

УДК 621:95.08: 62-4

DOI 10.36910/775.24153966.2022.73.26

В.О. Колесник, А.В. Божко, А.О. Нешта, Д.Г. Малимоненко

Сумський державний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ НА ТЕМПЕРАТУРНЕ РОЗШИРЕННЯ СВЕРДЛА ТА ТОЧНІСТЬ ОТВОРІВ СВЕРДЛІННІ ПАКЕТІВ «ВУГЛЕПЛАСТИК/ТИТАНОВИЙ СПЛАВ»

У цій роботі представлені та проаналізовані результати експериментального дослідження по вивченню впливу технологічних параметрів (режимів різання) на геометричну точність отворів та температурне розширення свердла в процесі свердління. Планування експерименту здійснювалось за методикою Тагучі за варіювання швидкості різання, подачі та часу відтермінування на трьох рівнях. Контрольованими параметрами була точність отворів, що вимірювалась за координатним методом на координатно-вимірвальній машині. Крім того у процесі свердління контролювалась температура свердління за допомогою бездротового пристрою WICUTEM, що поєднує метод штучної термопары та технологію Bluetooth. Перевірка гіпотези про вплив температурного розширення свердла та точність отворів в залежності від технологічних параметрів здійснювалась за допомогою методу скінчених елементів.

Ключові слова: пакети вуглепластик/титановий сплав; метод штучної термопары, температура свердління; температурне розширення; метод скінчених елементів; пристрій WICUTEM

В.А. Колесник, А.В. Божко, А.А. Нешта, Д.Г. Малимоненко

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ НА ТЕМПЕРАТУРНОЕ РАСШИРЕНИЕ СВЕРЛА И ТОЧНОСТЬ ОТВЕРСТИЙ ПРИ СВЕРЛЕНИИ ПАКЕТОВ «УГЛЕПЛАСТИК/ТИТАНОВЫЙ СПЛАВ»

В данной работе представлены и проанализированы результаты экспериментального исследования по изучению влияния технологических параметров (режимов резания) на геометрическую точность отверстий и температурное расширение сверла в процессе сверления. Планирование эксперимента осуществлялось по методике Тагучи с варьированием скорости резания, подачи и времени отсрочки на трех уровнях. Контролируемыми параметрами была точность отверстий, измеряемая по координатному методу на координатно-измерительной машине. Кроме того, в процессе сверления контролировалась температура сверления с помощью беспроводного устройства WICUTEM, сочетающего метод искусственной термопары и технологию Bluetooth. Проверка гипотезы о влиянии температурного расширения сверла и точность отверстий в зависимости от технологических параметров осуществлялась при помощи метода конечных элементов.

Ключевые слова: пакеты углепластик/титановый сплав; метод искусственной термопары, температура сверления; температурное расширение; метод конечных элементов; устройство WICUTEM

V. Kolesnyk, A. Bozhko, A. Neshta, D. Malymonenko

INVESTIGATION OF CUTTING PARAMETERS INFLUENCE ON THERMAL EXPANSION OF DRILL AND HOLE ACCURACY WHEN DRILLING CFRP/ TI ALLOY STACKS

This paper presents the results of an experimental study which investigates the influence of technological parameters (cutting parameters) on the accuracy of holes and thermal expansion of the drill during drilling. The experiment was planned at three levels by varying the cutting speed, feed, and time delay according to the Taguchi method. During the experiment the controlled parameters were the holes' accuracy, which was measured by the coordinate method on a CNC coordinate measuring machine. In addition, during machining the drilling temperature was controlled via WICUTEM wireless device that combined an artificial thermocouple method with Bluetooth technology. The finite element method tested the hypothesis about the influence of thermal expansion of the drill and the accuracy of the holes depending on the technological parameters. According to the results of the study, it was determined that the value of thermal expansion of the drill does not significantly affect the accuracy of holes when drilling CFRP layer, which was mostly affected by sliding titanium chips on the hole walls. However, thermal expansion is an essential factor in determining the accuracy of the holes in the titanium alloy layer.

Keywords: CFRP/ Ti alloy stack; artificial thermocouple method; drilling temperature; thermal expansion, finite element method, WICUTEM device.

Постановка проблеми. На сьогоднішній день залишається не вирішеною інженерна проблема забезпечення точності отворів при з'єднанні пакетів вуглепластик/ титановий сплав, обумовлена низькою оброблюваністю складових пакету та труднощами з вибором раціональних режимів різання при свердлінні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вуглепластик використовуються при виготовленні зубчатих коліс [1], автомобільних компонентів, та найчастіше при виготовленні аерокосмічних компонентів [2]. В аерокосмічних компонентах вуглепластик зазвичай з'єднують з

титановими та/ або алюмінієвими сплавами, утворюючи так звані пакети [2]. Свердління є найбільш поширеною механічною операцією при виготовленні отворів для з'єднання шарів пакету вуглепластик/ метал в аерокосмічній промисловості [3,4]. Високі вимоги до точності та якості отворів у пакетах обумовлені необхідністю забезпечення належного терміну служби з'єднань [5,6]. Параметри якості отворів у пакетах вуглепластик / метал контролюються на забезпечення розмірної точності отвору [7-10], геометричної точності, зокрема відхилення від округлості та циліндричності [11,12], шорсткості поверхні [13-15], коефіцієнтом розшарування (F_d) [7,16,17], термічного руйнування [18] та величини пошкодження (Q_d) [19] та висоти задирок для титанового сплаву [20-22].

Дослідження останнього десятиліття, зосереджені на забезпеченні параметрів якості отворів у пакетах вуглепластик/ титановий сплав, вивченню впливу різних факторів. Здебільшого дослідження були присвячені вивченню зношування свердла [23-27], впливу покриття ріжучого інструменту на зношування [28-30], режимів різання [31], геометрії свердла [32,33], динамічні характеристики вуглепластику [34], стратегії та техніки свердління, а саме: однопрохідне свердління [35], свердління з ступінчастою геометрією свердла [20], свердління пілотного отвору [36], криогенне свердління [37,38], техніка малого змащення (MQL) [39], спіральне свердління [40].

На основі вищезгаданих досліджень можна зробити висновок, що найбільш значущими факторами, які впливають на якість отвору при свердлінні пакетів вуглепластик/ титановий сплав режими різання. Режими різання, а саме швидкість різання, змінювалась у діапазоні від 10 м/хв до 150 м/хв, а подача – від 0,025 мм/об до 0,1 мм/об [2]. Параметри геометрії свердла впливали на коефіцієнт розшарування [41], а покриття свердла впливало на стійкість та ресурс інструменту. На основі досліджень було визначено раціональною геометрією свердла для однопрохідної технології свердління з подвійним головним кутом в діапазоні 135° - 140° [42], кут підйому гвинтової лінії 22° - 35° [36], задній кут 5° - 10° [12]. Наразі важко зробити певні висновки щодо впливу покриття свердла при свердлінні пакетів, оскільки дослідники дають досить суперечливі висновки щодо ефективності того чи іншого покриття [43]. Технологію спірального свердління для виготовлення отворів можна вважати перспективним методом механічної обробки. Недоліком цього методу є порівняно великий час обробки, що обмежує широке впровадження цієї техніки у виробництво [44]. Технологія малої змащення (MQL) дозволяє зменшити зношення інструменту до 20% [45]. Проте складність подачі MQL в зону різання все ще є основним обмежуючим фактором для його використання у виробничих умовах [39]. Техніка криогенного свердління не доводить свою ефективність у забезпеченні якості отворів у пакетах вуглепластик/ титановий сплав. Менше з тим, вплив низьких температур призводить до зниження втомних характеристик вуглепластик. Таким чином, можна підсумувати, що одноразове свердління пакетів за допомогою твердосплавних інструментів з покриттям і без покриття все ще є основною технологією виготовлення отворів. Щоб краще зрозуміти фізику технології однопрохідного свердління отворів у пакетах є дослідження: крутного моменту [31], осьової сили [46], температури свердління [47], дослідження теплоти тертя [48], акустичної емісії [49], швидкість зношування [50] та утворення стружки [51]. Температуру свердління досліджують методом термопар шляхом встановлення термопар [52] та оптичного волокна [53] в свердло та в заготовку [46]. Розподіл температури також досліджували за допомогою термографічного методу [54,55] скінченно-елементного аналізу для свердла [10] та пакету вуглепластик/ титановий сплав [12]. Визначено, що на сьогодні одним із найнадійніших методів дослідження температури свердління при обробці пакета вуглепластик/ титановий сплав є термопарний метод [52].

Спираючись на результати дослідницьких робіт присвячених вивченню 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 явище впливу температури різання на точність отворів у вищезазначених пакетах.

Постановка завдання. Метою роботи є експериментально перевірити гіпотезу про вплив температурного розширення свердла на точність отворів у пакетах вуглепластик/ титановий сплав, що дозволить поглибити розуміння можливих резервів для технологічного забезпечення точності отворів при обробці пакетів вуглепластик/ титановий сплав.

Результати дослідження. Дослідження впливу температурного розширення різального

інструменту при свердлінні здійснювалось на прикладі пакету вуглепластик/титановий сплав. Вуглепластик, що використовувався у дослідженні, являє собою пакет із 45 односпрямованих шарів вуглецевого волокна IM7 товщиною 0,20 мм, у якості матриці використовувалася епоксидна смола Larit (LR 285). Вуглепластик було виготовлено за технологію вакуумного формування з ручною укладкою шарів вуглецевого волокон за схемою 0°/90°. Загальна товщина вуглепластика становила $9 \pm 0,01$ мм із вмістом волокна 60 %. Загальна товщина пакету вуглепластик/титановий сплав складає 17 мм. У якості металевого шару пакету було використано титановий сплав - (OT-4) Ti-2.5Al-2Mn із механічними властивостями: межа міцності (σ_e) – 735 МПа; модуль пружності (E) – 115 ГПа; густина (ρ) – 4550 кг/м³; подовження (-) – 10 %; коефіцієнт теплопровідності (-) – 9,63 (Вт/(м·К)); твердість (H) – 178 HV. Хімічний склад титанового сплаву було визначено за допомогою методу енергодисперсійної рентгеноскопії на смачнючому електронному мікроскопі JSM-7600F. Фактичний склад титанового сплаву: Ti - 96,42 %, Al - 1,92 %, C - 0,21 %, O - 0,19 %, Si - 0,17 %, Mn - 0,89 %, Fe - 0,20 %.

Виходячи з плану експерименту (табл.2), для експериментального дослідження було використано дев'ять свердл WC9 з покриттям TiN - TiAlN (5510-R-RT100U Guhring) Ø10 мм з внутрішніми каналами для подачі змащуючо - охолоджуючої рідини (ЗОР). Контроль параметрів свердла здійснювався на універсальній автоматичній вимірювальній машині Zoller Genius 3s. У результаті вимірювання було визначено основні геометричні параметри свердел (табл. 1).

Експеримент було сплановано на основі ортогонального масиву Тагучі L₉, що включав три фактори: швидкість різання (v , м/хв), подачу (s , мм/об) та час відтермінування при свердлінні сусідніх отворів (T_d , с), що змінюється на трьох рівнях (табл. 2).

Табл. 1.

Геометрія свердла 5510-R-RT100U Guhring [10]

Геометричні параметри	Умовний номер свердла згідно нумерації дослідів								
	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
Подвійний головний кут у плані, (θ°)	140.52	140.61	140.35	140.30	140.84	140.60	140.60	140.60	140.60
Передній кут, (γ_r°)	7.54	7.42	8.18	20.14	7.58	7.54	8.26	8.52	7.50
Кут нахилу поперечної різальної кромки, (ψ°)	44.21	45.33	55.17	24.62	55.62	54.40	52.27	53.59	58.33
Кут підйому гвинтової лінії, (ω°)	30.00	30.09	29.92	29.93	29.91	29.99	29.81	29.97	30.06

Табл. 2.

План експерименту за методикою Тагучі L₉ [56]

Назва фактору	Номер дослідів								
	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

Свердління пакету вуглепластик/титановий сплав здійснювалось з постійною швидкістю різання для обох шарів пакету. Для вивчення впливу накопичення теплоти в свердлі, та впливу тепла на можливе розширення інструменту було запропоновано час відтермінування між свердліннями сусідніх отворів. На першому рівні свердління здійснювалось за умов так званої

"холодної обробки" (CDM), коли свердло охолоджували до кімнатної температури перед свердлінням наступного отвору. На другому рівні свердління виконувалось із затримкою в 10 с між сусідніми отворами. На третьому рівні свердління здійснювалося без затримки свердла, що враховуючи час на вихід свердла з отвору та підводу до наступного отвору складало 5 с.

Експериментальна установка була реалізована на базі 5-осьового фрезерного оброблювального центра DMU 85V CNC (рис. 1).

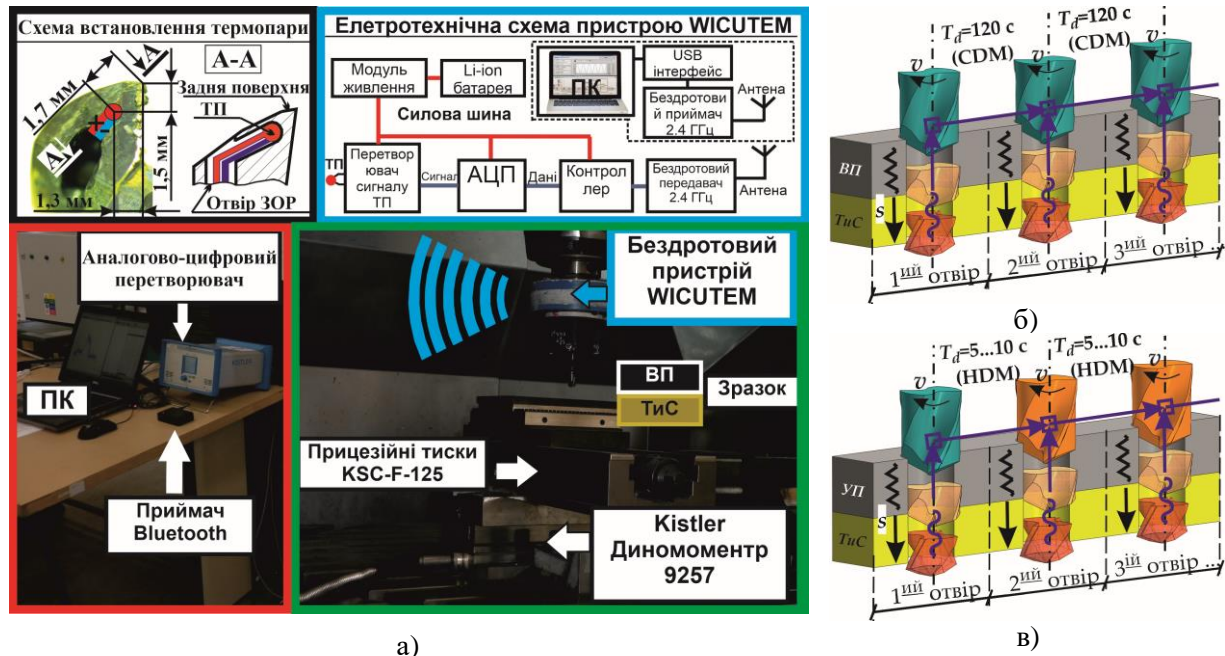


Рис.1. Принципова схема свердління пакетів вуглепластик/ титановий сплав: а) експериментальна установка на базі п'яти осьового верстата DMU-85V; б) технологічна схема свердління отворів з відтермінуванням (CDM); в) технологічна схема свердління отворів з відтермінуванням (HDM) [56]

Заготовка була зафіксована в прецизійних машинних лещатах Schunk Konte'c KSC-F-125 з похибкою базування 0,02 мм, що були встановлені на динамометр Kistler 9257 на столі верстата. Безпосередньо у ході досліду контрольованим параметром був температура свердління, що визначалася у тілі свердла на відстані 1,3 мм від головної різальної кромки (рис.1). Вимірювання осьової сили необхідно для визначення моменту початку свердління з метою співвідношення положення свердла у отворі та температури свердла у момент часу, що досягалося шляхом синхронізації результатів вимірювання за машинним часом персонального комп'ютера. Температура свердла вимірювалася з використанням бездротового пристрою для вимірювання температури, що був закріплений на цанговій оправці HSK40. Функціонування пристрою базується на поєднанні вимірювання ефекту Зеебека з компенсацією холодного з'єднання та бездротовою передачею сигналу від термопарі з високою частотою (2,4 ГГц) через канал Bluetooth. Живлення пристрою здійснювалося за допомогою літій-іонних акумуляторів. Вимірювальний блок складався з термопарі хромель-алюмель (К-типу), підключеної до підсилювача сигналу, який передає сигнал на модуль Bluetooth з частотою 200 Гц. Після цього бездротовий приймач сигналу Bluetooth, приєднаний до ПК через USB COM порт фіксував сигнал температури свердління. Діапазон вимірювань температури термопарі типу К становив від 40 °C до 1036 °C з точністю $\pm 1,1$ °C. Розміщення термопарі якнайближче до задньої поверхні свердла здійснювалося через канал для підводу ЗОР. З метою наближення термопарі 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.1 а).

Фактичний діаметр отвору вимірювали на координатно-вимірювальній машині ZEISS PRISMO ULTRA. Програма числового керування вимірювання була виготовлена за допомогою програмного продукту ZEISS CALYPSO. Діаметр щупа вимірювальної головки машини становив

3 мм. Вимірювання проводили при кімнатній температурі (20 ± 2 °C) з точністю до 1 мкм за схемою (рис. 2).

У ході дослідження згідно плану експерименту було проведено дев'ять дослідів у результаті яких було просвердлено по п'ять отворів для кожної серії випробувань. 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. Знизу під графіками на рисунку зображені свердла з розташуванням на них термопари (ТП), що позначені червоною крапкою.

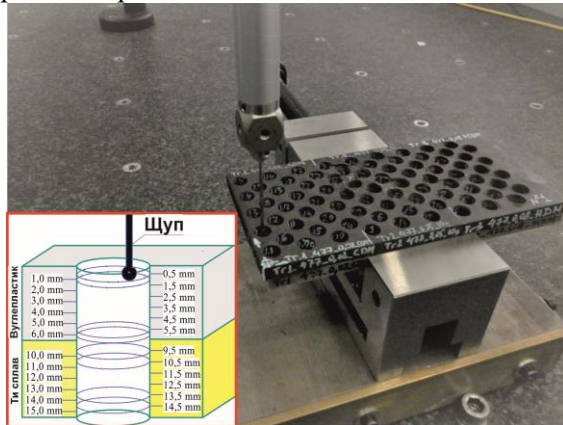


Рис. 2. Схема вимірювання точності отвору

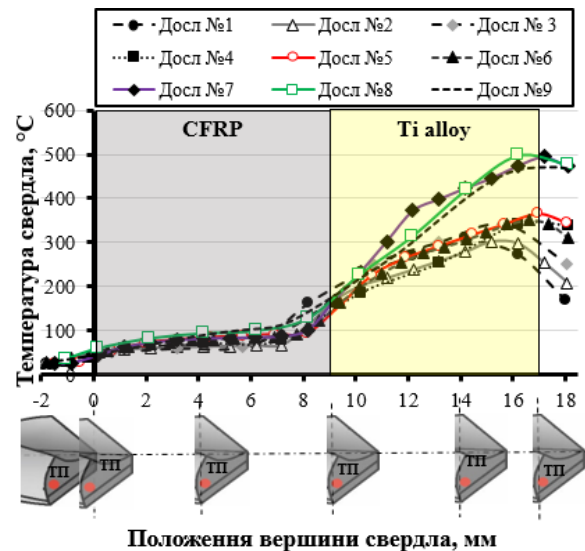


Рис. 3. Залежність температури свердла від режимів різання при обробці отвору №1

Аналіз графіку температур свердління при обробці отвору № 1 для всіх дослідів виявив, що температура свердла при обробці вуглепластику коливалася від 48,6 °C до 104,9 °C, а при обробці шару титанового сплаву - від 189,8 °C до 461,4 °C. Максимальні значення температури у вуглепластику було виміряно при $v = 65$ м/хв і $s = 0,08$ мм/об, тоді як у титановому сплаві $v = 65$ м/хв і $s = 0,05$ мм/об. Треба зауважити, що під час свердління отвору № 1, час відтермінування свердла ще не вплинув на температуру свердління, а отже, можна зробити висновок, що на температуру в основному впливала швидкість різання.

Менша швидкість різання створювала більш сприятливі умови для переходу тепла, що утворюється в зоні різання, в матеріалі заготовки та стружку, ніж у свердло (рис.3). При заглибленні свердла в пакет вуглепластик/ титановий сплав на глибину 0,5 мм мінімальний фактичний діаметр отвору складав 10,118мм (дослід № 8), на глибині 6 мм - 10,1 (дослід № 8), на глибині 10 мм параметри точності отвору - 10,03 мм і на 15 мм - 10,04 мм (дослід № 2). Розміри отворів у шарі вуглепластику коливаються від 10,118 до 11,2 мм (рис. 4 (а)). Максимальне поле розкиду точності між максимальними та мінімальними розмірами вимірювали при свердлінні з режимами різання $v = 65$ м/хв і $s = 0,08$ мм/об (дослід № 9). Під час аналізу кривих діаметрів отворів було помічено, що максимальні відхилення вимірюються у отворах № 1, № 3, № 4, № 9. Це можна пояснити ковзанням жорсткої стружки що утворилася при свердлінні титанового сплаву по стінках отвору в шарі вуглепластику. Така стружка утворювалась у дослідях № 3, № 9 з подачею 0,08 мм/об. Фактичний розмір отвору в шарі титанового сплаву варіювався від 10,028 мм до 10,081 мм. Максимальне поле допуску - 0,021 мм між максимальними ($\varnothing 10,057$ мм) та мінімальними ($\varnothing 10,036$ мм) розмірами вимірювали при свердлінні з режимами різання $v = 65$ м/хв і $s = 0,05$ мм/об (дослід № 8) (Рис. 4 (б)).

На основі аналізу температури свердла під час свердління отвору № 5 (рис. 5 (а)) для дослідів № 1, № 6 та № 8, при свердлінні вуглепластику температура свердла змінювалася в діапазоні (80,9°C - 126,23°C), якщо порівняти її з результатами для отвору №1 (70,30 °C - 99,60 °C) можна зробити висновок, що на підвищення температури впливає зношення інструменту. Температура свердла при свердлінні в титанового сплаву варіювалася в діапазоні від (320,6 °C - 461 °C) для отвору №1, а для отвору (356,6 °C - 477,27 °C). Однак для дослідів №2 - №5 і №7, №9 вплив зношення інструменту на температуру свердла не був настільки очевидним, оскільки він був

прихований під впливом накопичення тепла через умови витримки свердла 120 с перед свердлінням наступного отвору.

Якщо не брати до уваги зношення інструменту то найкращий режим для обробки пакетів з титанового сплаву та вуглепластику є режим для досліду №1 і має такі параметри $v=15$ (м / хв), подача, $s=0,02$ (мм / об), час витримки свердла $T_d=120$ (с).

На основі аналізу діаметрів отвору № 5 (рис. 5 (б)) спостерігається вплив часу відтермінування свердління на збільшення відхилення діаметра отвору. У вуглепластику діаметр отвору, отриманий при 5 с часу відтермінування, коливався від 46 мкм до 150 мкм, а при 120 с та 10 с - в діапазоні 39 - 754 мкм залежно від швидкості різання.

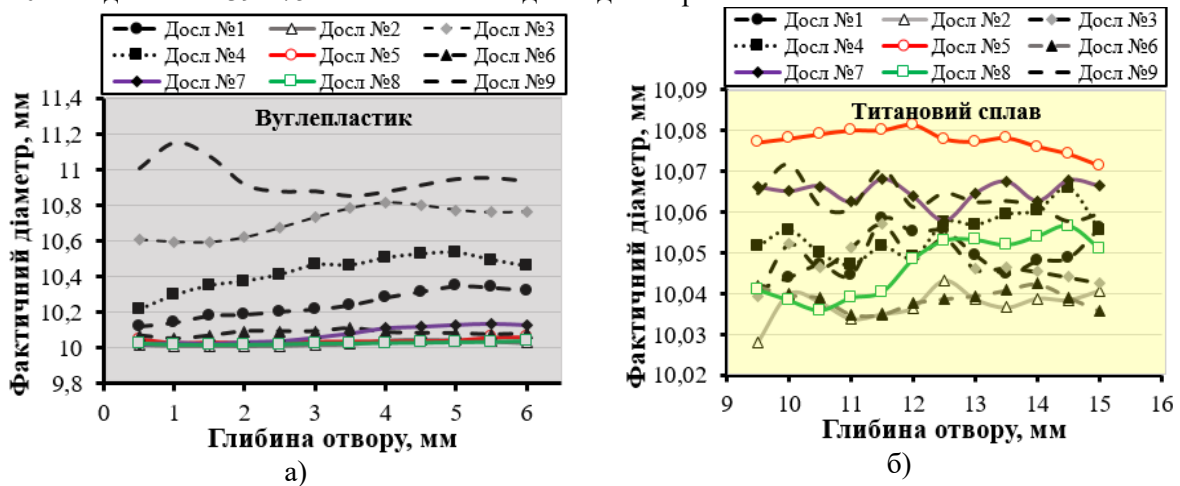


Рис.4. Вплив режимів різання на точність отворів

У шарі титанового сплаву ефект часу відтермінування (як для 5 с, так і для 120 с) був не таким значним, і відхилення діаметра отвору коливалося від 3 мкм до 27 мкм. Тим не менш, у досліді № 7, де температура свердління досягала понад 600 °С, відхилення було 43 мкм, що в 4 рази більше порівняно з 10 мкм у отворі № 1 для цього ж досліду.

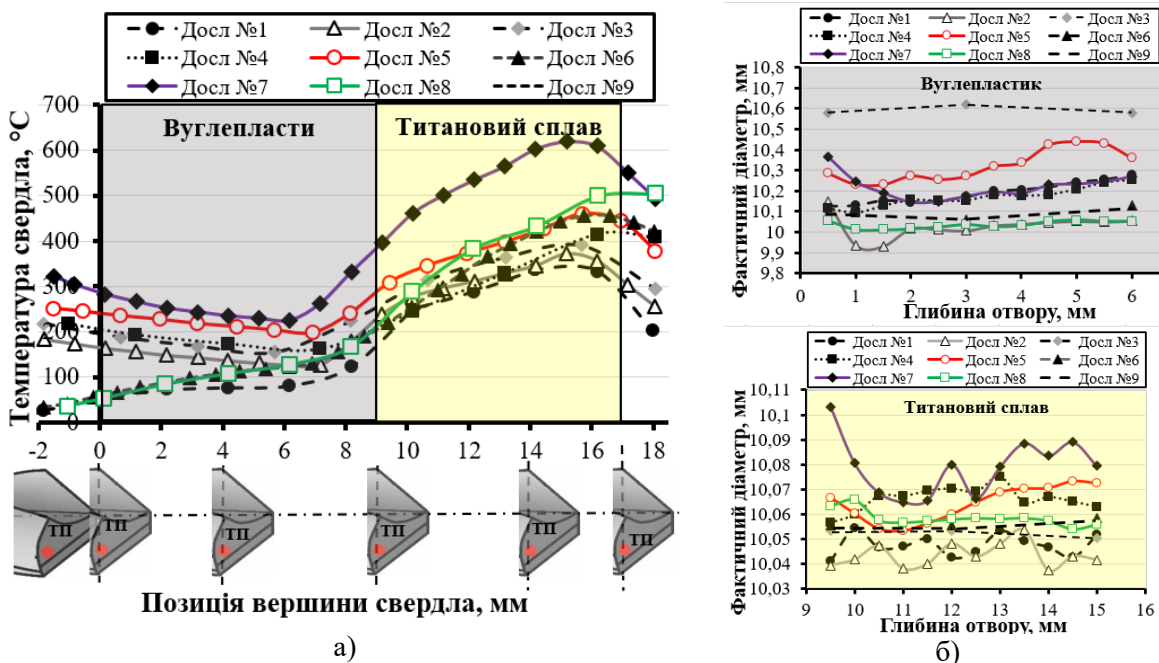


Рис.5. Залежність температури свердла (а) та точності отворів (б) від режимів різання при обробці отвору № 5

З метою перевірки припущення про наявність температурного розширення інструменту було проведено моделювання цього процесу методом скінчених елементів у програмному продукті Ansys Workbench 17.2. З цією метою у програмному середовищі було створено проект що складався з трьох компонентів Steady-State Thermal, Transient Thermal, що використовувався для

розрахунку температурного градієнту свердла та в подальшому результати імпортувалися в компонент Transient Structural для розрахунку лінійного розширення інструменту (рис.6).

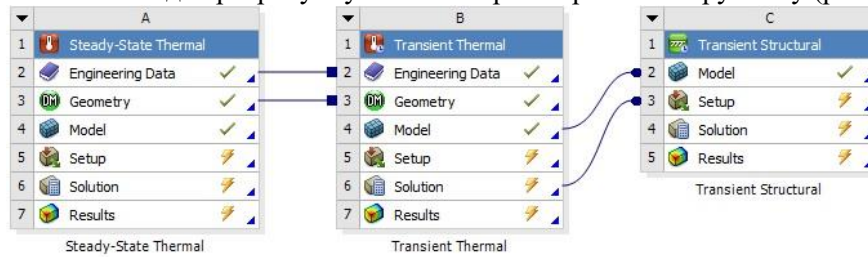


Рис.6. Проект розрахунку методом скінчених елементів

При створенні проекту були задані граничні умови скінчено – елементної моделі. Зокрема, у якості навантаження було задано температуру на головній різальній кромці (рис.7 (а)), умови закріплення (рис. 7 (б)), та визначено розмір скінчено - елементної сітки (рис.7 (в)).

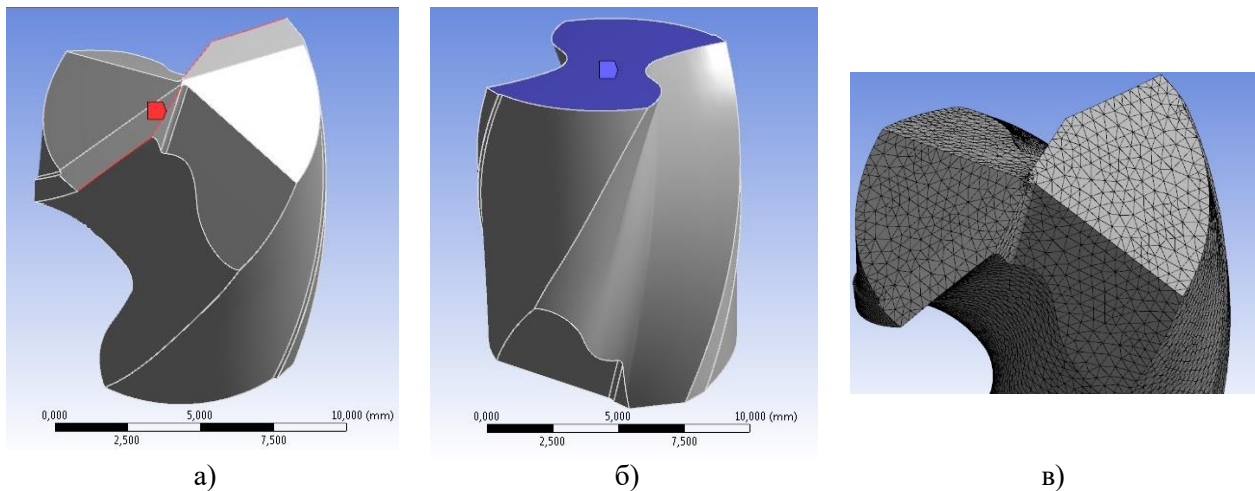


Рис. 7. Граничні умови скінчено - елементної моделі

Фізико-механічні та термічні властивості твердого сплаву для моделювання було задано згідно таблиці 3.

Табл. 3.

Фізико-механічні та термofізичні властивості ВК9 [57]

Густина, кг·м ³	Нульове температурне розширення, °С	Модуль Юнга, ГПа	Коеф. Пуассона, ГПа	Модуль об'ємної пружності, ГПа	Модуль зсуву, ГПа	Міцність на стиснення, МПа	Межа міцності при розтягненні, МПа	Питома теплоємність, Дж·кг ⁻¹ ·°С ⁻¹
15700	22	615	0.24	643	274	4780	350	480

У якості вхідних даних про температурне навантаження свердла при скінчено -елементному моделюванні було використано експериментальні дані вимірювання температури свердла. Зокрема дані про значення температури свердла в залежності від режимів різання на проміжку часу механічної обробки для отвору №1 для всіх дев'яти серій дослідів. Оскільки вимірювання здійснювалося на відстані від різальної кромки, а при задачі граничних умов температурне навантаження, що моделювало тепло у зоні різання прикладалося до головної різальної кромки було виконано перерахунок отриманих даних згідно з математичною моделлю (1) [58].

$$T_{p.k.} = \frac{(T_0 - 6,21 \cdot 10^{-2} \cdot (71,5t^{0,284} + 20))}{1,87 \cdot 10^{-3} \cdot (71,5t^{0,284} + 20)}, \quad (1)$$

де T_0 - температура, що була виміряна у точці закладання термопар, °С;

t – час з моменту початку процесу різання, с

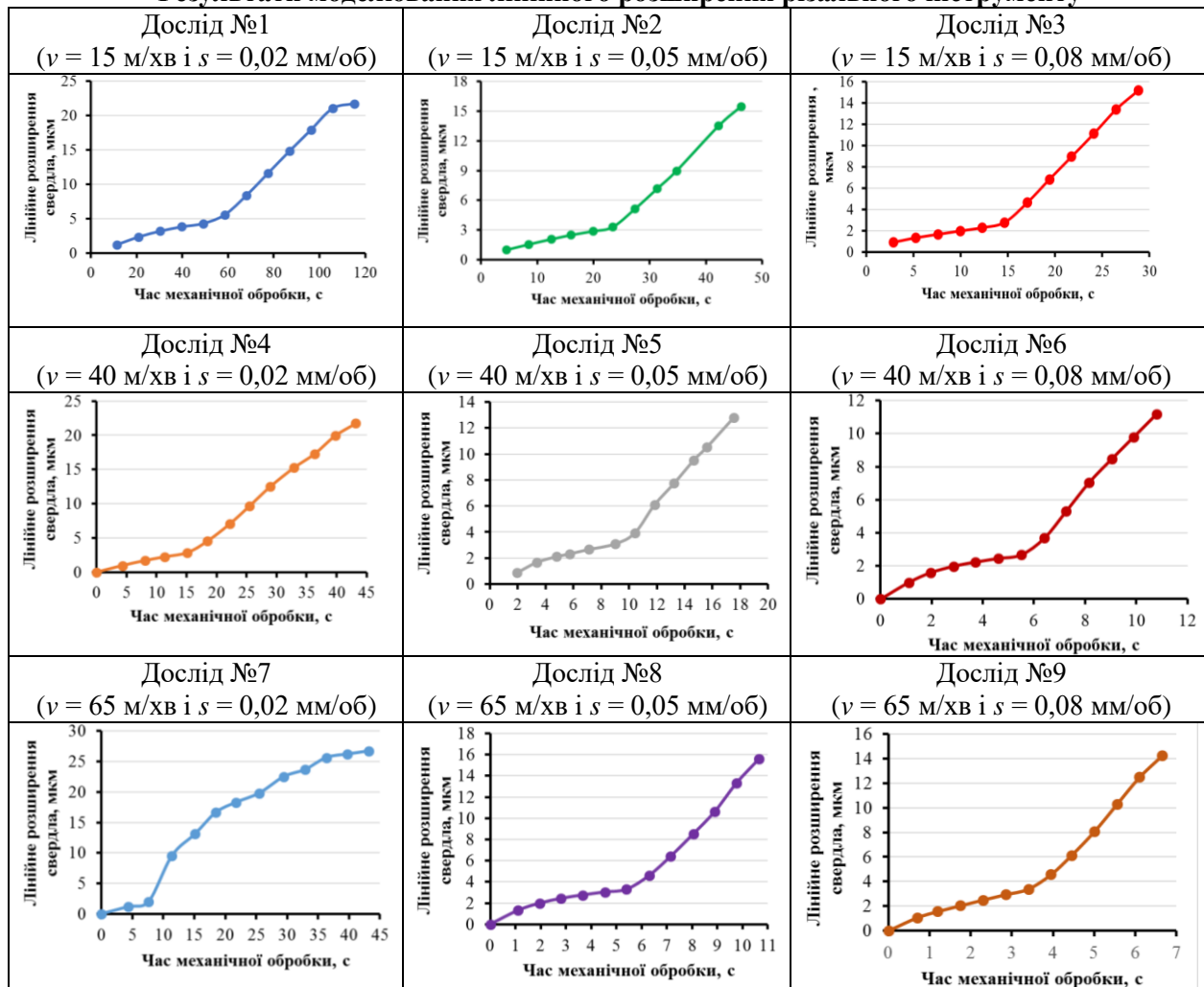
В результаті моделювання було отримані епюри лінійного розширення свердла в умовах свердління отвору №1 для дев'яти дослідів. Візуалізація отриманих результатів представлено у

вигляді графіків залежності (табл. 4) лінійного розширення різального інструменту та часу механічної обробки, що безпосередньо залежить в режимів різання. Таким чином було змодельоване температурне розширення інструменту з прив'язкою до моменту часу, що дозволило в подальшому синхронізувати отримані дані з результатами вимірювання показників точності отворів у дослідних зразках.

Таким чином було визначено, що в залежності від режиму різання і як наслідок часу механічної обробки (основного часу) лінійне розширення інструменту в максимальних значеннях варіювалося в діапазоні від 11 до 27 мкм. З графіків чітко прослідковується зміна кута нахилу кривою параметру відносно осі абсцис при переході свердла із шару вуглепластику у шар титанового сплаву. На основі попереднього аналізу можна зробити висновок, що на зміну значення лінійного розширення інструменту у більшій мірі впливає подача, оскільки порівняння результатів вимірювання по вертикалі (табл.4), вказує на несуттєві відмінності в показниках дослідів №1, №4, №7 - ~21 мкм, дослідів №2, №5, №8- ~14 мкм, та дослідів №3, №6, №9 - ~13 мкм.

Табл. 4.

Результати моделювання лінійного розширення різального інструменту



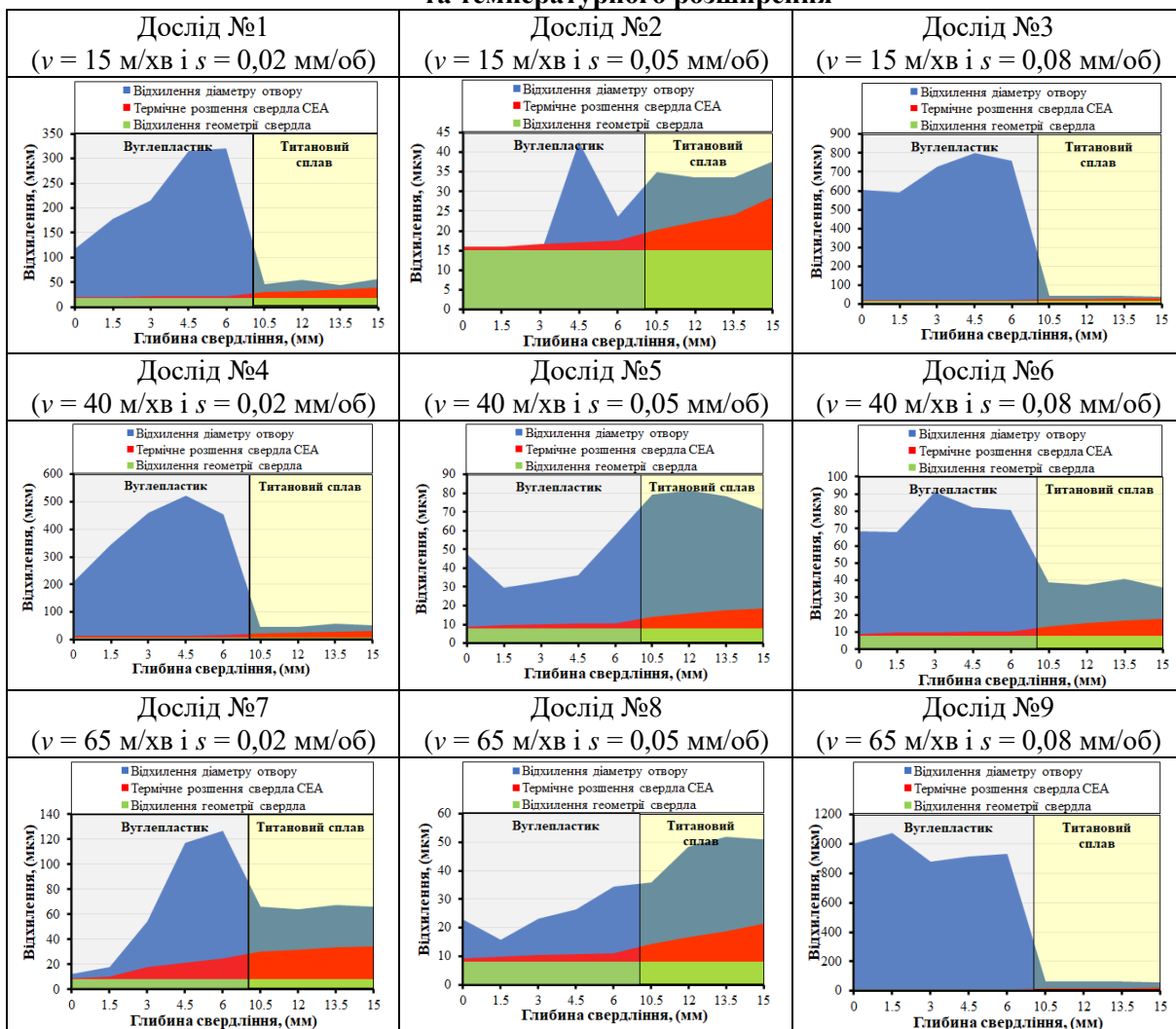
Для зручності подальшого аналізу результатів експериментального дослідження та моделювання методом скінчених елементів отримані дані представлено у вигляді графічних залежностей (табл. 5).

На основі узагальнюючого аналізу можна зробити висновок що температурне розширення свердла не є значущим фактором що впливає на зниження точності розміру та форми отвору у шарі вуглепластику, оскільки як описувалось у п.3.1 привабливим стохастичним аспектом що впливає на точність отворів є довга суцільна стружка, що утворюється при свердлінні титанового шару пакету. Натомість, при свердлінні шару титанового сплаву, де розсіювання

відхилень номінального розміру коливається в межах від 28 мкм до 81 мкм, відхилення від круглості 4,8 мкм – 122 мкм, визначені значення температурного розширення є вагомим фактором. На основі аналізу залежності між відхиленням номінального діаметру отвору, геометрії інструмента та температурного розширення свердла під впливом швидкості різання, подачі та часу відтермінування свердління можна підсумувати, що температурне розширення свердла суттєво не впливає на точність отворів у шарі вуглепластику, оскільки його вплив навіюється ковзанням титанової стружки у процесі свердління. Поєднання низької швидкості різання та низького значення подачі призводить до збільшення часу контакту титанової стружки, що обумовлює зростання відхилення номінального розміру. Менше з тим, підвищення подачі, призводить до збільшення товщини стружки, підвищення її жорсткості і як наслідок збільшення механічного впливу на стінки отворів у шарі вуглепластику.

Табл. 5.

Взаємозв'язок відхилень геометричної точності отворів та геометричних параметрів свердла та температурного розширення



Висновок

1. На основі огляду наукової літератури сформульовано гіпотезу про вплив температурного розширення свердла на точність отворів при свердлінні пакетів вуглепластик/титановий сплав
2. Запропонована в роботі методика дослідження дозволила виконати співставлення результатів вимірювання температури свердла, здійсненого за допомогою бездротового вимірювального пристрою WICUTEM за методом штучної термопари, та розмірної точності отворів. Синхронізація результатів вимірювання температури свердла і його положення у оброблюваному отворі здійснювалася за параметром машинного часу персонального комп'ютера шляхом розрахунку.

3. Було визначено, що на конусність отворів у вуглепластику впливає поєднання ефекту ковзання титанової стружки та температурного розширення інструменту. У той же час на

конусність отвору у титановому сплаві формується під впливом поєднання радіального биття свердла та термічного розширення інструменту. На підставі вимірювання діаметра отвору в поєднанні з результатами вимірювання температури свердла було виявлено, що підвищення температури до $\approx 600^\circ\text{C}$ призводить до збільшення відхилення діаметра отвору в титановому сплаві до 56 мкм, в той час як в інших дослідях, де температура свердла знаходилася в діапазоні (350°C - 500°C), відхилення діаметра отвору коливалося від 8 мкм до 22 мкм.

4. В результаті моделювання методом скінчених елементів визначено величину лінійного розширення свердла з урахуванням впливу температури на головній різальній кромці та основного часу обробки для дев'яти дослідів. Зростання швидкості різання до 65 м/хв призводить до збільшення впливу температурного розширення свердла на точність отворів у титановому сплаві.

5. Виконано співставлення результатів вимірювання точності розмірів з значеннями температурного розширення інструменту. Визначено, що при свердлінні шару вуглепластику значення температурного розширення свердла значним чином не впливає на точність отворів, оскільки зниження точності отворів обумовлено ковзанням титанової стружки по стінкам отвору. Однак температурне розширення є вагомим фактором що обумовлює точність отворів у шарі титанового сплаву.

Список використаних джерел

1. Nekrasov, S.; Zhyhylii, D.; Dovhopolov, A.; Karatas, M.A. Research on the manufacture and strength of the innovative joint of FRP machine parts. *Journal of Manufacturing Processes* **2021**, *72*, 338-349, doi:10.1016/j.jmapro.2021.10.025.
2. Xu, J.Y.; Mkaddem, A.; El Mansori, M. Recent advances in drilling hybrid FRP/Ti composite: A state-of-the-art review. *Composite Structures* **2016**, *135*, 316-338, doi:10.1016/j.compstruct.2015.09.028.
3. Giasin, K.; Hawxwell, J.; Sinke, J.; Dhakal, H.; Koklu, U.; Brousseau, E. 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*, 2817-2832, doi:10.1007/s00170-020-05211-2.
4. Xu, C.Y.; Wang, Y.W.; Xu, J.Z.; Liu, X.L. 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*, 1657-1669, doi:10.1007/s00170-019-04698-8.
5. Denysenko, Y.; Ivanov, V.; Luscinski, S.; Zaloga, V. AN INTEGRATED APPROACH FOR IMPROVING TOOL PROVISIONING EFFICIENCY. *Management and Production Engineering Review* **2020**, *11*, 4-12, doi:10.24425/mper.2020.136115.
6. Wojciechowski, S. Estimation of Minimum Uncut Chip Thickness during Precision and Micro-Machining Processes of Various Materials—A Critical Review. *Materials* **2022**, *15*, doi:10.3390/ma15010059.
7. Jia, Z.Y.; Zhang, C.; Wang, F.J.; Fu, R.; Chen, C. Multi-margin drill structure for improving hole quality and dimensional consistency in drilling Ti/CFRP stacks. *Journal of Materials Processing Technology* **2020**, *276*, 9, doi:10.1016/j.jmatprotec.2019.116405.
8. Wang, B.; Zhao, H.; Zhang, F.; Wang, M.; Zheng, Y. Comparison of the geometric accuracy of holes made in CFRP/Ti laminate by drilling and helical milling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2021**, *112*, 3343-3350, doi:10.1007/s00170-021-06594-6.
9. An, Q.; Dang, J.; Li, J.; Wang, C.; Chen, M. Investigation on the cutting responses of CFRP/Ti stacks: With special emphasis on the effects of drilling sequences. *Composite Structures* **2020**, *253*, doi:10.1016/j.compstruct.2020.112794.
10. 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.
11. Zhou, L.; Ke, Y.L.; Dong, H.Y.; Chen, Z.P.; Gao, K.Y. Hole diameter variation and roundness in dry orbital drilling of CFRP/Ti stacks. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2016**, *87*, 811-824, doi:10.1007/s00170-016-8528-1.
12. Qiu, X.Y.; Yu, Z.; Li, C.P.; Niu, Q.L.; Li, S.J.; Li, P.N.; Ko, T.J. Influence of main cutting edge structure on hole defects in CFRP/titanium alloy stacks drilling. *Journal of Manufacturing Processes* **2021**, *69*, 503-513, doi:10.1016/j.jmapro.2021.07.061.

13. Wang, Q.; Jia, X.L. Optimization of cutting parameters for improving exit delamination, surface roughness, and production rate in drilling of CFRP composites. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2021**, *117*, 3487-3502, doi:10.1007/s00170-021-07918-2.
14. Yasar, N.; Korkmaz, M.E.; Gupta, M.K.; Boy, M.; Gunay, M. A novel method for improving drilling performance of CFRP/Ti6Al4V stacked materials. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2021**, *117*, 653-673, doi:10.1007/s00170-021-07758-0.
15. Nie, P.; Ma, Y.; Liu, S. Research on CFRP inner wall roughness during vibration drilling of CFRP/Ti based on acoustic emission. *Journal of Physics: Conference Series* **2021**, *1952*, doi:10.1088/1742-6596/1952/3/032060.
16. Rajkumar, G.M.; Bhardwaj, D.; Kannan, C.; Oyyaravelu, R.; Balan, A.S.S. Effect of chilled air on delamination, induced vibration, burr formation and surface roughness in CFRP drilling: a comparative study. *Materials Research Express* **2019**, *6*, doi:10.1088/2053-1591/aaf47d.
17. Liu, S.; Wang, N.; Zhang, K.; Luo, B. A subjective-objective evaluation method of hole surface quality in drilling CFRP-Ti stacks. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* **2020**, doi:10.1177/0954405420971076.
18. Li, J.; Zou, P.; Qiao, C.; Dong, L. Temperature Field Distribution Model in Drilling of CFRP/Ti Stacks Structure. In Proceedings of the Journal of Physics: Conference Series, 2020.
19. 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.
20. Alonso, U.; Calamaz, M.; Girot, F.; Iriondo, E. Influence of flute number and stepped bit geometry when drilling CFRP/Ti6Al4V stacks. *Journal of Manufacturing Processes* **2019**, *39*, 356-370, doi:10.1016/j.jmapro.2019.02.006.
21. Kuo, C.L.; Soo, S.L.; Aspinwall, D.K.; Carr, C.; Bradley, S.; M'Saoubi, R.; Leahy, W. Development of single step drilling technology for multilayer metallic-composite stacks using uncoated and PVD coated carbide tools. *Journal of Manufacturing Processes* **2018**, *31*, 286-300, doi:10.1016/j.jmapro.2017.11.026.
22. Poor, D.I.; Geier, N.; Pereszlai, C.; Xu, J.Y. A critical review of the drilling of CFRP composites: Burr formation, characterisation and challenges. *Composites Part B-Engineering* **2021**, *223*, 17, doi:10.1016/j.compositesb.2021.109155.
23. Han, C.W.; Kim, K.B.; Lee, S.W.; Jun, M.B.G.; Jeong, Y.H. 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*, 1527-1536, doi:10.1007/s12541-021-00558-2.
24. Ivchenko, O.; Zhyhylii, D.; Zaloha, O.; Zaloga, V.; Dehtiarenko, O. Resolution of the Friction Coefficient of Adhesion Under Cutting. *Advanced Manufacturing Processes (Interpartner-2019)* **2020**, 98-107, doi:10.1007/978-3-030-40724-7_10.
25. Wang, Q.; Wang, F.; Zhang, C.; Chen, C. Combined effects of various materials on tool wear in drilling of Ti/CFRP stacks. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* **2020**, *234*, 2750-2759, doi:10.1177/0954406219868246.
26. Sathish Rao, U.; Raj Rodrigues, L.L. An application of dissimilar ann algorithms to improve the simulation performance of flank wear extrapolation in GFRP composite drilling. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development* **2018**, *8*, 325-336, doi:10.24247/ijmperdoct201837.
27. Hou, G.Y.; Qiu, J.P.; Zhang, K.F.; Cao, S.P.; Cheng, H.; Luo, B.; Cheng, Y. 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*, 937-951, doi:10.1007/s00170-019-04554-9.
28. Kulesh, E.A.; Piliptsov, D.G.; Rogachev, A.V.; Hong, J.X.; Fedosenko, N.N.; Kolesnyk, V. Boron-Carbon Coatings: Structure, Morphology and Mechanical Properties. *Journal of Engineering Sciences* **2020**, *7*, C1-C9, doi:10.21272/jes.2020.7(2).c1.
29. Kim, D.; Swan, S.R.; He, B.; Khominich, V.; Bell, E.; Lee, S.W.; Kim, T.G. A study on the machinability of advanced arc PVD AlCrN-coated tungsten carbide tools in drilling of CFRP/titanium alloy stacks. *Carbon Letters* **2021**, *31*, 497-507, doi:10.1007/s42823-020-00180-8.
30. Liu, L.; Jiang, X.H.; Ermakov, S.F.; Nikolaev, V.I.; Yarmolenko, M.A.; Piliptsov, D.G.; Shershnev, E.B. Effect of Lubricants with Different Nature and Properties on Friction in a DLC-

UHMWP Endoprosthesis Pair. *Journal of Friction and Wear* **2021**, *42*, 146-151, doi:10.3103/s1068366621030107.

31. Kayihan, M.; Karaguzel, U.; Bakkal, M. Experimental analysis on drilling of Al/Ti/CFRP hybrid composites. *Materials and Manufacturing Processes* **2020**, doi:10.1080/10426914.2020.1819545.

32. Bañon, F.; Sambruno, A.; Batista, M.; Fernandez-Vidal, S.R.; Salguero, J. Study of the one-shot drilling of CFRP/Ti6Al4V stacks with a double tip angle cutting-tool geometry. In Proceedings of the AIP Conference Proceedings, 2019.

33. Kuntoğlu, M.; Aslan, A.; Pimenov, D.Y.; Giasin, K.; Mikolajczyk, T.; Sharma, S. Modeling of cutting parameters and tool geometry for multi-criteria optimization of surface roughness and vibration via response surface methodology in turning of AISI 5140 steel. *Materials* **2020**, *13*, doi:10.3390/MA13194242.

34. Kim, C.J. Temperature-Dependent Dynamic Characteristics of Carbon-Fiber-Reinforced Plastic for Different Spectral Loading Patterns. *Materials* **2020**, *13*, doi:10.3390/ma13225238.

35. Luo, B.; Zhang, K.; Liu, S.; Cheng, H.; Wang, R. Investigation on the interface damage in drilling low-stiffness CFRP/Ti stacks. *Chinese Journal of Aeronautics* **2019**, *32*, 2211-2221, doi:10.1016/j.cja.2019.04.017.

36. Dahnel, A.N.; Ascroft, H.; Barnes, S. An investigation of hole quality during drilling of carbon fibre reinforced plastic and titanium (Ti6Al4V) using tungsten carbide drills. In Proceedings of the Materials Today: Proceedings, 2019; pp. 161-167.

37. Tang, L.Y.; Li, P.N.; Yu, Z.; Li, C.P.; Ko, T.J.; Niu, Q.L.; Li, S.J.; Qiu, X.Y. New drilling method for damage reduction of CFRP/Ti stacks drilling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2021**, *115*, 595-602, doi:10.1007/s00170-021-07216-x.

38. Iqbal, A.; Zhao, G.; Zaini, J.; Gupta, M.K.; Jamil, M.; He, N.; Nauman, M.M.; Mikolajczyk, T.; Pimenov, D.Y. Between-the-holes cryogenic cooling of the tool in hole-making of Ti-6Al-4V and CFRP. *Materials* **2021**, *14*, 1-19, doi:10.3390/ma14040795.

39. 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.

40. Sun, L.; Gao, H.; Wang, B.; Bao, Y.; Wang, M.; Ma, S. Mechanism of reduction of damage during helical milling of titanium/CFRP/aluminium stacks. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2020**, *107*, 4741-4753, doi:10.1007/s00170-020-05177-1.

41. Fu, Q.; Wu, S.J.; Li, C.H.; Xu, J.Y.; Wang, D.Z. Delamination and chip breaking mechanism of orthogonal cutting CFRP/Ti6Al4V composite. *Journal of Manufacturing Processes* **2022**, *73*, 183-196, doi:10.1016/j.jmapro.2021.11.015.

42. An, Q.; Zhong, B.; Wang, X.; Zhang, H.; Sun, X.; Chen, M. 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*, 409-420, doi:10.1016/j.jmapro.2021.01.036.

43. 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.

44. Voss, R.; Henerichs, M.; Kuster, F. Comparison of conventional drilling and orbital drilling in machining carbon fibre reinforced plastics (CFRP). *Cirp Annals-Manufacturing Technology* **2016**, *65*, 137-140, doi:10.1016/j.cirp.2016.04.001.

45. Xu, J.Y.; Ji, M.; Chen, M.; El Mansori, M. Experimental investigation on drilling machinability and hole quality of CFRP/Ti6Al4V stacks under different cooling conditions. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2020**, *109*, 1527-1539, doi:10.1007/s00170-020-05742-8.

46. Karpat, Y.; Karaguzel, U.; Bahtiyar, O. 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*, 15, doi:10.1016/j.ijmachtools.2020.103565.

47. Shao, Z.; Jiang, X.; Geng, D.; Liu, Y.; Zhou, Z.; Li, S.; Zhang, D.; Zheng, W. The interface temperature and its influence on surface integrity in ultrasonic-assisted drilling of CFRP/Ti stacks. *Composite Structures* **2021**, *266*, doi:10.1016/j.compstruct.2021.113803.

48. Xu, J.Y.; Li, C.; El Mansori, M.; Liu, G.Y.; Chen, M. Study on the Frictional Heat at Tool-Work Interface when Drilling CFRP Composites. *46th Sme North American Manufacturing Research Conference, Namrc 46* **2018**, 26, 415-423, doi:10.1016/j.promfg.2018.07.049.
49. Leng, S.; Wang, Z.; Min, T.; Dai, Z.Q.; Chen, G. Detection of Tool Wear in Drilling CFRP/TC4 Stacks by Acoustic Emission. *Journal of Vibration Engineering & Technologies* **2020**, 8, 463-470, doi:10.1007/s42417-019-00190-5.
50. Wang, B.; Yin, W.D.A.; Wang, M.H.; Zheng, Y.H.; Li, X.P.; Ma, Z.B. Edge chipping mechanism and failure time prediction on carbide cemented tool during drilling of CFRP/Ti stack. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2017**, 91, 3015-3024, doi:10.1007/s00170-017-0017-7.
51. Emel'yanov, S.G.; Yatsun, E.I.; Remnev, A.I.; Shvets, S.V. Chip curling in metal cutting. *Russian Engineering* **2011**, 31, 679-683, doi:10.3103/S1068798X11060086.
52. Xu, J.Y.; Li, C.; Chen, M.; El Mansori, M.; Davim, J.P. On the analysis of temperatures, surface morphologies and tool wear in drilling CFRP/Ti6Al4V stacks under different cutting sequence strategies. *Composite Structures* **2020**, 234, doi:10.1016/j.compstruct.2019.111708.
53. Zitoune, R.; Cadorin, N.; Collombet, F.; Sima, M. 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, 1849-1858, doi:10.1016/j.wear.2016.12.015.
54. 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.
55. Wang, H.X.; Zhang, X.H.; Duan, Y.G. 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, 2943-2951, doi:10.1007/s00170-018-1810-7.
56. 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.
57. Kurlov, A.S.; Gusev, A.I. Tungsten Carbides: Structure, Properties and Application in Hardmetals. *Tungsten Carbides: Structure, Properties and Application in Hardmetals* **2013**, 184, 1-242, doi:10.1007/978-3-319-00524-9.
58. Колесник, В.О. Технологічне забезпечення якості при свердлінні циліндричних отворів в пакетах "вуглепластик/титановий сплав" Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т", Харків, 2016.