

**Ілля Іванченко¹, Володимир Кореньков², Юлія Лашина³,
Олена Мельник⁴, Сергій Лапач⁵**

¹магістр, кафедра технології машинобудування КПІ ім. Ігоря Сікорського (Київ, Україна)

E-mail: i.ivanchenko-mm24@iit.kpi.ua

²кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування КПІ ім. Ігоря Сікорського (Київ, Україна)
E-mail: korenkov.volodymyr@iit.kpi.ua, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1911-9496>, **ResearcherID:** [ADG-1590-2022](https://orcid.org/ADG-1590-2022)

³кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування КПІ ім. Ігоря Сікорського (Київ, Україна)
E-mail: lashyna.yuliia@iit.kpi.ua, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-3451-8740>, **ResearcherID:** [AAE-9728-2019](https://orcid.org/AAE-9728-2019)

⁴кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування КПІ ім. Ігоря Сікорського (Київ, Україна)
E-mail: melnik.olena@iit.kpi.ua, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-8667-4262>, **ResearcherID:** [NGS-5051-2025](https://orcid.org/NGS-5051-2025)

⁵старший викладач кафедри технології машинобудування КПІ ім. Ігоря Сікорського (Київ, Україна)

E-mail: lapach.serhei@iit.kpi.ua, **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-9399-191X>

ВПЛИВ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ НА СТІЙКІСТЬ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ ПРИ СВЕРДЛІННІ ВУГЛЕПЛАСТИКУ

При виготовленні виробів із вуглепластиків однією з найпоширеніших операцій оброблення різанням є свердління отворів. Цей процес супроводжується інтенсивним зносом різального інструменту та специфічними дефектами отворів. У роботі представлено результати дослідження впливу режимів різання та геометричних параметрів свердла на кількість придатних отворів при свердлінні спіральними свердлами зі швидкорізальної сталі. Якість отворів оцінювалась за допомогою світло-оптичної мікроскопії, за критерій якості прийнято значення коефіцієнта розширення. Робастний план експерименту побудовано на основі псевдовипадкових ЛПт-чисел. Регресійна модель та її статистичні характеристики отримані за допомогою програмного забезпечення ПРІАМ. Аналіз отриманої моделі, маргінальних рівнянь регресії та маргінальних поверхонь відшуку дозволить сформулювати рекомендації щодо вибору режимів різання. Встановлено, що для заданих умов найбільшу кількість придатних отворів можна отримати при частоті обертання шпинделя 1050 об/хв та подачі 0,17 мм/об – це твердження справедливе для всіх досліджуваних діаметрів свердел (2 мм, 2,5 мм, 3 мм, 4 мм) та для обох варіантів кута при вершині свердла (90°, 118°), при цьому свердла з кутом заточування 118° демонструють кращі результати.

Ключові слова: вуглепластик; CFRP; свердління; режими різання; композиційні матеріали; регресійний аналіз.

Рис.: 4. Табл.: 4. Бібл.: 16.

Актуальність теми дослідження. Вуглепластик – сучасний композиційний матеріал, який широко використовуються в машинобудуванні та авіабудуванні, завдяки поєднанню таких властивостей, як висока міцність, жорсткість та зменшення ваги порівняно з деталями, виготовленими з металевих конструкційних матеріалів. При виготовленні конструкцій із вуглепластиків важливим завданням є оброблення отворів. Механічне оброблення різанням, зокрема свердління, є одним із найбільш поширених методів отримання отворів необхідної якості [1]. При цьому процес супроводжується інтенсивним зносом різального інструменту та виникненням специфічних дефектів отворів, таких як розширення композиту, незрізані волокна, витягування волокон [2].

Постановка проблеми. Завищені режими різання призводять до збільшення осьової сили при свердлінні, що може спричинити розширення на виході отвору, а також до виривання волокон. У свою чергу, занижені режими різання призводять до збільшення часу контакту інструменту із заготовкою, сприяючи зношенню інструменту. Вибір режимів різання є важливим для забезпечення високої якості обробленої поверхні отворів і уникнення пошкоджень матеріалу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Покращення результатів свердління волокнистих полімерних композиційних матеріалів можна досягти шляхом впливу на параметри, подані нижче [3].

Режими різання. Подача і швидкість різання є параметрами, які мають найбільш значний вплив на видалення стружки, а отже, на сили різання, температуру в зоні оброблення та якість отворів [2]. У роботі [4] встановлено, що зі збільшенням подачі збільшується середня шорсткість поверхні та умовний коефіцієнт розширення,

оскільки збільшення швидкості зняття матеріалу призводить до зростання сили різання і більшого пошкодження поверхні. У цій роботі авторам вдалось зменшити розшарування на виході інструменту та покращити продуктивність при свердлінні композитів CFRP (англ. – Carbon-fiber reinforced polymer) шляхом оптимізації параметрів свердління. Одним із перспективних рішень є адаптивне керування величиною подачі [5] замість використання постійного її значення.

Швидкість різання впливає на температуру різання, а отже, на геометричні дефекти та швидкість зношування інструменту. Авторами роботи [6] встановлено, що чим більша швидкість різання, тим вища температура на виході з отвору. Це пояснюється тим, що чим більше швидкість обертання шпинделя, тим вище частота контакту ріжучої кромки з абразивними волокнами і таким чином, утворення тепла збільшується. Втім, у роботі [7] в результаті дослідження впливу параметрів свердління композитів CFRP на температури різання, виявилось, що зі збільшенням швидкості обертання шпинделя від $n_1 = 1500$ об/хв до $n_2 = 4500$ об/хв осьова сила зменшилась на 13,9 %, а пікова температура різання знизилась на 63,2 %.

Геометрія свердла. Для оброблення отворів у композиційних матеріалах можуть використовуватись свердла різної геометрії. Вплив геометрії інструменту на якість оброблених отворів досліджувався в роботах [8-11]. Вдосконалення включають: зміну кутів при вершині, підточування поперечної кромки, зміну кількості різальних кромок, використання ступінчастих свердел та інші методи.

Матеріал свердла. Вибір інструментального матеріалу є важливим, однак дослідженнями встановлено, що він має менший вплив на поведінку вуглепластиків ніж геометрія інструменту [2]. Для оброблення волокнистих полімерних композиційних матеріалів використовують свердла зі швидкорізальної сталі та твердих сплавів із покриттям та без покриття, а також свердла з надтвердих матеріалів, оснащені різальною частиною з композиційного полікристалічного алмазу [12; 13].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. З урахуванням вищезазначеного, актуальним завданням при розробці технологічної операції свердління композиційного матеріалу є вибір режимів різання та геометричних параметрів різального інструменту, які забезпечать найбільшу стійкість інструменту і необхідну якість отворів.

Метою дослідження є визначення впливу режимів різання, діаметра та кута при вершині свердла на стійкість різального інструменту при свердлінні отворів у вуглепластику [14]. Це дасть можливість надати рекомендації щодо вибору режимів різання, а саме частоти обертання шпинделя і подачі, а також кута при вершині свердла, при обробці отворів свердлами різних діаметрів.

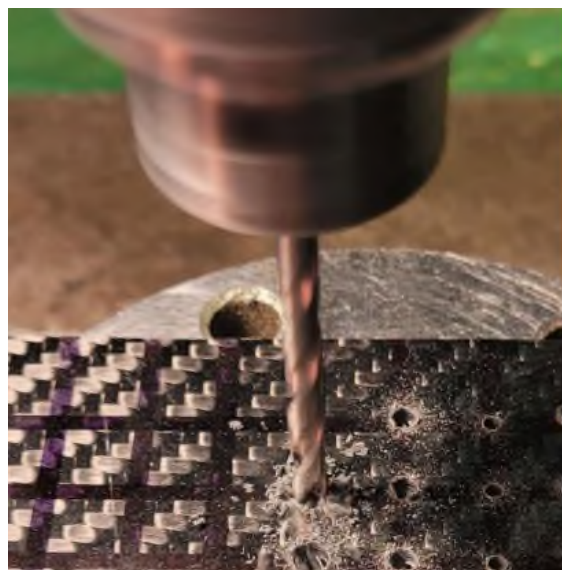
Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання: обрати методику дослідження стійкості свердел, скласти план експерименту, виконати досліді відповідно до плану, побудувати математичну модель залежності стійкості інструменту від обраних параметрів, виконати аналіз отриманої моделі, надати рекомендації щодо вибору режимів різання.

Виклад основного матеріалу. Обладнання та інструменти. Дослідження виконувались на вертикально-свердлильному верстаті 2A125. Для заточування сверدل використовувався універсально заточувальний верстат 3E642. Для оцінювання розшарування отворів використано мікроскоп Meiji Techno MA749.

Матеріали. Залежність зносу різального інструменту від режимів різання досліджувалась для вуглепластику, який постачається у вигляді плити товщиною 2 мм, виготовленої за технологією 3K Twill, при свердлінні отворів спіральними свердлами зі швидкорізальної сталі діаметрами 2; 2,5; 3 і 4 мм з кутом при вершині свердла 90° та 118°. На рис. 1 представлено використане обладнання, інструмент та матеріали.



а



б

*Рис. 1. Проведення дослідів:**а – закріплення зразка на столі верстата; б – свердління отворів*

Методи дослідження. Стійкість свердел залежно від режимів різання та геометричних параметрів інструменту оцінювалась за кількістю отворів, які були оброблені із задовільною якістю. Якість отворів оцінювалась за величиною розшарування на основі аналізу цифрових зображень, отриманих за допомогою світло-оптичної мікроскопії. Для оцінювання якості отворів використано коефіцієнт розшарування F_d [15], який розраховується за формулою:

$$F_d = \frac{D_{\max}}{D_0},$$

де $D_{\max}$ – максимальний діаметр пошкодженої зони; D_0 – номінальний діаметр просвердленого отвору.

За критерій якості отвору було прийнято значення коефіцієнта розшарування до 1,15.

Характерні зображення отворів різних діаметрів, які характеризуються значенням коефіцієнта розшарування в межах норми, та отворів, де коефіцієнт розшарування перевищує норму, подані на рис. 2.

Досліджувалась залежність кількості просвердлених отворів одним інструментом, які відповідають обраному критерію якості, від таких факторів:

X_1 – частота обертання шпинделя, рівні варіювання: 540, 676, 950, 1350 об/хв;

X_2 – діаметр свердла, рівні варіювання: 2; 2,5; 3; 4 мм;

X_3 – подача, рівні варіювання: 0,1; 0,13; 0,17; 0,22 мм/об;

X_4 – кут при вершині свердла, рівні варіювання: 90°, 118°.

Емпіричні математичні моделі побудовано з використанням методів регресійного аналізу та планування експерименту. В експерименті три фактори варіюються на чотирьох рівнях і один фактор на двох рівнях. Робастний план побудовано на базі псевдовипадкових ЛП_т чисел (табл. 1):

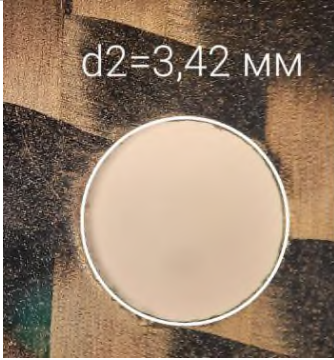
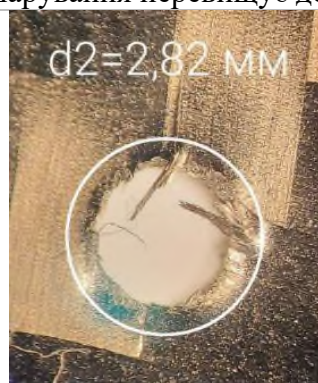
Номинальний діаметр отвору		
Ø 3 мм	Ø 2 мм	Ø 2,5 мм
Розшарування в межах норми		
		
$F_d = 1,14$	$F_d = 1,15$	$F_d = 1,08$
Коефіцієнт розшарування перевищує допустиме значення		
		
$F_d = 1,23$	$F_d = 1,41$	$F_d = 1,28$

Рис. 2. Приклад аналізу просвердлених отворів

Таблиця 1 – Робастний план експерименту

№ досл.	X_1	X_2	X_3	X_4
1	0,501976	0,498024	0,498024	0,498024
2	0,249012	0,750988	0,245059	0,750988
3	0,754941	0,245059	0,750988	0,245059
4	0,12253	0,624506	0,87747	0,87747
5	0,628458	0,118577	0,371542	0,371542
6	0,375494	0,371542	0,624506	0,118577
7	0,881423	0,87747	0,118577	0,624506
8	0,059289	0,940711	0,687747	0,3083
9	0,565217	0,434783	0,181818	0,814229
10	0,312253	0,181818	0,940711	0,561265
11	0,818182	0,687747	0,434783	0,055336
12	0,185771	0,3083	0,3083	0,687747
13	0,6917	0,814229	0,814229	0,181818
14	0,438735	0,561265	0,055336	0,434783
15	0,944664	0,055336	0,561265	0,940711
16	0,027668	0,529644	0,403162	0,213439
17	0,533597	0,023715	0,909091	0,719368
18	0,280632	0,27668	0,150198	0,972332
19	0,786561	0,782609	0,656126	0,466403
20	0,15415	0,150198	0,529644	0,84585
21	0,660079	0,656126	0,023715	0,339921
22	0,407115	0,909091	0,782609	0,086957

Після визначення кількості дослідів та розроблення плану проведення експериментів, побудовано робочу матрицю експериментів (табл. 3) за формулою:

$$X_{iu} = X_{i \min} + \xi_{iu}(X_{i \max} - X_{i \min}),$$

де X_{iu} – розраховане натуральне значення i -го фактору для u -го експерименту;

$X_{i \min}$ – мінімальне значення i -го фактору;

$X_{i \max}$ – максимальне значення i -го фактору;

ξ_{iu} – кодоване (в діапазоні від 0 до 1) значення i -го фактору для u -го експерименту.

Результати дослідження. Узагальнена робоча матриця експерименту, що включає значення рівнів факторів та результати проведених дослідів, наведена у табл. 2.

Таблиця 2 – Робоча матриця експериментів

Теоретичні значення рівнів варіювання факторів		Фактори				Функція	
		Частота обертання шпинделя, об/хв	Діаметр свердла, мм	Подача, мм/об	Кут при вершині свердла	Кількість отворів	
		Формалізоване позначення факторів та натуральні значення їх рівнів				Формалізоване позначення функції	
$F_1 \dots F_3$	F_4	X_1	X_2	X_3	X_4	y	
0	0	540	2	0,1	90	Значення результатів дослідів	
1	1	676	2,5	0,13	118		
2	-	950	3	0,17	-		
3	-	1350	4	0,22	-	y_1	y_2
Дослід 1		950	2,5	0,13	90	17	16
2		540	4	0,1	118	11	13
3		1350	2	0,22	90	10	9
4		540	3	0,22	118	5	7
5		950	2	0,13	90	14	16
6		676	2,5	0,17	90	12	15
7		1350	4	0,1	118	15	17
8		540	4	0,17	90	14	11
9		950	2,5	0,1	118	15	14
10		676	2	0,22	118	13	10
11		1350	3	0,13	90	16	14
12		540	2,5	0,13	118	14	12
13		950	4	0,22	90	16	18
14		676	3	0,1	90	5	8
15		1350	2	0,17	118	17	19
16		540	3	0,13	90	7	10
17		950	2	0,22	118	17	16
18		676	2,5	0,1	118	13	10
19		1350	4	0,17	90	15	17
20		540	2	0,17	118	13	15
21		950	3	0,1	90	8	11
22		676	4	0,22	90	9	8

Джерело: розроблено авторами.

Багатофакторна статистична модель для функції відгуку отримана з використанням програмного забезпечення ПРИАМ [16]:

$$\hat{y} = 12,8066 + 3,34616x_1 - 3,69898z_3 - 2,00537z_1x_3 - 3,0485z_1 + 2,24964x_4 + 1,26181x_2,$$

де $x_1 = 0,00206961 * (X_1 - 866,818)$;

$$z_1 = 2,36613 * ((x_1^2) - 0,329322 * x_1 - 0,395574);$$

$$x_2 = 0,897959 * (X_2 - 2,88636);$$

$$x_3 = 15,493 * (X_3 - 0,155455);$$

$$z_3 = 1,96696 * ((x_3^2) - 0,169754 * x_3 - 0,520928);$$

$$x_4 = 0,0654762 * (X_4 - 102,727).$$

Статистичні характеристики моделі, отримані в програмному забезпеченні ПРИАМ, наведені в табл. 3. У результаті аналізу цих характеристик встановлено, що отримана математична модель адекватна, інформативна, а також стійка як структурно, так і обчислювально.

Таблиця 3 – Статистичні характеристики математичної моделі

Параметри статистичного аналізу		Умовні позначення	Значення параметрів $\hat{y}$
Перевірка гіпотези про відтворюваність результатів експерименту	Дисперсія відтворюваності	$S_{\text{відт}}^2$	2,455
	Середнє квадратичне відхилення	$S_{\text{відт}}$	1,567
	Число ступенів вільності для дисперсії відтворюваності	$f_{\text{відт}1}$	22
		$f_{\text{відт}2}$	1
	Експериментальне значення G-критерія	$G_{\text{експ}}$	0,083
	Критичне значення G-критерія	$G_{\text{крит}}$	0,365
Перевірка гіпотези про адекватність моделі	Рівень значущості	α	0,05
	Дисперсія адекватності	$S_{\text{ад}}^2$	1,335
	Експериментальне значення F-критерія	$F_{\text{експ}}$	1,838
	Критичне значення F-критерія	$F_{\text{крит}}$	2,306
	Число ступенів вільності для адекватності	$f_{\text{ад}1}$	6
		$f_{\text{ад}2}$	15
	Рівень значущості	α	0,05
Аналіз отриманої моделі на інформативність	Адекватність моделі	адекватна	
	Коефіцієнт множинної кореляції	R	0,960013
	Число ступенів вільності для коефіцієнтів математичної моделі	$f_{k'}$	6
	Число ступенів вільності для остаточної суми квадратів	$f_{\text{ост}R}$	37
	Експериментальне значення F-критерія	$F_{\text{експ}}$	29,398
	Критичне значення F-критерія	$F_{\text{крит}}$	2,356
	Рівень значущості	α	0,05
	Критерій Бокса і Вєца	γ	2
Інформативність математичної моделі		хороша	
Число обумовленості		$\text{cond}(X^T X)$	1,252
Середнє абсолютних величин відносних похибок апроксимації, %		$ \bar{e}_{\text{відн}} $	7,51
Середнє абсолютних величин абсолютних похибок апроксимації		$ \bar{e}_u $	0,81475
Частка розсіювання, що пояснюється математичною моделлю		$Q_{\hat{y}}$	0,92

Джерело: розроблено авторами.

Ступінь впливу окремих факторів на функцію відгуку оцінювався за відсотком участі та коефіцієнтом кореляції з відгуком (табл. 4). З'ясовано, що найбільший вплив має фактор частоти обертання шпинделя (27,7 %) та кут при вершині свердла (17,8 %) та взаємодія факторів частоти обертання шпинделя і подачі.

Таблиця 4 – Ступінь впливу факторів на функцію відгуку

Регресор	Коефіцієнт кореляції з відгуком	Частка впливу, %
x_1	0,526	27,7
z_3	0,396	14,1
$z_1 x_3$	0,346	15,7
z_1	0,176	12,9
x_4	0,141	17,8
x_2	0,088	3,9

Джерело: розроблено авторами.

Характер залежності $\hat{y}$ (кількість отворів, просвердлених одним інструментом, для яких значення коефіцієнта розшарування не перевищує 1,15, N , шт.) від факторів X_1 (частота обертання шпинделя, n , об/хв) та X_3 (подача, f , мм/об) для різних варіантів геометрії свердла (D ,

мм – діаметр свердла, 2φ – кут при вершині свердла) ілюструється графіками маргінальних рівнянь регресії (рис. 3) та графіками маргінальних поверхонь відгуку (рис. 4).

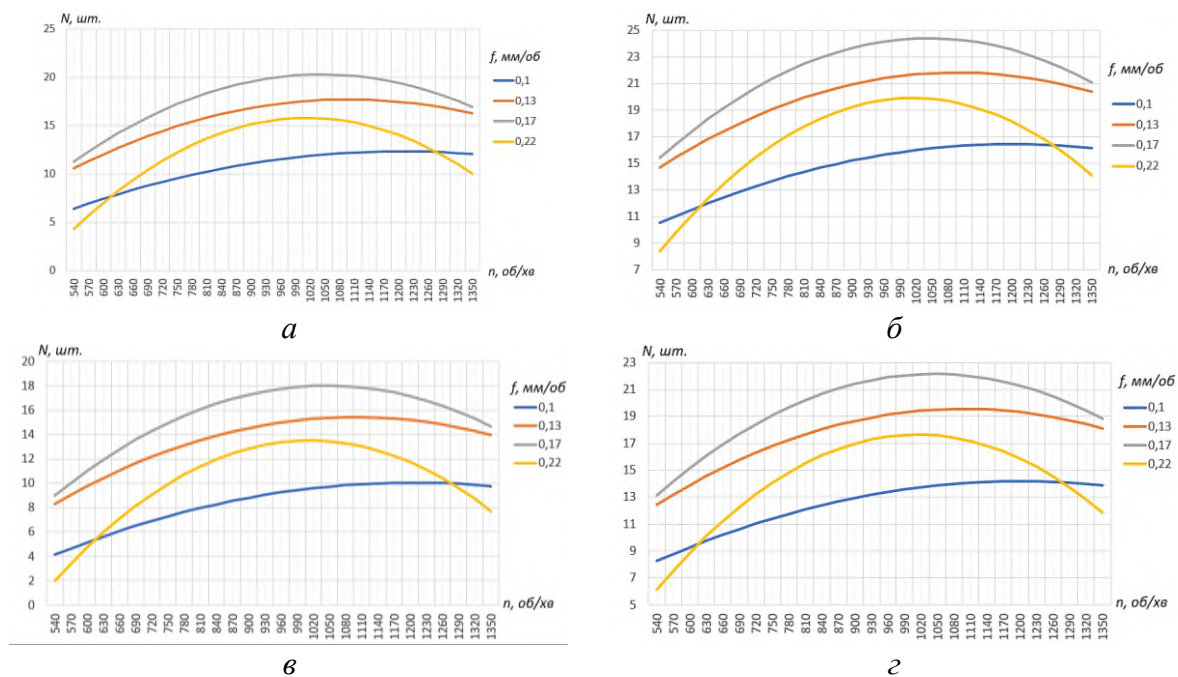


Рис. 3. Графіки маргінальних рівнянь регресії при фіксованих значеннях:
а – $D = 4$ мм, $2\varphi = 90^\circ$; б – $D = 4$ мм, $2\varphi = 118^\circ$; в – $D = 2$ мм, $2\varphi = 90^\circ$;
г – $D = 2$ мм, $2\varphi = 118^\circ$

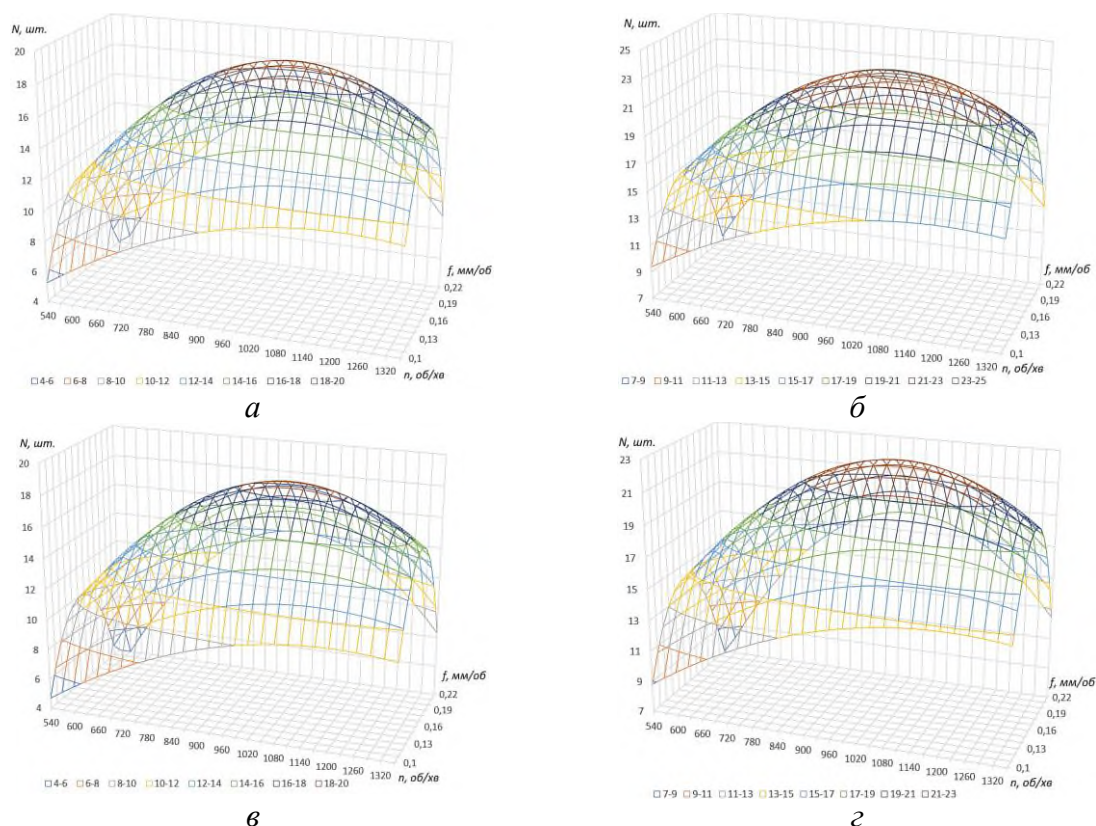


Рис. 4. Маргінальні поверхні відгуку при фіксованих значеннях:
а – $D = 3$ мм, $2\varphi = 90^\circ$; б – $D = 3$ мм, $2\varphi = 118^\circ$;
в – $D = 2,5$ мм, $2\varphi = 90^\circ$; г – $D = 2,5$ мм, $2\varphi = 118^\circ$

У результаті аналізу графіків маргінальних рівнянь регресії (рис. 3) та графіків маргінальних поверхонь відгуку (рис. 4) встановлено, що в умовах, які досліджувались, максимальна кількість придатних отворів може бути отримана при таких значеннях факторів: $X_1 = 1050$ об/хв та $X_3 = 0,17$ мм/об – це твердження є справедливим для всіх досліджуваних діаметрів свердел (2; 2,5; 3; 4 мм) та обох варіантів кутів заточування (90° , 118°). З погляду стійкості інструменту при обробці вуглепластику кут заточування 118° демонструє кращі результати.

Висновки. Визначення впливу режимів різання, діаметру та кута при вершині свердла на стійкість різального інструменту при свердлінні вуглепластику виконувалось за допомогою експериментального визначення кількості отворів, оброблених одним свердлом, для яких значення коефіцієнта розшарування не перевищує 1,15.

В результаті статистичного оброблення результатів дослідів за допомогою програмного забезпечення ПРІАМ отримано емпіричну модель, яка описує залежність кількості придатних отворів від частоти обертання шпинделя, подачі, кута при вершині свердла та діаметру свердла. У результаті аналізу статистичних характеристик моделі встановлено, що модель адекватна, інформативна, а також стійка структурно і обчислювально.

Встановлено, що для досліджуваних умов найбільший вплив мають фактори: частота обертання шпинделя (27,7 %), кут при вершині свердла (17,8 %), та взаємодія факторів частоти обертання шпинделя і подачі.

Аналіз отриманих залежностей дозволив сформулювати наступні рекомендації при свердлінні отворів у вуглепластику: при свердлінні отворів малих діаметрів (від 2 до 4 мм) спіральними свердлами зі швидкорізальної сталі кут заточування 118° демонструє кращі результати, ніж кут 90° , рекомендовані режими різання: частота обертання шпинделя 1050 об/хв, подача 0,17 мм/об.

Можливі напрямки подальших досліджень: визначення доцільних режимів різання при обробленні вуглепластиків для свердел вдосконаленої геометрії, виготовлених з інших інструментальних матеріалів.

Список використаних джерел

1. Пасічник, В. А., Глоба, О. В. (2011). Технології отримання отворів у композиційних матеріалах і методи контролю якості обробки. *Технологические системы*, 4(57), 48-53.
2. Xu, J., Geier, N., Shen, J., Krishnaraj, V., & Samsudeensadham, S. (2023). A review on CFRP drilling: Fundamental mechanisms, damage issues, and approaches toward high-quality drilling. *Journal of Materials Research and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.023>.
3. Пасічник, В. А., Черказний, В. Ю. (2015). Систематизація та аналіз методів механічного оброблення отворів в композиційних матеріалах. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування*, 1(73), 29-37.
4. Wang, Q., & Jia, X. (2021). Optimization of cutting parameters for improving exit delamination, surface roughness, and production rate in drilling of CFRP composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07918-2>.
5. Yaşar, N., & Günay, M. (2019). Experimental investigation on novel drilling strategy of CFRP laminates using variable feed rate. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41(3). <https://doi.org/10.1007/s40430-019-1658-2>.
6. Zhang, B., Wang, F., Wang, X., Li, Y., & Wang, Q. (2020). Optimized selection of process parameters based on reasonable control of axial force and hole-exit temperature in drilling of CFRP. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 110(3-4), 797–812. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05868-9>.
7. Chen, R., Li, S., Li, C., Li, P., Jiang, Y., & Ko, T. J. (2021). Influence of fiber direction and processing parameters on drilling temperature of CFRP. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 35(4), 1663–1669. <https://doi.org/10.1007/s12206-021-0329-2>.
8. Durão, L. M. P., Gonçalves, D. J. S., Tavares, J. M. R. S., de Albuquerque, V. H. C., Aguiar Vieira, A., & Torres Marques, A. (2010). Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates. *Composite Structures*, 92(7), 1545–1550. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.10.035>.

9. Shyha, I. S., Aspinwall, D. K., Soo, S. L., & Bradley, S. (2009). Drill geometry and operating effects when cutting small diameter holes in CFRP. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(12-13), 1008–1014. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.05.009>.
10. Sandvik coromant. (n.d.). Sandvik Coromant. <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/tools/drilling-tools/solid-carbide-drills/corodrigill-863>.
11. Hocheng, H., & Tsao, C. C. (2003). Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits. *Journal of Materials Processing Technology*, 140(1-3), 335–339. [https://doi.org/10.1016/s0924-0136\(03\)00749-0](https://doi.org/10.1016/s0924-0136(03)00749-0).
12. Hrechuk, A., Bushlya, V., M'Saoubi, R., & Ståhl, J.-E. (2018). Experimental investigations into tool wear of drilling CFRP. *Procedia Manufacturing*, 25, 294–301. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.086>.
13. Karpat, Y., & Bahtiyar, O. (2015). Comparative Analysis of PCD Drill Designs During Drilling of CFRP Laminates. *15th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations (15th CMMO)*, 31, 316–321. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.094>.
14. Іванченко, І. І. (2024). *Визначення періоду стійкості спіральних свердл при обробленні композиційних матеріалів* [Неопубл. магист. дисерт].
15. Chen, W.-C. (1997). Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 37(8), 1097–1108. [https://doi.org/10.1016/s0890-6955\(96\)00095-8](https://doi.org/10.1016/s0890-6955(96)00095-8).
16. Lapach, S., Radchenko, S. & Babich P. (1993). *Planning, regression and analysis of PRIAM models (PRIAM)*.

References

1. Pasichnyk, V. A., Globa, O. V. (2011). Tekhnolohii otrymannia otvoriv u kompozytsiinykh materialakh i metody kontroliu yakosti obrobky [Technologies for obtaining holes in composite materials and methods for controlling the quality of processing]. *Tekhnologicheskyye sistemy – Technological system*, 4(57), 48-53.
2. Jinyang Xu, Norbert Geier, Jiaxin Shen, Vijayan Krishnaraj, S. Samsudeensadham, A review on CFRP drilling: fundamental mechanisms, damage issues, and approaches toward high-quality drilling. *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 24, 2023, Pages 9677-9707/. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.023>.
3. Pasichnyk, V. A. (2015). Systematyzatsiia ta analiz metodiv mekhanichnoho obroblennia otvoriv v kompozytsiinykh materialakh. [Systematization and analysis of methods for machining holes in composite materials]. *Visnyk NTUU «KPI». Seriya mashynobuduvannia – Bulletin of NTUU "KPI". Mechanical Engineering Series*, 1(73), 29-37.
4. Wang, Q., & Jia, X. (2021). Optimization of cutting parameters for improving exit delamination, surface roughness, and production rate in drilling of CFRP composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07918-2>.
5. Yaşar, N., & Günay, M. (2019). Experimental investigation on novel drilling strategy of CFRP laminates using variable feed rate. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41(3). <https://doi.org/10.1007/s40430-019-1658-2>.
6. Zhang, B., Wang, F., Wang, X., Li, Y., & Wang, Q. (2020). Optimized selection of process parameters based on reasonable control of axial force and hole-exit temperature in drilling of CFRP. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 110(3-4), 797–812. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05868-9>.
7. Chen, R., Li, S., Li, C., Li, P., Jiang, Y., & Ko, T. J. (2021). Influence of fiber direction and processing parameters on drilling temperature of CFRP. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 35(4), 1663–1669. <https://doi.org/10.1007/s12206-021-0329-2>.
8. Durão, L. M. P., Gonçalves, D. J. S., Tavares, J. M. R. S., de Albuquerque, V. H. C., Aguiar Vieira, A., & Torres Marques, A. (2010). Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates. *Composite Structures*, 92(7), 1545–1550. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.10.035>.
9. Shyha, I. S., Aspinwall, D. K., Soo, S. L., & Bradley, S. (2009). Drill geometry and operating effects when cutting small diameter holes in CFRP. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(12-13), 1008–1014. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.05.009>.
10. Sandvik coromant. (n.d.). Sandvik Coromant. <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/tools/drilling-tools/solid-carbide-drills/corodrigill-863>.

11. Hocheng, H., & Tsao, C. C. (2003). Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits. *Journal of Materials Processing Technology*, 140(1-3), 335–339. [https://doi.org/10.1016/s0924-0136\(03\)00749-0](https://doi.org/10.1016/s0924-0136(03)00749-0).
12. Hrechuk, A., Bushlya, V., M'Saoubi, R., & Ståhl, J.-E. (2018). Experimental investigations into tool wear of drilling CFRP. *Procedia Manufacturing*, 25, 294–301. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.086>.
13. Karpat, Y., & Bahtiyar, O. (2015). Comparative Analysis of PCD Drill Designs During Drilling of CFRP Laminates. *15th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations (15th CMMO)*, 31, 316–321. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.094>.
14. Ivanchenko, I. I. (2024). Vyznachennia periodu stiikosti spiralnykh sverdl pry obroblenni kompozytsiinykh materialiv [Determination of the stability period of twist drills when processing composite materials]. *Neopublikovana mahisterska robota – Not-published Master thesis*.
15. Chen, W.-C. (1997). Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 37(8), 1097–1108. [https://doi.org/10.1016/s0890-6955\(96\)00095-8](https://doi.org/10.1016/s0890-6955(96)00095-8).
16. Lapach, S., Radchenko, S. & Babich P. (1993). *Planning, regression and analysis of PRIAM models (PRIAM)*.

Отримано 19.05.2025

UDC 621.9.01

Ilya Ivanchenko¹, Volodymyr Korenkov², Yulia Lashina³, Olena Melnyk⁴, Serhiy Lapach⁵

¹Master, Department of Mechanical Engineering
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)
E-mail: i.ivanchenko-mmi24@lil.kpi.ua

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)
E-mail: korenkov.volodymyr@lil.kpi.ua, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1911-9496>, **ResearcherID:** [ADG-1590-2022](https://orcid.org/ADG-1590-2022)

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)
E-mail: lashyna.yuliia@lil.kpi.ua, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-3451-8740>, **ResearcherID:** [AAE-9728-2019](https://orcid.org/AAE-9728-2019)

⁴PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)
E-mail: melnyk.olena@lil.kpi.ua, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-8667-4262>, **ResearcherID:** [NGS-5051-2025](https://orcid.org/NGS-5051-2025)

⁵Senior Lecturer, Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)
E-mail: lapach.serhei@lil.kpi.ua, **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-9399-191X>

INFLUENCE OF CUTTING MODES ON THE CUTTING TOOL LIFE WHEN DRILLING CARBON-FIBER REINFORCED POLYMER

In the manufacture of products made of carbon fiber reinforced plastics (CFRP), one of the most common cutting operations is drilling holes. This process is accompanied by intensive wear of the cutting tool and specific hole defects.

The paper presents results of the study of the effect of cutting modes and geometric parameters of the drill on the tool life when drilling CFRP with high-speed steel twist drills. The tool life was assessed by the number of quality holes, the criterion for replacing the tool was the value of the hole delamination coefficient (the ratio of the maximum diameter of the damaged area to the nominal diameter of the drilled hole). The quality of holes using the light-optical microscopy was assessed. Empirical mathematical models were obtained using regression analysis and experimental design methods. The robust experimental design was built based on the pseudo-random LPT numbers. The regression model and its statistical characteristics were obtained using the PRIAM software. Statistical characteristics of the model indicate its adequacy, informativeness and stability. The analysis of the degree of individual factors' influence on the response function was carried out based on the percentage of participation and the correlation coefficient. It was found that the spindle speed (27.7 %), the drill sharpening angle (17.8 %), and the interaction of the spindle speed and feed have the greatest influence.

The analysis of the resulting model, marginal regression equations and marginal responses allowed to formulate recommendations for choosing cutting modes. It was found that for the given conditions the greatest number of quality holes can be obtained at the spindle speed of 1050 rpm and a feed rate of 0.17 mm/rev – this statement is true for all studied drill diameters (2 mm...4 mm) and for both angle options (90°, 118°), while drills with a sharpening angle of 118° demonstrate better results. The results obtained during the study can be used to optimize technological processes for drilling CFRP and for choosing proper cutting tool, which, in turn, will contribute to increasing both productivity and processing quality.

Keywords: carbon fiber; CFRP; drilling; cutting modes; composite materials; regression analysis.

Fig.: 4. Table: 4. References: 16.