на виході з отвору, що

справедливо як при ультразвуковому свердлінні (UAD), так і для традиційного свердління (CD) [60]. Оскільки види пошкоджень отворів є характеристикою, яка описує поверхню отвору на мікрорівні, параметри, які характеризують геометричну точність отворів у пакетах, будуть обговорені нижче.

1.4 Огляд основних параметрів точності отворів у пакетах вуглепластик/титановий сплав

Забезпечення точності отворів має важливе значення для обробки отворів у пакетах вуглепластик/ титановий сплав. Основна тенденція в удосконаленні технології обробки отворів у пакетах полягала в оптимізації швидкості різання та подачі, геометрії інструменту, стратегії свердління (однопрохідне свердління, циклічне свердління), змащувально-охолоджуючи середовища або послідовності свердління шарів пакету. Однак потенціал технології свердління з допомогою вібрації, вплив зношення інструменту та фактор затримки часу ще недостатньо вивчені. Точність отвору оцінюється шляхом вимірювання діаметра отвору (розміру отвору), округлості отвору та похибки 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 управління процесом свердління.

Більше того, розглядаючи свердління отворів у пакетах із вуглепластику/титанового сплаву як безперервний процес, умови процесу впливають на утворення стружки з титанового сплаву, швидкість зношування інструменту, адгезію матеріалу заготовки [57] та передачу тепла, оскільки вихідні параметри впливають на параметри точності отвору. Проте їх вплив навряд чи можна розрахувати в рамках класичної методології планування експерименту. Параметри різання можуть варіюватися в широкому діапазоні значень, геометрії інструменту, покриття та техніки подачі охолоджуючої рідини.

Порівняння традиційного свердління без ЗОР та свердління з використанням техніки малого змащення (MQL) підкреслило відсутність істотної різниці в діаметрі отвору. Однак діаметр отвору при використанні техніки (MQL) має відхилення від номінального розміру ($\varnothing 6,0_{-0,05}$). Навпаки, відхилення діаметра отвору отриманий в

умовах свердління без використання ЗОР становить $\varnothing 6,0^{+0,03}$ [64]. Найважливішим фактором для діаметра отвору може бути комбінація швидкості різання та подачі при свердлінні без ЗОР та при використанні техніки (MQL). Техніка (MQL) не впливає на циліндричність отвору в шарі вуглепластику. Найбільш суттєвим чинником, що обумовлює забезпечення циліндричності отвору є не відсутність чи наявність ЗОР а умови відведення стружки титанового сплаву. Оскільки, ковзання титанової стружки призводить до термічних пошкоджень поверхні отвору у шарі вуглепластику [1] при послідовності свердління вуглепластик \rightarrow титановий сплав [64]. Це припущення було підтверджено в експериментальному дослідженні шляхом порівняння результатів вимірювань циліндричності для пакету вуглепластик/титановий сплав та окремого свердління шару вуглепластику та титанового сплаву за однакових режимів різання. Було виявлено, що циліндричність отвору для шару вуглепластику становила 0,03 мм, тоді як для пакету вуглепластику/титанового сплаву вона змінювалася від 0,09 до 0,17 мм, збільшуючись із кількістю отворів [58]. Використання криогенного охолодження забезпечує меншу шорсткість поверхні шляхом зміни пластичної структури матеріалу на крихку, що запобігає термічним пошкодженням на поверхні отвору. Однак, разом з тим це також негативно впливає на розмірну точність отворів як у шарі вуглепластику так і титанового сплаву [38]. Використання технології вібраційного свердління може позитивно вплинути на параметри точності отворів. Зокрема, відхилення діаметра отвору, при використанні даної технології коливалося від 2 до 11 мкм, тоді як при традиційному свердлінні цей параметр змінювався у діапазоні від 10 до 12 мкм, в залежності від швидкості різання. Швидкість різання є значущим фактором що впливає на відхилення діаметра отвору [28]. Було помічено, що на відхилення від круглості отвору також впливає послідовність свердління пакету. А саме вуглепластик \rightarrow титановий сплав чи титановий сплав \rightarrow вуглепластик. Порівняння результатів свердління вуглепластику (лише), титанового сплаву (лише) і пакету вуглепластику/титановий сплав показало, що окреме свердління шарів вуглепластику та титанового сплаву забезпечує відхилення від круглості складало 0,005 мм і 0,002 мм відповідно. У той

час як під час свердління пакету вуглепластику/титановий сплав відхилення від круглості зросло до 0,025 і 0,003 мм для шарів вуглепластику та титанового сплаву відповідно [48]. Ці результати узгоджуються з висновками, по те що ковзання гарячої металевої стружки, утвореної під час обробки шару титанового сплаву та накопичення тепла в інструменті [51, 70], негативно впливає на морфологію поверхні вуглепластику, та точність отвору [28, 74]. Технологія низькочастотного вібраційного свердління (LFVAD) позитивно впливає на значення розмірної точності та відхилення від циліндричності отвору. У порівнянні із традиційним свердлінням спіральним свердлом, свердління за накладанням вібрацій низької частоти (LFVAD) забезпечує оброблення діаметру отвору для шару вуглепластику в діапазоні 6,37 – 6,40 мм, а в шарі титанового сплаву 6,34 – 6,36 мм. Разом з тим при свердлінні спіральним свердлом діаметр отвору варіюється у діапазоні від 6,47 – 6,67 мм та 6,40 – 6,45 мм для вуглепластику та титанового сплаву відповідно [74]. Ці результати були перевірені та підтверджені в [45], з уточнення, що менша швидкість різання забезпечує зменшення відхилення діаметра отвору.

Порівняння різних технологій свердління показує, що під час звичайного свердління пакету вуглепластику/титанового сплаву пошкодження міжшарової поверхні відбувається за рахунок накопичення тепла та ковзання стружки інструменту [70], [51] і титанового сплаву. Пошкодження поверхні вуглепластику збільшується зі збільшенням ширини міжшарового зазору [51]. Свердління з циклічною осциляцією позитивно впливає на циліндричність отвору. Однак це приводить до збільшення діаметру отвору [12]. При порівнянні традиційного свердління та гвинтового фрезерування, було висловлено припущення, що накопичення тепла у різальному інструменті для обох методів обробки призводить до збільшення діаметра отвору в середніх та нижніх частинах отвору [9]. В інших дослідженнях феномен акумуляції тепла у свердлі та його теплове розширення було експериментально доведено та підтверджено за допомогою методу кінцевих елементів [17]. Поєднання низької подачі та високої швидкості різання зумовлюють збільшення розміру отвору у вуглепластику, що пояснюється більш нестабільними умовами роботи різального інструменту та його тепловим розширенням [5]. Однак

слід також враховувати вплив геометрії різального інструменту або покриття свердла. Було помічено, що свердло алмазним покриттям (PCD) забезпечує $\varnothing 9,525 + 0,005$ мм, тоді як свердло з твердого сплаву без покриття за тих самих режимів різання забезпечує $\varnothing 9,525 + 0,015$ мм, а також на 75% кращу шорсткість і коефіцієнт розшарування у вуглепластику [62], що пояснюється вищою зносостійкістю до бокового зношення свердла з покриттям PCD. [42, 91]. Ступінчасте свердло створювало більш постійний діаметр отвору та до 14% менше значення похибки циліндричності, ніж свічкове свердло [42] через ефект розгортання країв вторинної ступені ступінчатого свердла. Цей ефект також було помічено при дослідженні впливу числа канавок для стружки відведення на діаметр отвору. Її та ін. було запропоновано підвищити точність узгодження діаметра отвору шляхом свердління пакету у послідовності титановий сплав→вуглепластик за допомогою свердла з кількома ступенями. Ступінчасте свердло показало до 5 мкм при діаметрі 9,56 мм більш високу точність розмірів отвору та до 50 мкм менше відхилення від циліндричності отвору. Хоча автори не обговорювали вплив послідовності свердління пакета та різних режимів різання для шару титанового сплаву та вуглепластику [38]. Також доведено, що ступінчасте спіральне свердло з трьома головними різальними кромками забезпечує менший розсіювання відхилень діаметра отвору [39]. Samsudeensadham та ін. запропонували модифікувати передню поверхню свердла канавкою для гальмування стружки, що у підсумку дозволило зменшити відхилення від циліндричності отвору в вуглепластику з 0,07 мм до 0,03 мм [52].

Слід підкреслити, що жодна технологія свердління отворів у пакетах не може задовольнити всі суперечливі вимоги щодо забезпечення належних параметрів усіх видів пошкоджень та вимог до точності отворів при свердлінні пакетів. Найскладнішим завданням під час обробки пакетів вуглепластик/титановий сплав є уникнення термічного пошкодження вуглепластику, висмикування волокна, утворення задирок, збільшення діаметра отвору, збільшення відхилень від округлості та циліндричності а також шорсткості поверхонь. Дефектування отвору по причині недотримання вище наведених параметрів якості отворів як правило

зумовлено значним виділенням тепла в зоні різання, ковзанням металевої стружки, температурним розширенням свердла, адгезією матеріалу заготовки та сильним зношенням різального інструменту. Частково ці проблеми вирішуються оптимізацією параметрів різання та геометрії свердла. Можна зробити висновок, що позитивний ефект від використання різноманітних технологій охолодження дозволяє успішно вирішити проблему тепловіддачі із зони різання. Проте вивчення особливостей технології вібраційного свердління, покращення технологічних умов стратегії переривчастого свердління з удосконаленням геометрії свердла зі стружколомними канавками та подвійною допоміжною різальною кромкою може бути перспективним напрямком вирішення проблем пов'язаних зі зменшенням кількості та різноманітності пошкоджень і забезпеченням точності отворів.

1.5 Вплив режимів різання на параметри процесу свердління пакетів вуглепластик/ титановий сплав

Основними технологічними факторами, які забезпечують можливість механічної обробки при свердлінні, є швидкість різання та подача. Ці параметри найбільш загальні для будь-якої технології свердління. Однак вони можуть варіюватися в широкому діапазоні, враховуючи, чи обробка здійснюється при однопрохідному, циклічному, вібраційному (VAD), чи ультразвуковому (UAD) свердлінні чи спіральному фрезеруванні. Параметри свердління також можуть відрізнятися в залежності від послідовності свердління шарів пакету. Можна зробити висновок, що найбільш часті значення швидкості різання для пакетів сплаву вуглепластик/титановий сплав при однопрохідному свердлінні коливаються від 17 до 62 м/хв. При цьому подача змінювалася від 0,018 до 0,081 мм/об. Під час експериментального дослідження було помічено, що свердління за допомогою ультразвуку супроводжується зменшенням осьової сили, крутного моменту та температури різання в порівнянні з традиційним свердлінням. У шарі вуглепластик осьова сила зменшилась на 47% і 26% у шарі титанового сплаву, тоді як крутний момент зменшився на 49% і 29% відповідно. Під час традиційного

свердління температура свердління досягала 475 °С, тоді як при ультразвуковому свердлінні (UAD) – 350 °С [28]. Було виявлено, що низькочастотні вібрації не впливають на температуру свердління при свердлінні вуглепластику. Однак при свердлінні шару титанового сплаву (LFVAD) позитивно впливає на зниження температури свердління порівняно зі звичайним свердлінням [72]. Помічено, що ступінчасті свердла з геометрією двох або трьох канавок демонструють менші значення питомої сили різання порівняно з традиційною геометрією свердла, що пояснюється зменшенням глибини різання [39]. Було підкреслено, що подача є більш значущим фактором, який впливає на збільшення осьової сили та крутного моменту під час свердління вуглепластику без змащувально-охолоджуючих середовищ. Розм'якшення матриці є фоновим процесом, що сприяє збільшенню довжини витягування волокна [5]. Однак, використовуючи техніку охолодженого повітря, яка знижувала температуру різання, витягування волокна зменшилося від 25 до 55% за швидкості різання, подачі та інтенсивності зносу спірального свердла під час обробки вуглепластику, тоді як коефіцієнт розшарування зменшився від 7 до 20% [27]. Збільшення подачі та зменшення швидкості різання призводить до зниження температури різання у вуглепластику. Крім того, порівняно з традиційним свердлінням максимальна температура різання в UAD в радіальних і осьових точках вимірювання за всіма експериментальними параметрами значно знижувалась через переривчастий режим різання при ультразвуковому свердлінні (UAD). Висока подача та середня швидкість різання є доцільними з огляду на позитивний вплив таких рівнів технологічних для зменшення термічних пошкодження та забезпечити ефективність обробки під час (UAD) пакетів вуглепластик /титановий сплав [37].

Осьова сила при спіральному фрезеруванні пакетів нижча, ніж при звичайному свердлінні, за винятком випадків, коли температура у вуглепластику досягає температури склування. При цьому якість свердління погіршується [11]. В одному з експериментальних досліджень процедура свердління проводилася у трьох основних конфігураціях: пакет вуглепластик /титановий сплав, лише вуглепластик і лише титановий сплав з використанням твердосплавних свердел

($\varnothing 6,1$ мм) зі швидкістю різання 50 м/хв і подачею 0,05 мм/об. Якість просвердлених отворів оцінювалась за параметрами розмірної точності, розшарування та витягування волокон вуглепластику. Було виявлено, що свердління пакетів вуглепластик /титановий сплав призвело до сильної адгезії титанової стружки на ріжучих кромках, що спричинило суттєве збільшення діаметру отвору. Було виявлено, що відшарування та витягування волокон у шарі вуглепластику збільшуються на 22%-62% і 170%-530% під час свердління пакетів вуглепластик /титановий сплав порівняно з свердлінням, лише шару вуглепластику. Значні пошкодження у шарі вуглепластику під час свердління пакетів вуглепластик /титановий сплав порівняно зі свердлінням лише з вуглепластик було здебільшого пов'язане із ковзанням титанової стружки, що виходила з зони різання.

Крім того, було виявлено, що задирки, які утворюються на виході отвору у шарі титанового сплаву, збільшуються в міру збільшення зношення різального інструменту [28]. Кастільо-Моралес та ін. повідомили, що подача є найважливішим фактором, що впливає на температуру різання при обробці пакету вуглепластик /титановий сплав [30]. Ці висновки суперечать результатам іншого дослідження, де доповідалося що на температуру різання в основному впливають швидкість різання та фактор відтермінування часу свердління наступного отвору [22]. З підвищенням температури різання відбувається зростання мікротвердості в металевому шарі пакетів вуглепластик /метал [38]. Було виявлено, що покриття PCD демонструє високу швидкість зношування при високій швидкості різання та подачі порівняно з інструментами без покриття та з покриттям TiAlN-TiAl WC [29]. Іншим аспектом, на який слід звернути увагу, є розробка математичної моделі мікромеханічної взаємодії інструменту та матеріалу заготовки пакету щодо режимів різання. Цзя З.Й. та ін. запропонував прогностичну математичну модель, яка враховувала вплив бокового тертя, орієнтації волокна та ріжучої кромки на осьову силу та крутний момент під час свердління пакету вуглепластик/титановий сплав. Перевагою запропонованої моделі є можливість прогнозування осьової сили та крутного моменту в зоні розділу пакета на шар вуглепластику та титанового сплаву з

похибкою прогнозування 15%, що було підтверджено експериментальними результатами [29].

1.6 Висновки

1. Режими різання у поєднанні з механічними та тепловими явищами у зоні різання є основними чинниками, що ускладнюють процес механічної обробки при свердлінні пакетів вуглепластик/ титановий сплав. Режим видалення стружки є вирішальним фактором, що обумовлює характеристики процесу різання, зокрема значень сили різання та кількості теплоти, якості поверхні та утворення пошкоджень.

2. Послідовності шарів пакету має значний вплив на осьову силу і генерацію тепла, утворення пошкоджень на поверхні отвору, характеристики якості отвору та прогресування зношення інструменту. Різні механізми обробки залежать від того, чи домінує в процесі видалення матеріалу термічне розм'якшення чи зношення свердла.

3. Основні проблеми пов'язані зі свердлінням пакетів вуглепластик/ титановий сплав в основному класифікуються на : (i) руйнування, склування та вигорання композитної матриці, (ii) адгезія титанового сплаву до різальної кромки, дряпання поверхні отвору у шарі вуглепластику пов'язані із ковзанням гарячої титанової стружки (iii) пошкодження у міжшаровому проміжку пакету, що спричиняється титановою стружкою та стружкою вуглепластику.

4. Зменшення пошкодження отворів і термічної деструкції поверхні отворів вуглепластику при свердлінні пакетів вуглепластик/ титановий сплав все ще є складним завданням через важкі умови різання. Незважаючи на те, що було докладено багато зусиль для забезпечення якості отвору шляхом вдосконалення технології свердління, геометрії інструменту, режимів різання та змащувально – охолоджувального середовища. На сьогодні феномен теплового розширення свердла все ще погано вивчений і не враховується при забезпеченні точності отвору.

5. Забезпечення шорсткості поверхні отворів, особливо у шарі вуглепластику залишається актуальною інженерною задачею. Взаємозв'язок режимів різання та параметрів шорсткості поверхні отвору є добре дослідженим. Разом з тим, вплив температури свердління на показники шорсткості є мало вивченим. Тому проведення дослідження з метою виявлення взаємозв'язку між значеннями температури свердління та шорсткістю отвору заслуговує більш детального розгляду та вивчення, що і визначило вектор подальшого дослідження.

2 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ШОРСТКОСТІ ТА ТЕМПЕРАТУРИ ПРИ СВЕРДЛІННІ ОТВОРІВ У ПАКЕТАХ ВУГЛЕПЛАСТИК/ТИТАНОВИЙ СПЛАВ

2.1 Відомості про оброблюваний матеріал та різальний інструмент

Експериментальне дослідження впливу режимів різання на шорсткість оброблювальної поверхні здійснювалося при свердлінні пакету вуглепластик/титановий сплав. Шар вуглепластику, що було використано у пакетів, складався з 45 однонаправлених шарів вуглецевого волокна ІМ7 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 вуглепластика 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. 2.1). 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.

Таблиця 2.1 - Механічні властивості сплаву Ti-2.5Al-2Mn

Межа міцності на розрив, (МПа)	Модуль пружності, (ГПа)	Густина, (кг/м ³)	Подовження (%)	Теплопровідність, (Вт/(м·К))	Твердість, (HV)
735	115	4550	10	9.63	178

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 (Рис. 2.1). Були визначені: 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. 2.2).



Рисунок 2.1 – Вимірювання геометричних параметрів свердла

Таблиця 2.2 - Геометрія свердла 5510-R-RT100U Guhring

Геометричні параметри	Номер свердла відповідно до номеру досліду									
	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	10,000
Радіальне биття, мм	0,010	0,012	0,016	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008

2.2 Методика планування експерименту

Метод Тагучі передбачає зменшення варіацій у процесі за допомогою надійного планування експериментів. Загальна мета методу — виробництво високоякісного продукту з низькими витратами для виробника. Метод Тагучі був розроблений доктором Генічі Тагучі з Японії. Тагучі розробив метод

планування експериментів для дослідження того, як різні параметри впливають на середнє значення та дисперсію характеристики продуктивності процесу, яка визначає, наскільки добре функціонує процес. План експерименту, запропонований Тагучі, передбачає використання ортогональних масивів для організації параметрів, що впливають на процес, і рівнів, на яких вони повинні змінюватися. Замість того, щоб перевіряти всі можливі комбінації, як факторний дизайн, метод Тагучі перевіряє пари комбінацій. Це дозволяє збирати необхідні дані, щоб визначити, які фактори найбільше впливають на якість продукту або процесу, з мінімальною кількістю експериментів, таким чином заощаджуючи час і ресурси. Метод Тагучі найкраще використовувати, коли є проміжна кількість змінних (від 3 до 50), мало взаємодій між змінними та коли лише кілька змінних роблять значний внесок.

Масиви планів експерименту вибираються за кількістю параметрів (змінних) і кількістю рівнів (станів). Дисперсійний аналіз даних, зібраних за планом експериментів Тагучі, можна використовувати для вибору нових значень параметрів для оптимізації характеристик продуктивності. Дані з масивів можна проаналізувати, побудувавши дані та виконавши візуальний аналіз, дисперсійний аналіз, або використовуючи метод найменших квадратів, для перевірки значущості факторів.

Основними принципами методу Тагучі є :

1. Якість має бути забезпечена при проектуванні продукту, а не перевірятися на ньому. Якість розроблена в процес через проектування системи, проектування параметрів і проектування допусків. Проектування параметрів продукту виконується шляхом визначення параметрів процесу, які найбільше впливають на продукт, а потім їх проектування, щоб забезпечити задану цільову якість продукту.

2. Якість найкраще досягається шляхом мінімізації відхилення від цілі. Продукт має бути розроблений таким чином, щоб він був несприйнятливим до неконтрольованих факторів навколишнього середовища. Іншими словами,

співвідношення сигналу (якості продукту) і шуму (неконтрольованих факторів) має бути високим.

3. Вартість забезпечення якості повинна вимірюватися як функція відхилення від стандартизованих значень параметру, а втрати повинні вимірюватися в масштабах системи. Це концепція функції втрат, або загальних втрат, понесених споживачем і суспільством від продукту низької якості.

Загальні кроки, пов'язані з методом Тагучі, такі:

1. Визначте ціль процесу, або, точніше, цільове значення для вимірювання ефективності процесу. Це може бути швидкість потоку, температура тощо. Ціль процесу також може бути мінімумом або максимумом; наприклад, метою може бути максимізація вихідної швидкості потоку. Відхилення характеристики продуктивності від цільового значення використовується для визначення функції втрат для процесу.

2. Визначте параметри конструкції, що впливають на процес. Параметри – це змінні в межах процесу, які впливають на вимірювання продуктивності, такі як температура, тиск тощо, якими можна легко керувати. Необхідно вказати кількість рівнів, на яких потрібно змінювати параметри. Наприклад, температуру можна змінювати до низького та високого значення 40 °C і 80 °C. Збільшення кількості рівнів для зміни параметра збільшує кількість експериментів, які необхідно провести.

3. Створіть ортогональні масиви для планування параметрів із зазначенням кількості та умов для кожного експерименту. Вибір ортогональних масивів базується на кількості параметрів і рівнях варіації для кожного параметра.

4. Проведіть експерименти, зазначені в заповненому масиві, щоб зібрати дані про вплив на показник продуктивності.

5. Повний аналіз даних, щоб визначити вплив різних параметрів на показник продуктивності.

Планування експерименту здійснювалось за методикою рабастного планування на основі ортогонального масиву Тагучі L_9 . План експерименту

полягав у варіюванні трьох факторів: швидкість різання (v , м/хв) та подачі (s , мм/об), часу відтермінування на $3^{\text{ох}}$ рівнях, що дозволило сформувати матрицю кодування та таблицю декодування факторів та їх рівнів (табл. 2.3).

Механічна обробка пакету вуглепластик/титановий сплав проводилась з постійними значенням рівнів факторів у межах дослідження для обох шарів пакету. Для вивчення впливу режимів різання на шорсткість оброблювальної поверхні та температуру різання було запропоновано проводити вимірювання градієнту температури у різальному інструменті методом штучної термопари.

Таблиця 2.3 – Варіювання факторів за методикою Тагучі L_9

Назва фактору	Номер дослідження								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Швидкість різання, v (м/хв)	15	15	15	40	40	40	65	65	65
Подача, s (мм/об)	0,02	0,05	0,08	0,02	0,05	0,08	0,02	0,05	0,08
Час відтермінування, T_d (с)	120	10	5	10	5	120	5	120	10

Таблиця 2.4 – Матриця експерименту

№ дослідження	Кодування факторів та рівнів			Декодування факторів та рівнів		
	v , (м/хв)	s , (мм/об)	T_d , (с)	v , (м/хв)	s , (мм/об)	T_d , (с)
1	1	1	1	15	0,02	120
2	1	2	2	15	0,05	10
3	1	3	3	15	0,08	5
4	2	1	2	40	0,02	10
5	2	2	3	40	0,05	5
6	2	3	1	40	0,08	120
7	3	1	3	65	0,02	5
8	3	2	1	65	0,05	120
9	3	3	2	65	0,08	10

2.3 Експериментальна установка

Експериментальна установка була реалізована на базі 5-осьового фрезерного центра DMU 85V CNC (рис. 2.2).

Заготовка вуглепластик/титановий сплав була закріплена в лещатах Schunk Konte's KSC-F-125 з похибкою базування 0,02 мм, які були закріплені на столі верстата. Безпосередньо у ході дослідження контрольованим параметром був

температурний градієнт свердла. Температура свердла була виміряна за допомогою обертового бездротового пристрою для вимірювання температури, який був затиснутий на цанговій оправці HSK40.

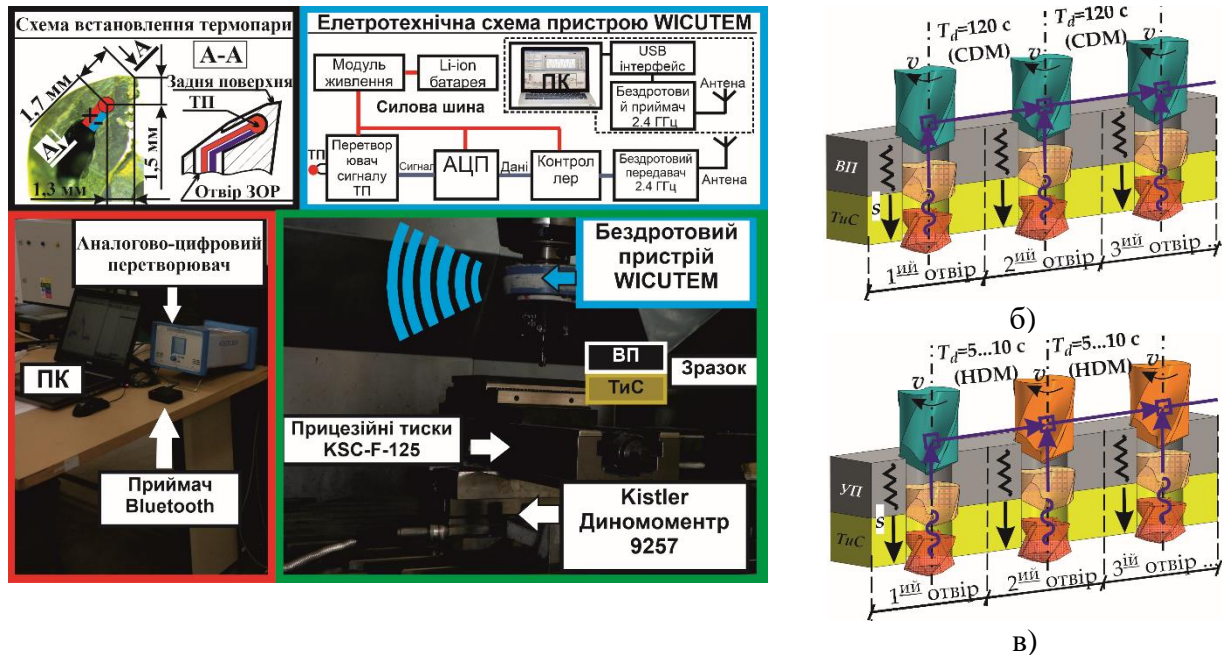


Рисунок 2.2 – Принципова схема свердління пакетів вуглепластик/титановий сплав: а) експериментальна установка на базі п'яти осьового верстата DMU-85V; б) технологічна схема свердління отворів з відтермінуванням (CDM); в) технологічна схема свердління отворів з відтермінуванням (HDM) [51]

Функціонування пристрою базується на поєднанні вимірювання ефекту Зеебека з компенсацією холодного з'єднання 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. Сигнал надходив на бездротовий приймач, приєднаний до ПК через USB COM порт, що дозволило фіксувати сигнал температури свердління у режимі реального часу. Діапазон вимірювань температури термопар К - типу становив від $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $1036\text{ }^{\circ}\text{C}$ з точністю $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. 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 ріжучої кромки та 1,7 мм від зовнішнього кута (рис.2.2).

2.4 Методика вимірювання шорсткості отворів

Шорсткість отворів вимірювалась на профілографі Profilograph Surfcom 5000 (Рис. 2.2). Контроль шорсткості здійснювався по чотирьом параметрам, а саме R_q , R_b , R_v , R_{Sm} [34]. 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 профілі, описувані випадковими функціями (рис. 2.3, формула 2.1)[34].

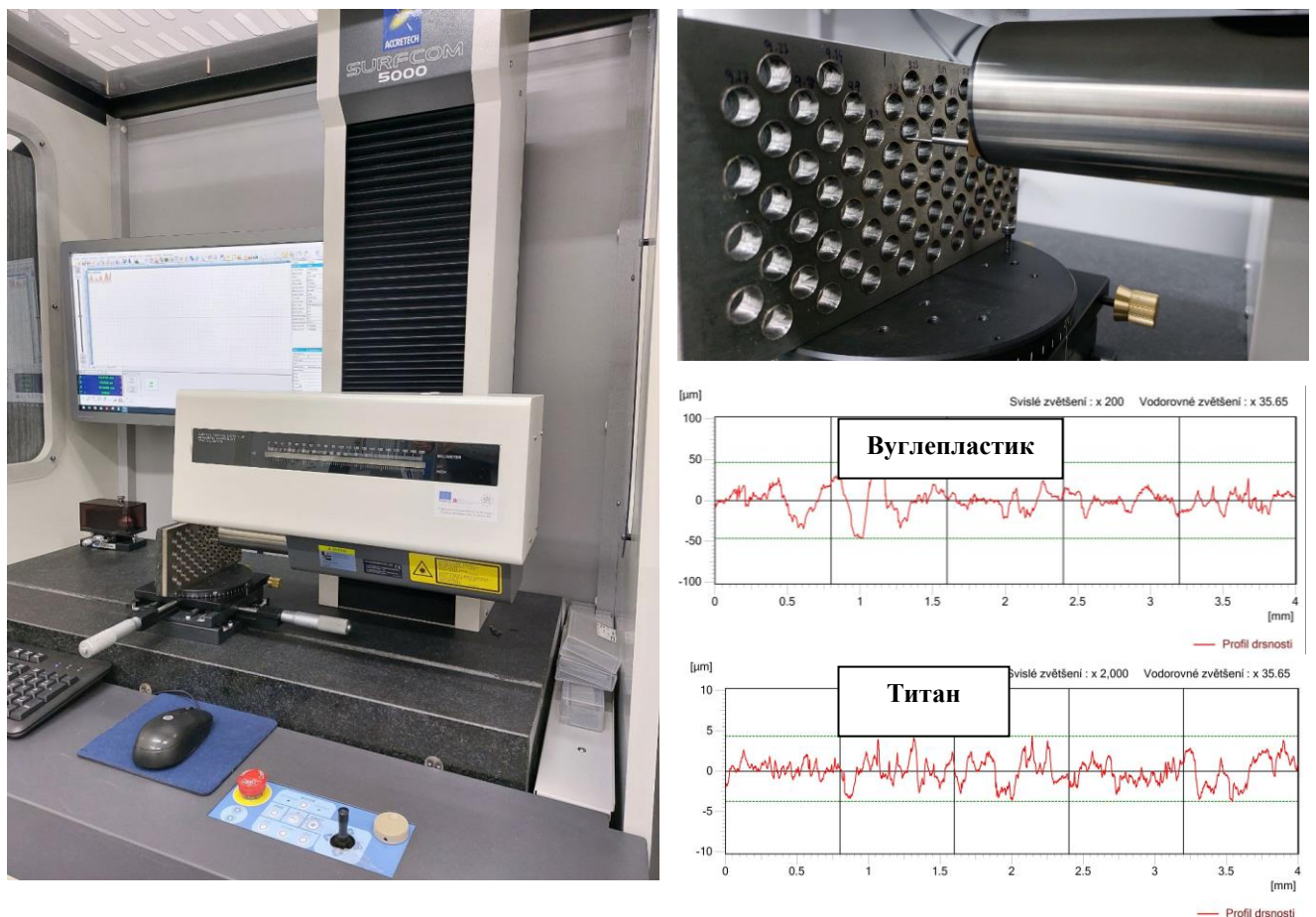


Рисунок 2.3 – Вимірювання шорсткості циліндричних отворів у пакеті вуглепластик/ титановий сплав

Теоретична схема вимірювання шорсткості по параметру R_q має вигляд (Рис. 2.4).

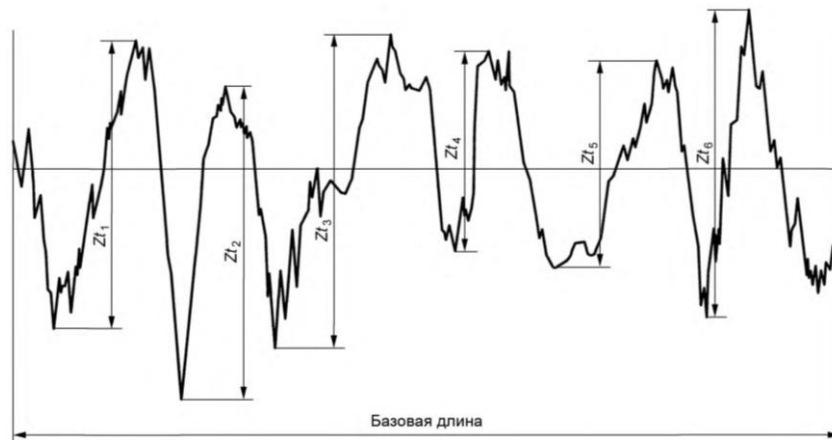


Рисунок 2.4 – Профіль мікронерівностей за параметром R_q

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} Z^2 x dx} \quad (2.1)$$

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. 2.4., формула 2.2) [34].

$$R_t = \max(R_{vi}) + \max(R_{pi}) \quad (2.2)$$

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 (рис. 2.5) [34].

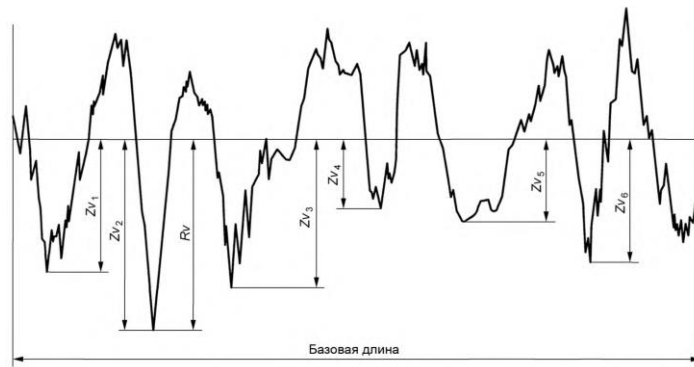


Рисунок 2.5 – Найбільша глибина западин профілю мікронерівностей за параметром R_v

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 (рис. 2.6, формула 2.3).

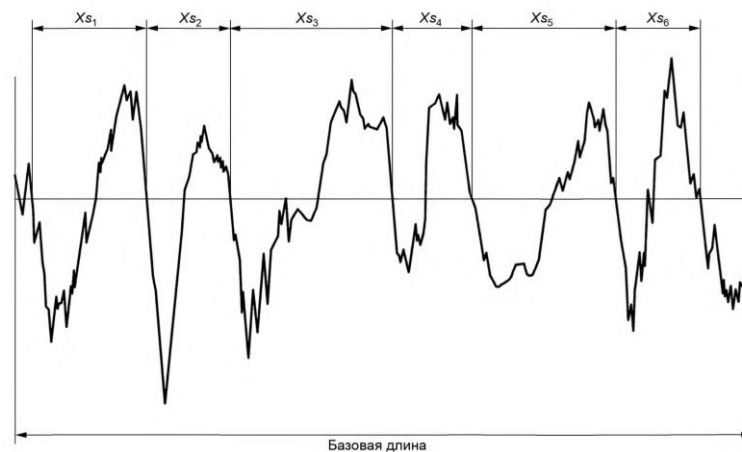


Рисунок 2.6 – Ширина елементів профілю

$$R_{Sm} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_{si} \quad (2.3)$$

2.5 Висновки

1. Дослідження впливу режимів різання на шорсткість поверхні визначено проводи на прикладі пакетів вуглепластик/ титановий сплав з товщиною шару вуглепластику 9 мм та товщиною шару титанового сплаву 8 мм при свердлінні свердлом $\varnothing 10$ мм з головним кутом у плані 140° (5510-R-RT100U

Guhring) виготовленого з одно карбідного твердого сплаву ВК9 з покриттям із нітриду титану.

2. Запропоновано план експериментального дослідження, що складається з дев'яти дослідів спроектований за методикою Тагучі з варіюванням факторів швидкості різання та подачі на трьох рівнях в діапазоні: 15-65 м/хв, 0,02 – 0,08 мм/об.

3. Розроблено експериментальну установку на базі фрезерного оброблювального центру DMU85V можливістю вимірювання температури свердла в процесі обробки.

4. Шорсткість поверхні оброблених отворів запропоновано вимірювати на профілографі Surfcom 5000. Контрольованими параметрами мікрорельєфу поверхні отворів визначено: R_q – середньоквадратичне відхилення мікрорельєфу, R_t – повна висота профілю, R_v - максимальна глибина западини профілю та R_{Sm} – середня ширина елементів профілю.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ НА ТЕМПЕРАТУРУ СВЕРДЛА ТА ШОРСТКІСТЬ ПОВЕРХНІ ПРИ СВЕРДЛІННІ ОТВОРІВ У ПАКЕТІВ ВУГЛЕПЛАСТИК/ ТИТАНОВИЙ СПЛАВ

3.1 Дослідження впливу режимів різання

У ході експериментального дослідження згідно плану експерименту було проведено дев'ять дослідів у результаті яких було просвердлено по одному отвору для кожної досліду. Свердління отворів у кожному досліді здійснювалося новим свердлом, що дозволило виключити вплив зношення свердла від попередніх дослідів. За результатами вимірювання геометрії свердла було визначено, що відстань від вершини свердла до початку робочої частини складає 1,82 мм.

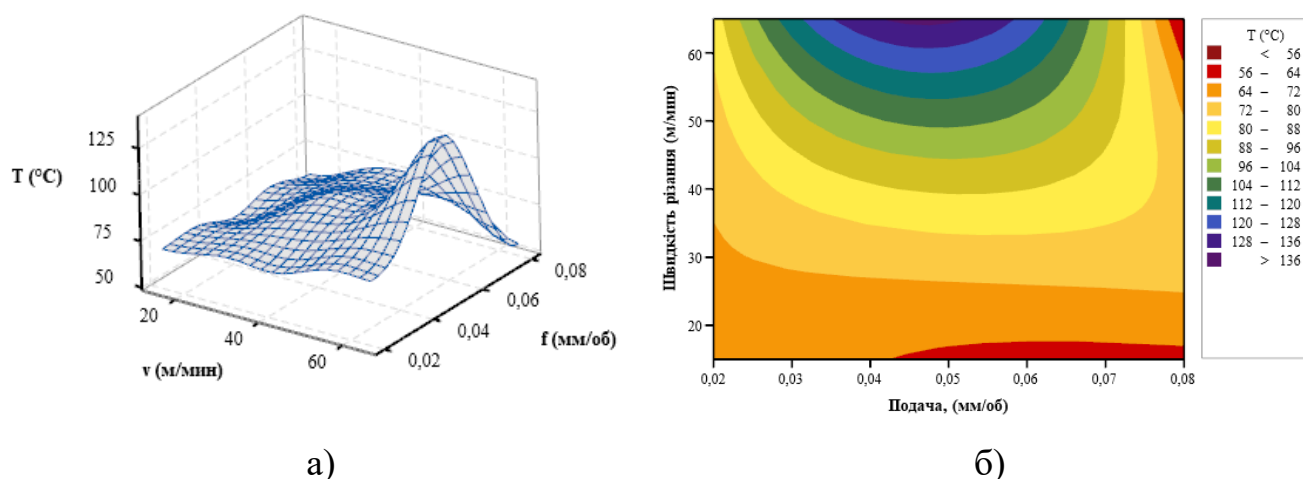


Рисунок 3.1 – Температура свердління у шарі вуглепластику

Аналіз кривих температур свердління при обробці отвору № 1 для всіх дослідів виявив, що температура свердління в процесі обробки вуглепластику коливалася від 48,6 °C до 136 °C (рис. 3.1), а для шару титанового сплаву - від 189,8 °C до 461,4 °C (рис. 3.2). Максимальні значення температури свердління у вуглепластику було виміряно при свердлінні при $V = 65$ 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.

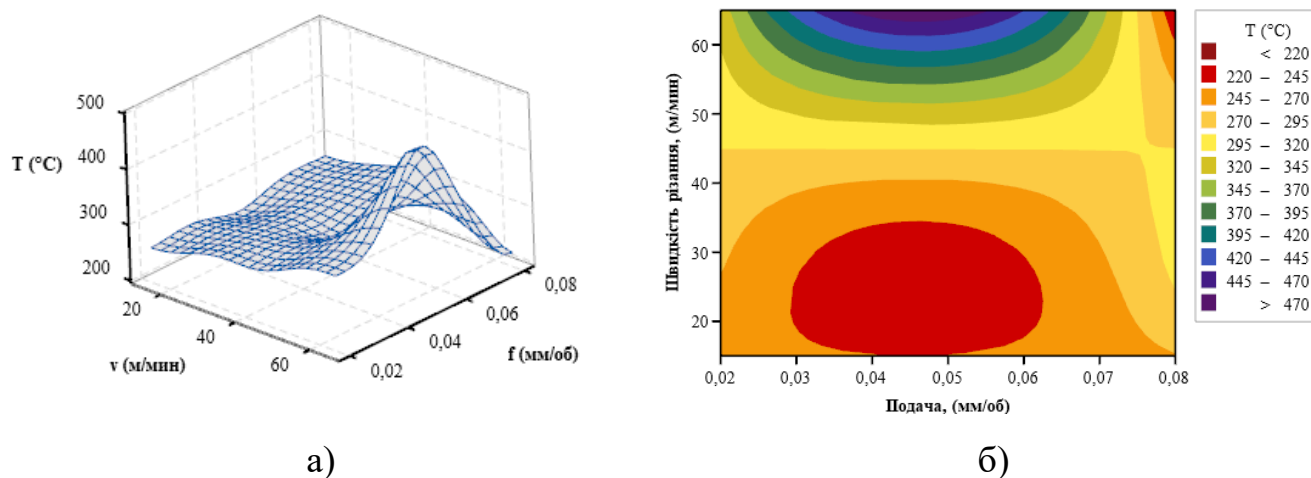


Рисунок 3.2 – Температура свердління у шарі титанового сплаву

3.2 Шорсткість поверхні у шарах вуглепластику та титанового сплаву

У результаті виконання експериментального дослідження по вивченню впливу режимів різання при свердлінні на шорсткість поверхні та вимірювання визначених параметрів шорсткості було отримано дані при 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. Отримані результати наведені окремо для кожного шару оброблюваного пакету. У якості вихідних даних для аналізу параметрів шорсткості було використано проколи вимірювання отримані з приладу Zeiss Surfcom 5000, що наведені у Додатку А.

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. 3.3 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, $s = 0,02$ 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, $s = 0,08$

мм/об. Найбільш не сприятливим, з точки зору забезпечення мінімальної шорсткості виявилися режими $v = 65$ м/хв, $s = 0,02$ мм/об та $v = 65$ м/хв, $s = 0,08$ мм/об (рис. 3.3 б).

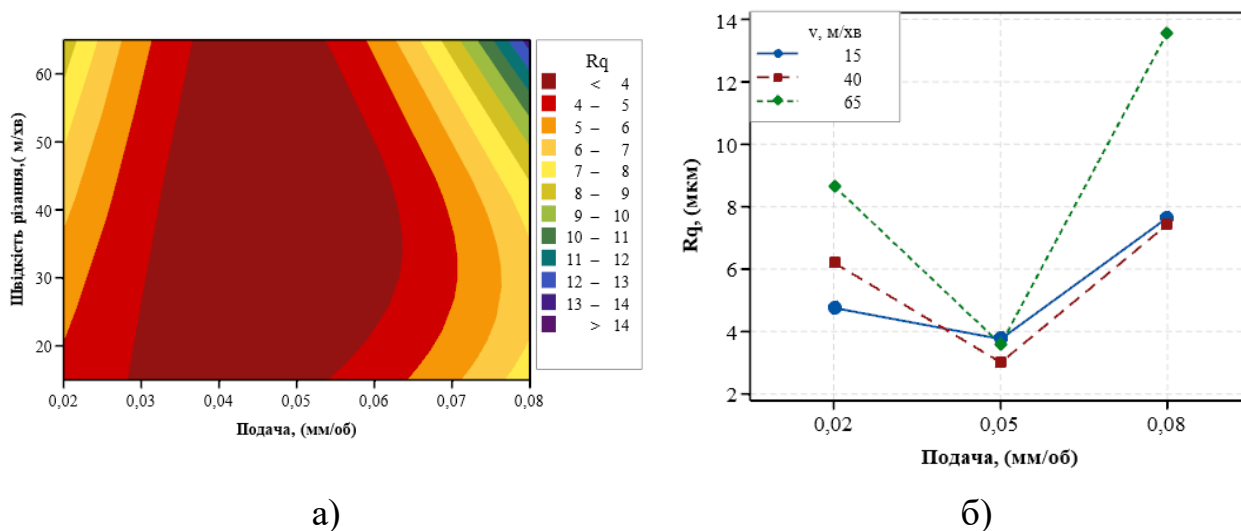


Рисунок 3.3 – Шорсткість поверхні отвору у шарі вуглепластику за параметром R_q

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, $s = 0,05$ мм/об (рис. 3.4 а).

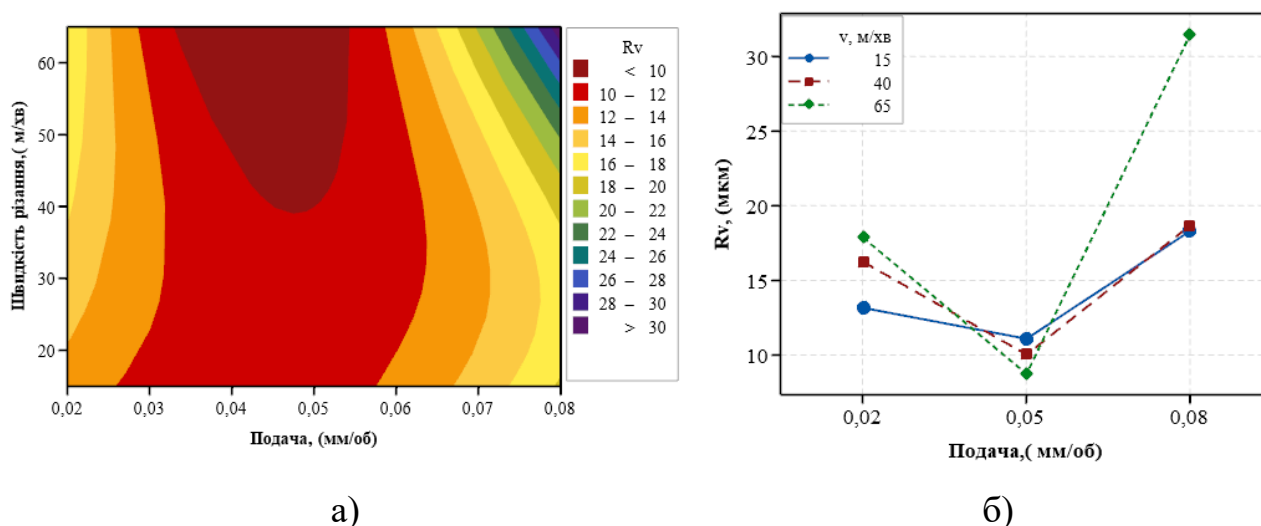


Рисунок 3.4 – Шорсткість поверхні отвору у шарі вуглепластику за параметром R_v

З огляду на те, що параметр R_v характеризує максимальну глибину западин на базовій довжині, та враховуючи що подібні западини є концентраторами напружень, що в умовах силового механічного з'єднання шарів пакету є вкрай не бажаним і

потенційно може бути фактором зниження ресурсу з'єднання та передумовою розшарування шарів пакету, найбільш раціональним виглядає обробка з режимами $v = 40$ м/хв, $s = 0,05$ мм/об. Локальні максимуми параметру, у досліджуваному діапазоні режимів різання були виміряні на режимах з максимальною швидкістю різання $v = 65$ м/хв та $s = 0,02$ мм/об та $0,08$ мм/об відповідно (рис. 3.4 б).

При аналізі значень максимальних виступів та западин, що характеризуються параметром R_t , 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. 3.5 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 $s = 0,08$ 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. 3.5 б).

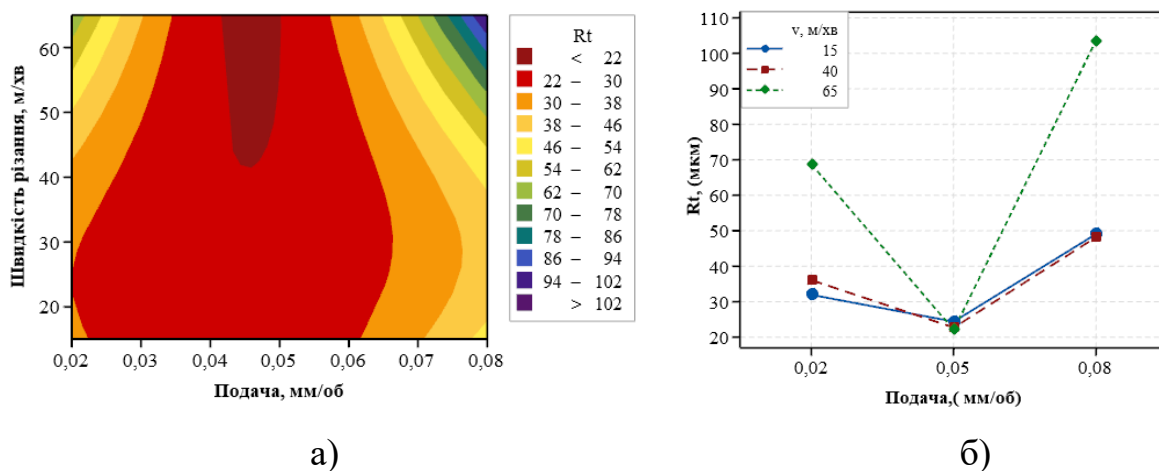


Рисунок 3.5 – Шорсткість поверхні отвору у шарі вуглепластику за параметром R_t

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. 3.6 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 $s = 0,02$ мм/об, в той

час як найбільше при $v = 40$ м/хв та $s = 0,08$ 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. 3.6 б).

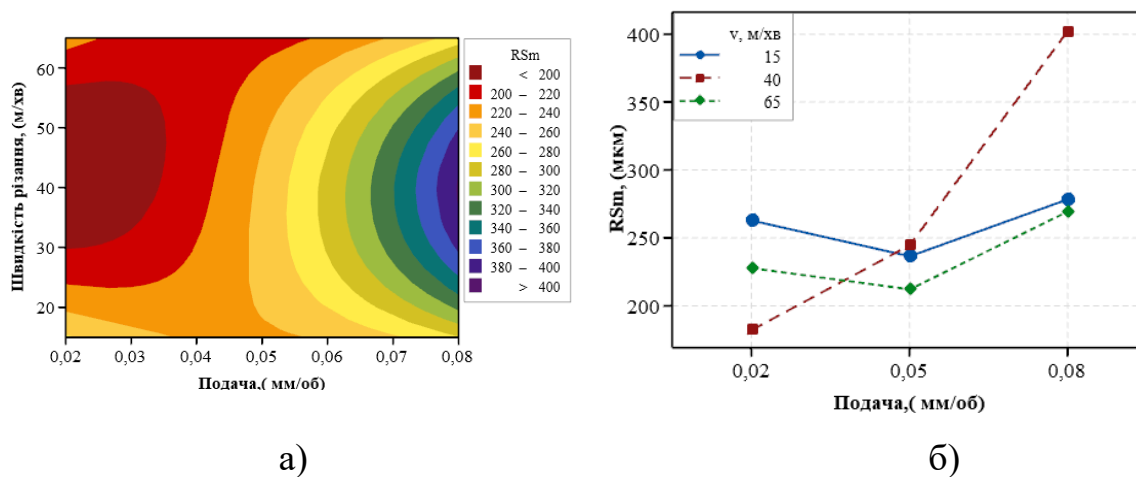


Рисунок 3.6 – Шорсткість поверхні отвору у шарі вуглепластику за параметром R_{Sm}

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. 3.7 а). 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, $s = 0,02$ мм/об шорсткість поверхні варіювалася в діапазоні R_q 2,22 – 2,38 мкм, збільшуючись зі зростанням швидкості різання. Таким чином зменшення подачі навіть в умовах 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. 3.7 б). Зниження значень параметру R_q відбувалося за умов зростання подачі при $v = \text{const}$. Порівнюючи отримані результати вимірювання шорсткості по R_q у титановому сплаві з аналогічним параметром у вуглепластику, слід відзначити, у шарі вуглепластику розсіювання значень контрольованого параметру варіюється у більшому діапазоні значень, що зумовлено анізотропією властивостей шару

вуглепластику, та відповідно більшою чутливістю до зміни режимів різання. Подібна тенденція спостерігається і за рештою вимірювальних параметрів.

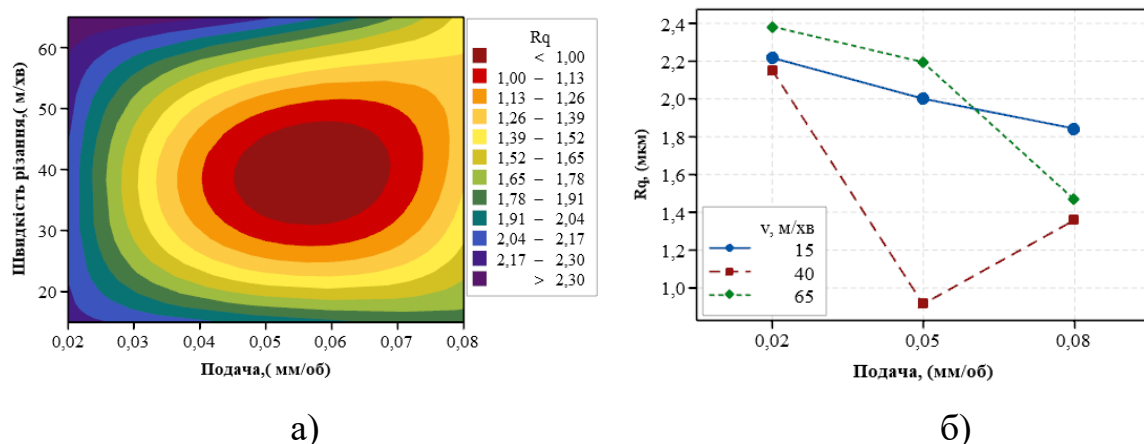


Рисунок 3.7 – Шорсткість поверхні отвору у шарі титанового сплаву за параметром R_q

Мінімальне значення найбільшої глибини западини $R_v=2,3$ мкм було отримано при свердлінні на $v = 40$ м/хв, $s = 0,05$ мм/об, хоча у решті дослідів зі зростанням швидкості різання значення параметру зростало при $s = \text{const}$, що відрізняє отримані результати від результатів вимірювання у вуглепластику (рис. 3.8 а).

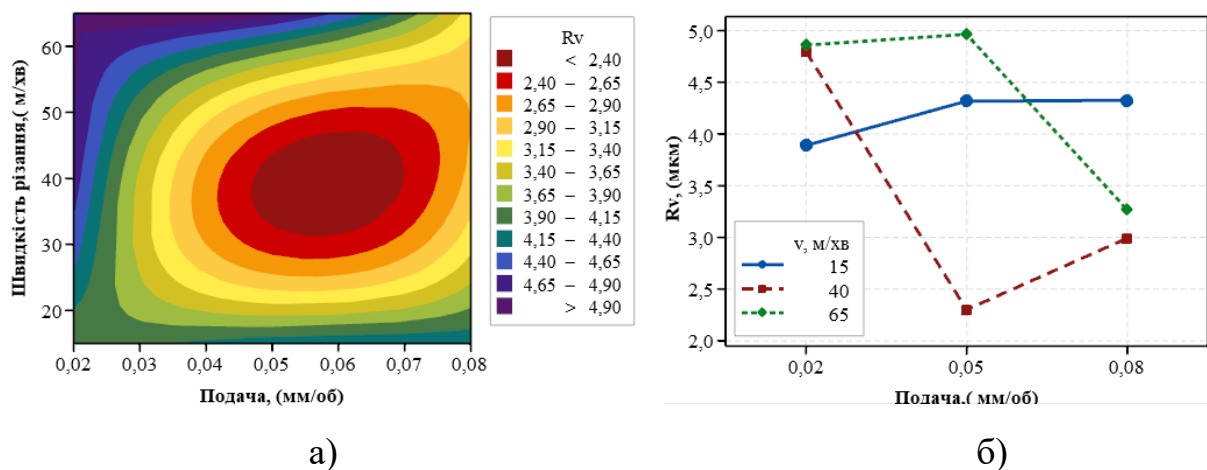


Рисунок 3.8 – Шорсткість поверхні отвору у шарі титанового сплаву за параметром R_v

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. 3.8 б).

Аналізуючи значення різниці максимальних вершин и максимальних запади було виявлено, що поєднання мінімальної подачі та швидкість 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, $s = 0,05$ мм/об (рис. 3.9 б). 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.

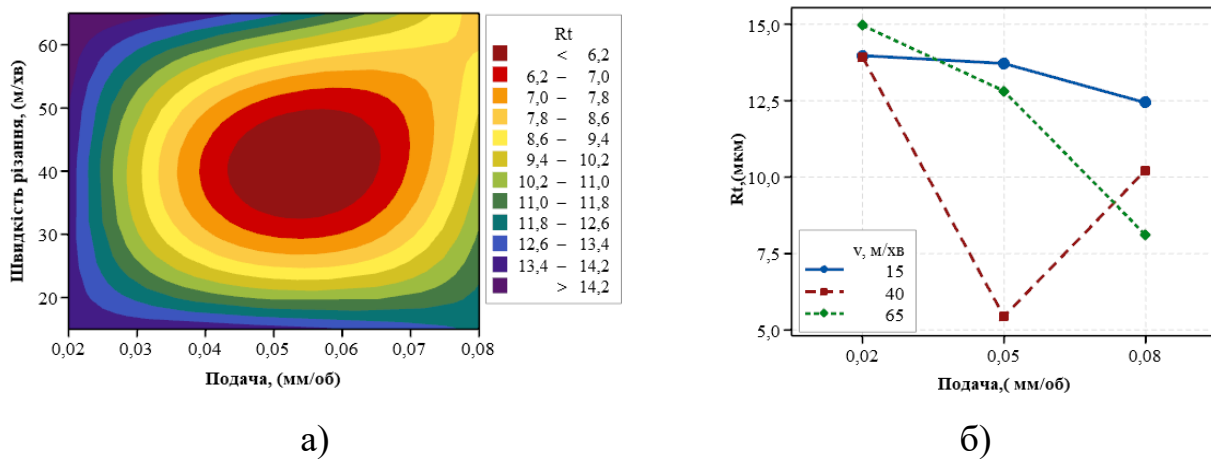


Рисунок 3.9 – Шорсткість поверхні отвору у шарі титанового сплаву за параметром R_t

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 $s = 0,05$ мм/об, в той час як найбільше при $v = 40$ м/хв та $s = 0,08$ мм/об. Максимальне значення параметру було отримано при $v = 40 - 65$ м/хв та $s = 0,02$ мм/об. Аналізуючи криві залежності ізольовано одна від одної впадає в око стабільність параметру R_{Sm} при обробці $v = 15$ м/хв та $s = 0,02 - 0,08$ мм/об, що може свідчити про досягнення балансу збурюючих сил (сили 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. 3.10). При обробці $v = 65$ м/хв та $s = 0,02 - 0,08$ мм/об значення параметру R_{Sm} підпорядковуються тренду до зниження при збільшенні подачі.

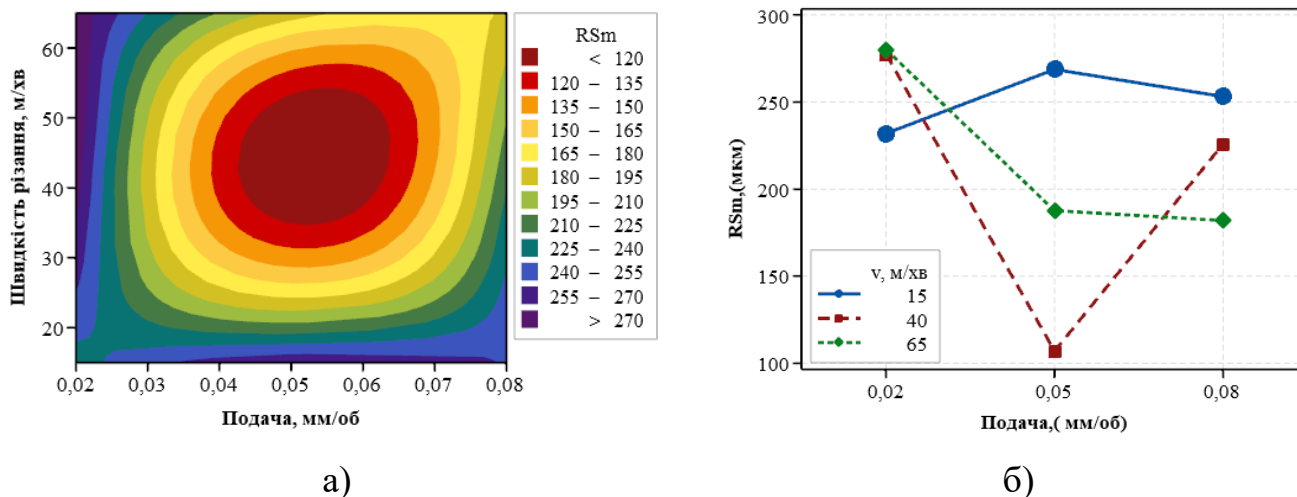


Рисунок 3.10 – Шорсткість поверхні отвору у шарі титанового сплаву за параметром R_{Sm}

3.3 Висновок

1. 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 $s = 0,05 - 0,08$ мм/об, а максимум $v = 65$ м/хв та $s = 0,05$ мм/об. Для титанового сплаву групування локального мінімуму та максимуму відбувалося при $v = 15$ м/хв, $s = 0,05$ мм/об та $v = 65$ м/хв, $f = 0,05$ об/хв, досягаючи 220 °С та 461 °С відповідно.

2. Аналіз результатів вимірювання засвідчив, що мінімальні або близькі до мінімальних значення середньоквадратичного відхилення профілю мікронерівностей, повної висоти профілю, максимальної глибини западин профілю на базовій довжині та середньої ширини елементів профілю були отримані при $v = 40$ м/хв та $s = 0,05$ мм/об.

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

4. 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.

5. 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.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Обробка пакетів вуглепластик/ титановий сплав супроводжується значним виділення шкідливої дисперсійної стружки вуглепластику, що утворюється при свердлінні. Враховуючи вимоги Закону України «Про охорону праці» важливим є забезпечення безпечних умов для роботи виробничого персоналу. Беручи до уваги вимогу Закону України «Про охорону праці» та тему дипломного проекту, що присвячена механічній обробці матеріалів для подальшого аналізу дотримання вимог безпечності виробничого процесу механічної обробки було розглянуто питання «Характеристика та дія на організм людини шкідливих речовин у повітрі робочої зони. Нормування вмісту шкідливих речовин у повітрі» та розрахунок витяжної вентиляції наведені у Додатку Б.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВОК

В дипломному проекті досліджено вплив режимів різання на параметри шорсткості поверхні при свердлінні отворів у пакетах вуглепластик/ титановий сплав.

1. 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.

2. Запропонована в роботі методика дослідження температури свердління дозволила визначити її діапазони 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.

3. Кількісно визначено значення параметрів шорсткості обробленої поверхні шарів пакету та з'ясовано, що при збільшенні подачі відбувається збільшення параметрів шорсткості у шарі вуглепластику, але їх зменшення у шарі титанового сплаву.

4. Розраховано об'єм витяжної вентиляції що забезпечить видалення шкідливих речовин у формі пилу вуглепластику з виробничої ділянки та визначено технічні характеристики вентилятора.

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.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Kim, D. and M. Ramulu, Drilling process optimization for graphite/bismaleimide-titanium alloy stacks. *Composite Structures*, 2004. **63**(1): p. 101-114.
2. Isbilir, O. and E. Ghassemieh, COMPARATIVE STUDY OF TOOL LIFE AND HOLE QUALITY IN DRILLING OF CFRP/TITANIUM STACK USING COATED CARBIDE DRILL. *Machining Science and Technology*, 2013. **17**(3): p. 380-409.
3. Abdelhafeez, A.M., et al., Burr formation and hole quality when drilling titanium and aluminium alloys. *Cirpe 2015 - Understanding the Life Cycle Implications of Manufacturing*, 2015. **37**: p. 230-235.
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**(8): p. 1097-1108.
5. Xu, J.Y., et al., On the analysis of temperatures, surface morphologies and tool wear in drilling CFRP/Ti6Al4V stacks under different cutting sequence strategies. *Composite Structures*, 2020. **234**.
6. Voss, R., et al., Evaluation of bore exit quality for fibre reinforced plastics including delamination and uncut fibres. *Cirp Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2016. **12**: p. 56-66.
7. Giasin, K., et al., The effect of cutting tool coating on the form and dimensional errors of machined holes in GLARE (R) fibre metal laminates. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020. **107**(5-6): p. 2817-2832.
8. Wang, H.X., X.H. Zhang, and Y.G. Duan, Investigating the Effect of Low-Temperature Drilling Process on the Mechanical Behavior of CFRP. *Polymers*, 2022. **14**(5): p. 12.
9. Ghafarizadeh, S., G. Lebrun, and J.F. Chatelain, Experimental investigation of the cutting temperature and surface quality during milling of unidirectional carbon fiber reinforced plastic. *Journal of Composite Materials*, 2016. **50**(8): p. 1059-1071.

10. Masek, P., P. Zeman, and P. Kolar, Cutting temperature measurement in turning of thermoplastic composites using a tool-work thermocouple. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021. **116**(9-10): p. 3163-3178.
11. Fernandez-Perez, J., et al., Hybrid Composite-Metal Stack Drilling with Different Minimum Quantity Lubrication Levels. *Materials*, 2019. **12**(3): p. 13.
12. Li, J., et al. Temperature Field Distribution Model in Drilling of CFRP/Ti Stacks Structure. in *Journal of Physics: Conference Series*. 2020.
13. Sauer, K., M. Dix, and M. Putz, 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**(3): p. 7.
14. Hassan, A.A., et al., An analytical model to predict interlayer burr size following drilling of CFRP-metallic stack assemblies. *Cirp Annals-Manufacturing Technology*, 2020. **69**(1): p. 109-112.
15. Basmaci, G., et al., Impact of Cryogenic Condition and Drill Diameter on Drilling Performance of CFRP. *Applied Sciences-Basel*, 2017. **7**(7): p. 12.
16. Pecat, O. and E. Brinksmeier, Tool wear analyses in low frequency vibration assisted drilling of CFRP/Ti6Al4V stack material. 6th Cirp International Conference on High Performance Cutting (Hpc2014), 2014. **14**: p. 142-147.
17. Hussein, R., et al., An Investigation into ToolWear and Hole Quality during Low-Frequency Vibration-Assisted Drilling of CFRP/Ti6Al4V Stack. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2019. **3**(3): p. 19.
18. Xu, J.Y. and M. El Mansori, Experimental study on drilling mechanisms and strategies of hybrid CFRP/Ti stacks. *Composite Structures*, 2016. **157**: p. 461-482.
19. Wu, T., et al., Experimental Analysis of Residual Stresses in CFRPs through Hole-Drilling Method: The Role of Stacking Sequence, Thickness, and Defects. *Journal of Composites Science*, 2022. **6**(5): p. 21.
20. Hassan, M.H., et al., Effect of Twist Drill Geometry and Drilling Parameters on Hole Quality in Single-Shot Drilling of CFRP/Al7075-T6 Composite Stack. *Journal of Composites Science*, 2021. **5**(7): p. 14.

21. Giasin, K., et al., The effects of through tool cryogenic machining on the hole quality in GLARE? fibre metal laminates. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021. **64**: p. 996-1012.
22. Hussein, R., et al., Low-frequency vibration-assisted drilling of hybrid CFRP/Ti6Al4V stacked material. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018. **98**(9-12): p. 2801-2817.
23. Onawumi, P.Y., et al., Ultrasonically assisted drilling of aerospace CFRP/Ti stacks. *8th Cirp Conference on High Performance Cutting (Hpc 2018)*, 2018. **77**: p. 383-386.
24. SenthilKumar, M., A. Prabukarthi, and V. Krishnaraj, Study on Tool Wear and Chip Formation during Drilling Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)/Titanium Alloy (Ti6Al4V) Stacks. *International Conference on Design and Manufacturing (Icondm2013)*, 2013. **64**: p. 582-592.
25. Caggiano, A., R. Angelone, and R. Teti, Image Analysis for CFRP Drilled Hole Quality Assessment. *10th Cirp Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering - Cirp Icme '16*, 2017. **62**: p. 434-439.
26. Zitoune, R., et al., Temperature and wear analysis in function of the cutting tool coating when drilling of composite structure: In situ measurement by optical fiber. *Wear*, 2017. **376**: p. 1849-1858.
27. Teti, R., et al., Smart Multi-Sensor Monitoring in Drilling of CFRP/CFRP Composite Material Stacks for Aerospace Assembly Applications. *Applied Sciences-Basel*, 2020. **10**(3): p. 16.
28. Han, C.W., et al., Thrust Force-Based Tool Wear Estimation Using Discrete Wavelet Transformation and Artificial Neural Network in CFRP Drilling. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2021. **22**(9): p. 1527-1536.
29. Giasin, K. and S. Ayvar-Soberanis, Microstructural investigation of drilling induced damage in fibre metal laminates constituents. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 2017. **97**: p. 166-178.
30. Kumar, D. and S. Gururaja, Investigation of hole quality in drilled Ti/CFRP/Ti laminates using CO2 laser. *Optics and Laser Technology*, 2020. **126**: p. 15.

31. Wang, H.X., X.H. Zhang, and Y.G. Duan, Effects of drilling area temperature on drilling of carbon fiber reinforced polymer composites due to temperature-dependent properties. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018. **96**(5-8): p. 2943-2951.
32. Xu, J. and M. El Mansori, Experimental studies on the cutting characteristics of hybrid CFRP/Ti stacks. *Procedia Manufacturing*, 2016. **5**(1): p. 270-281.
33. Wang, C., et al., Occurrence and formation mechanism of surface cavity defects during orthogonal milling of CFRP laminates. *Composites Part B-Engineering*, 2017. **109**: p. 10-22.
34. Samsudeensadham, S. and V. Krishnaraj, Drilling study on CFRP/Ti-6Al-4V stacks using chip breaker grooved drill. *Materials and Manufacturing Processes*: p. 15.
35. Kuo, C.L., et al., Development of single step drilling technology for multilayer metallic-composite stacks using uncoated and PVD coated carbide tools. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018. **31**: p. 286-300.
36. Kumar, D., S. Gururaja, and I.S. Jawahir, Machinability and surface integrity of adhesively bonded Ti/CFRP/Ti hybrid composite laminates under dry and cryogenic conditions. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020. **58**: p. 1075-1087.
37. An, Q., et al., Effects of drilling strategies for CFRP/Ti stacks on static mechanical property and fatigue behavior of open-hole CFRP laminates. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021. **64**: p. 409-420.
38. Yang, Y., 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*, 2022. **179**.
39. Nekrasov, S., et al., Research on the manufacture and strength of the innovative joint of FRP machine parts. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021. **72**: p. 338-349.
40. Ammar, M.M.A., et al., On the Sensing and Calibration of Residual Stresses Measurements in the Incremental Hole-Drilling Method. *Sensors*, 2021. **21**(22): p. 19.
41. Ashrafi, S.A., et al., Characterization and Effects of Fiber Pull-Outs in Hole Quality of Carbon Fiber Reinforced Plastics Composite. *Materials*, 2016. **9**(10): p. 12.

42. Ali, M., et al., Assessment of Cutting Performance of Cemented Tungsten Carbide Drills in Drilling Multidirectional T700 CFRP Plate. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2018. **2**(3): p. 14.
43. Osadchiy , I., et al., Development of integrated technology of FRP gear manufacturing. *Manufacturing Technology*, 2016. **16**(3): p. 574 - 578.
44. Aamir, M., et al., Recent advances in drilling of carbon fiber-reinforced polymers for aerospace applications: a review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019. **105**(5-6): p. 2289-2308.
45. Bayraktar, S. Assesment of Delamination on Drilling of Fiber Reinforced Polymer Composites and Metal Stacks. in *7th International symposium on machin.* 2016.
46. Karpat, Y., U. Karaguzel, and O. Bahtiyar, A thermo-mechanical model of drill margin-borehole surface interface contact conditions in dry drilling of thick CFRP laminates. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2020. **154**: p. 15.
47. Caggiano, A. and L. Nele, Comparison of drilled hole quality evaluation in CFRP/CFRP stacks using optical and ultrasonic non-destructive inspection. *Machining Science and Technology*, 2018. **22**(5): p. 865-880.
48. Alvarez-Alcon, M., 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. *Materials*, 2020. **13**(12): p. 17.
49. Geier, N., et al., Drilling of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites: Difficulties, challenges and expectations in 10th CIRP Sponsored Conference on Digital Enterprise Technologies (DET 2021) – Digital Technologies asEnablers of Industrial Competitiveness and Sustainability. 2021, *Procedia Manufacturing*. p. 284–289.
50. Kuruc, M., et al., The Influence of Cutting Parameters on Plastic Deformation and Chip Compression during the Turning of C45 Medium Carbon Steel and 62SiMnCr4 Tool Steel. *Materials*, 2022. **15**(2): p. 18.
51. Kolesnyk, V., et al., Application of ANN for Analysis of Hole Accuracy and Drilling Temperature When Drilling CFRP/Ti Alloy Stacks. *Materials*, 2022. **15**(5): p. 21.

52. Balan, A.S.S., et al., Numerical Modelling and Analytical Comparison of Delamination during Cryogenic Drilling of CFRP. *Polymers*, 2021. **13**(22): p. 15.
53. Geng, D.X., et al., Delamination formation and suppression during rotary ultrasonic elliptical machining of CFRP. *Composites Part B-Engineering*, 2020. **183**: p. 12.
54. Kim, D., A. Beal, and P. Kwon, Effect of Tool Wear on Hole Quality in Drilling of Carbon Fiber Reinforced Plastic-Titanium Alloy Stacks Using Tungsten Carbide and Polycrystalline Diamond Tools. *Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the Asme*, 2016. **138**(3): p. 11.
55. Melentiev, R., F.Z. Fang, and S.K.R. Narala, Influence of different pretreatments on Ti-6Al-4V surface integrity and scratch-resistance of epoxy coating: Analysis of topography, microstructure, chemistry and wettability. *Surface & Coatings Technology*, 2020. **404**: p. 14.
56. Hassan, M.H. and J. Abdullah, Single-shot titanium/carbon fiber reinforced composites/aluminum stacks holes drilling, in *Hole-Making and Drilling Technology for Composites: Advantages, Limitations and Potential*, A.B. Abdullah and S.M. Sapuan, Editors. 2019, Woodhead Publ Ltd: Cambridge. p. 135-148.
57. Poor, D.I., et al., A critical review of the drilling of CFRP composites: Burr formation, characterisation and challenges. *Composites Part B-Engineering*, 2021. **223**: p. 17.
58. Jia, Z.Y., et al., Analytical model for delamination of CFRP during drilling of CFRP/metal stacks. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020. **106**(11-12): p. 5099-5109.
59. Kolesnyk, V., et al., Experimental Study of Drilling Temperature, Geometrical Errors and Thermal Expansion of Drill on Hole Accuracy When Drilling CFRP/Ti Alloy Stacks. *Materials*, 2020. **13**(14): p. 17.
60. Shao, Z.Y., et al., The interface temperature and its influence on surface integrity in ultrasonic-assisted drilling of CFRP/Ti stacks. *Composite Structures*, 2021. **266**: p. 13.
61. Wang, B., et al., Mechanism of damage generation during drilling of carbon/epoxy composites and titanium alloy stacks. *Proceedings of the Institution of*

Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture, 2014. **228**(7): p. 698-706.

62. Bañon, F., et al. Study of the one-shot drilling of CFRP/Ti6Al4V stacks with a double tip angle cutting-tool geometry. in AIP Conference Proceedings. 2019.

63. Xu, J.Y. and M. El Mansori, Cutting modeling using cohesive zone concept of titanium/CFRP composite stacks. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2015. **16**(10): p. 2091-2100.

64. Xu, J.Y., et al., A comparison between vibration assisted and conventional drilling of CFRP/Ti6Al4V stacks. Materials and Manufacturing Processes, 2019. **34**(10): p. 1182-1193.

65. Yang, H.J., et al., EVALUATION OF CFRP HOLE QUALITY IN LOW FREQUENCY VIBRATION ASSISTED DRY DRILLING OF CFRP/TI STACKS. Proceedings of the Asme 13th International Manufacturing Science and Engineering Conference, 2018, Vol 4, 2018: p. 10.

66. Cui, J.C., et al., A novel method for predicting delamination of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) based on multi-sensor data. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021. **157**: p. 23.

67. Shao, Z.Y., et al., Feasibility study on ultrasonic-assisted drilling of CFRP/Ti stacks by single-shot under dry condition. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019. **105**(1-4): p. 1259-1273.

68. Xu, J.Y., et al., Investigation of minimum quantity lubrication effects in drilling CFRP/Ti6Al4V stacks. Materials and Manufacturing Processes, 2019. **34**(12): p. 1401-1410.

69. Yan, C.R., et al., Machining performance of PCD drill in low-frequency vibration-assisted drilling of CFRP/Ti6Al4V stack: with special emphasis on the plowing behavior. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021. **116**(7-8): p. 2269-2283.

70. Alonso, U., et al., Influence of flute number and stepped bit geometry when drilling CFRP/Ti6Al4V stacks. Journal of Manufacturing Processes, 2019. **39**: p. 356-370.

71. Xu, C.Y., et al., Design of internal-chip-removal drill for CFRP drilling and study of influencing factors of drilling quality. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020. **106**(5-6): p. 1657-1669.
72. Xu, J.Y. and M. El Mansori, Wear characteristics of polycrystalline diamond tools in orthogonal cutting of CFRP/Ti stacks. *Wear*, 2017. **376**: p. 91-106.
73. Qiu, X.Y., et al., Influence of main cutting edge structure on hole defects in CFRP/titanium alloy stacks drilling. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021. **69**: p. 503-513.
74. Hou, G.Y., 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*, 2020. **106**(3-4): p. 937-951.

ДОДАТОК А
(ПРОТОКОЛИ ВИМІРЮВАННЯ ШОРСКОСТІ)

ДОДАТОК Б
(ОХОРОНА ПРАЦІ)

ДОДАТОК В
(ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ)