

**Jinyang Xu\*, Linfeng Li, Tieyu Lin, Ming Chen**

State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration,  
School of Mechanical Engineering,  
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, P.R. China

\*xujinyang@sjtu.edu.cn

## **Оцінка інструменту з алмазним покриттям під час свердління високоміцних композитів із вуглепластику**

*Високоміцні полімери, армовані вуглецевим волокном, (CFRP) є передовими надтвердими конструкційними матеріалами, які широко використовують в сучасній аерокосмічній промисловості, але погано піддаються механічній обробці. Ця стаття спрямована на вивчення ефективності спеціальних інструментів з алмазним покриттям щодо властивостей обробки високоміцних композитів CFRP. Досліджений зразок CFRP представляє собою різнонаправлений композитний ламінат на полімерній основі, виготовлений із високоміцних вуглецевих волокон T700 та епоксидної смоли FRD-YZR-03. Ефективність алмазного інструменту під час різання високоміцних CFRP була ретельно вивчена з точки зору реакції заготовки, стану дефектів поверхні та стану якості виробу, що розрізали. Результати свідчать, що геометрія інструменту суттєво впливає на характер різання композита, а ступінчасте свердло перевершує свічковий інструмент завдяки ступінчастій геометричній формі, яка мінімізує жорстку контактну взаємодію з твердою композитною заготовкою CFRP під час процесу відокремлення стружки. Композит CFRP, ймовірно, спричиняє серйозні дефекти поверхні через його надзвичайно високу міцність та модуль незважаючи на використання інструментів з алмазним покриттям. Більш того, добре продумана геометрична модифікація алмазного інструменту може значно покращити якість поверхні виробу з композита.*

**Ключові слова:** високоміцні композити, інструменти з алмазним покриттям, оброблюваність, пошкодження від розширення.

### **ВСТУП**

В останні роки полімери, армовані вуглецевим волокном (CFRP), набувають великої популярності в різних галузях техніки завдяки своїм чудовим фізичним і механічним властивостям і відмінним структурним функціям [1–4]. Композит CFRP є типовим двофазним матеріалом, який складається з армуючих волокон і матричної основи. Критичні властивості всієї композитної фази забезпечують через зміцнення волокна, тоді як матрична основа зв'язує волокна, переносить навантаження та захищає волокна від пошкодження навколишнього середовища [5]. Що стосується механічних властивостей композита, високоміцний CFRP є одним із типів надтвердих волокнистих композитів, що виготовляють з вуглецевих волокон класу T700 або T800 і які демонструють набагато вищу механічну міцність, ніж звичайні низькоміцні композити. Вони стали набагато привабливішими для різних галузей машинобудування, в основному в аерокосмічній промисловості. Їх застосовують в сучасних літаках, таких

як Boeing 787 Dreamliner і Airbus A380 [3]. В даний час високоміцні композити CFRP користуються значним попитом на ринку для виготовлення основних несучих компонентів завдяки їхнім унікальним властивостям, таким як висока питома міцність/жорсткість, чудова в'язкість руйнування, відмінна корозійна стійкість та задовільна довговічність [3, 6–9].

Незважаючи на те, що ці композити отримують форму, близьку до сінчасної форми за допомогою операцій формування, операція вторинної обробки, така як свердління, все ще є важливою під час формування деталей з композита для отримання кінцевого продукту [10]. Однак через властиву анізотропію та неоднорідність свердління високоміцних композитів CFRP є досить складним завданням, яке стикається з величезними технічними проблемами. Особливі проблеми виникають через низьку якість поверхні [11–13], серйозні пошкодження, спричинені різанням [14–16], швидке зношування інструменту [17–19] та багато інших. На сьогодні науковці з усього світу докладають великих зусиль для покращення характеристик механічної обробки вуглепластиків за рахунок використання оптимальних параметрів процесу, зміни геометрії та нових матеріалів інструменту, передових стратегій різання тощо. Попередні дослідження показали переваги використання надтвердих свердел для покращення оброблюваності композита [20–24]. Однак у літературі досі не розглянуто ефективність спеціальних свердел з алмазним покриттям щодо різання високоміцних CFRP. Тому дана робота спрямована на оцінку ефективності спеціального інструменту з алмазним покриттям у разі свердління одного типу високоміцного вуглецевого сплаву T700, армованого волокном епоксидного композита. Вплив алмазного інструменту на оброблюваність високоміцних CFRP композитів було ретельно вивчено з погляду реакції заготовки, зі стану дефектів поверхні та якості продукції, що розрізали.

## ЕКСПЕРИМЕНТ

### Характеристика та властивості зразків композитних заготовок

У цій роботі використано високоміцний ламінат CFRP як зразок заготовки для операції свердління. Композитний матеріал виготовлено з високоміцних вуглецевих волокон T700 і епоксидної смоли FRD-YZR-03. Основний склад заготовки CFRP наведено в табл. 1. Композит CFRP T700/FRD-YZR-03 має дуже високий модуль пружності 240 ГПа на розтяг, границю міцності на розрив 4900 МПа і модуль пружності на вигин 210 ГПа, що робить його досить складним для різання під час операції свердління отворів. Його основні фізико-механічні властивості наведено в табл. 2. Зразок композита представляв собою різноспрямований шаруватий вуглець-епоксидний матеріал, виготовлений у послідовності укладання  $[(0^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ)_4]_s$ . Це прямокутна плита загальним розміром  $300 \times 200 \times 6,60$  мм.

**Таблиця 1. Склад високоміцного композита CFRP**

Армування	Основа матриці	Об'ємна частка волокна, %	Пучки волокон
Вуглецеві волокна T700	Епоксидна смола FRD-YZR-03	60	7 мкм, 12000 монониток

### Алмазні інструменти, випробування на свердління та вимірювання після обробки

Оскільки інструменти з алмазним покриттям демонструють високу твердість і чудові термічні характеристики, вони стають дуже привабливими для

свердління високоміцних CFRP. У поточній роботі для обробки композитів було використано свічкові і ступінчасті свердла з алмазним покриттям. Ці інструменти було виготовлено шляхом нанесення алмазу на підкладку з карбїду вольфраму (WC/Co). Структурна морфологія двох свердел показано на рис. 1, детальні фізико-механічні властивості алмазного покриття наведено в табл. 3. Свічкове свердло має три виступаючих наконечники, у тому числі один центруючий і два периферійних, які можуть значно зменшити зусилля свердління та забезпечити гостроту бокових ріжучих кромки, тоді як ступінчасте свердло сконструйовано за схемою ступінчастого свердління, що в першу чергу забезпечує перший крок для створення пілотного отвору та другий крок для розсверлювання поверхні отвору до кінцевого діаметра. Досліджене ступінчасте свердло має співвідношення основного (7,8 мм) діаметра до другого (8,0 мм) як 0,975. Невелика різниця між попереднім і наступним діаметрами в основному спрямована на те, щоб наступні кромки сходенок могли розширювати поверхні раніше вирізаних отворів кромкою попередньої сходинки, оскільки для такого ступінчастого свердління задіяний мінімальний об'єм видалення стружки. Обидва свердла покриті алмазом, щоб підвищити твердість кромки та зменшити її коефіцієнт тертя на границі інструмент–заготовка під час процесу обробки композита. Обидва свердла мають однаковий (8 мм) діаметр, і однаковий (30°) кут спіралі. Експерименти проводили на обробному центрі з ЧПУ DMU 70V за різних умов процесу (швидкість різання  $v_p = 40, 80, 120$  м/хв і швидкість подачі  $f = 0,06, 0,09, 0,12$  мм/об.), як показано на рис. 2. Сили різання вимірювали динамометричною системою KISTLER (тип 9272) під час обробки композита. Дефект відшарування, викликаний бурінням, було охарактеризовано скануючим акустичним мікроскопом KSI V-400E (SAM) і визначено кількісно за допомогою індикатора тривимірного коефіцієнта розшарування  $F_v$ , запропонованого в [9]. Нарешті, морфологічний стан поверхневих шарів оброблених композитних виробів досліджували за допомогою скануючого електронного мікроскопа (SEM) FEI SIRION200.

**Таблиця 2. Фізико-механічні властивості високоміцного композита CFRP**

Модуль пружності, ГПа	Границя міцності на під час розтягу, МПа	Коефіцієнт Пуассона, $\nu$	Модуль згину, ГПа	Міцність на згин, МПа	Міцність на зсув, МПа	Температура силювання, °C
240	4900	0,30	210	1500	125	125–135

**Таблиця 3. Детальні фізико-механічні властивості алмазного покриття**

Властивості	Значення
Товщина, мкм	9
Щільність $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	2,8–3,5
Твердість, HV	10000
Модуль пружності $E$ , ГПа	910–1250
Теплопровідність $\lambda$ , Вт/м·К	2200
Коефіцієнт теплового розширення $\alpha_T \cdot 10^{-6}$ , К <sup>-1</sup>	2,0
Коефіцієнт Пуассона $\nu$	0,07

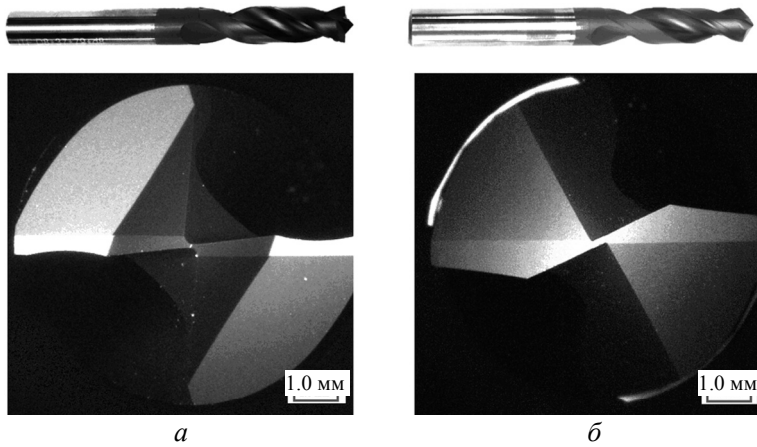


Рис. 1. Структурна морфологія свердла, що використовували: свічникове (а) і ступінчасте (б) свердло.

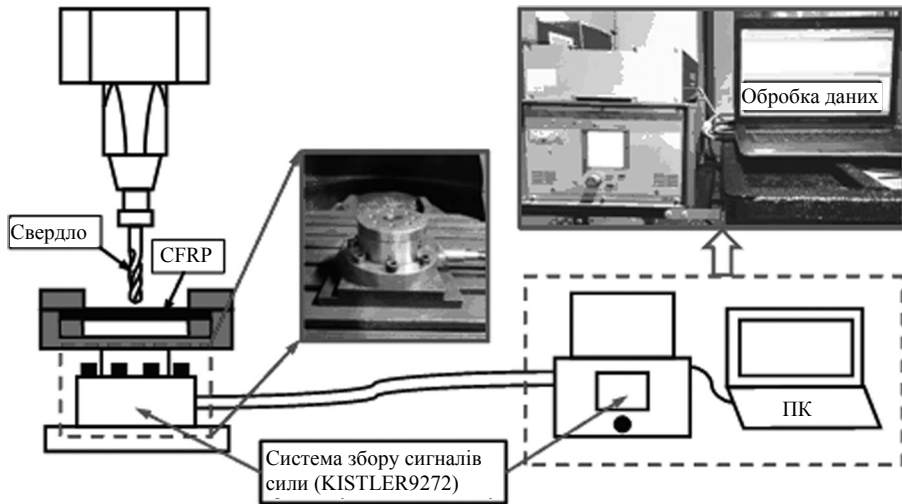


Рис. 2. Експериментальна установка для свердління композитів CFRP.

## РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

### Характеристика обробки композита

Сила різання та енергія свердління є життєво важливими показниками для оцінки характеристик оброблених композитних матеріалів. Ці характеристики механічної обробки значною мірою визначають високі твердість та міцність обробленого композитного матеріалу. Оскільки досліджуваний високоміцний вуглепластик має високу міцність на розрив (4900 МПа) і високий модуль пружності (240 ГПа), це спричинить сильну контактну взаємодію з поверхнею інструменту для відокремлення стружки від передньої поверхні інструменту, що призведе до високого рівня сил різання та енерговитрат обробки. Однак інструмент з алмазним покриттям має високу твердість 10000 HV і модуль пружності 910–1250 ГПа, що робить його придатним для різання високоміцних композитних заготовок. На рис. 3 і 4 показано варіації отриманих реакцій щодо різних параметрів процесу та свердла. Результати

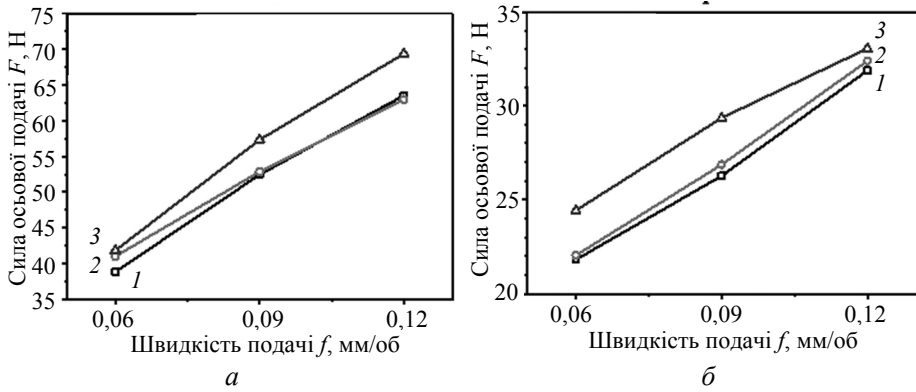


Рис. 3. Сила осьової подачі в залежності від різних технологічних параметрів та виду свердла: свічникове (а) і ступінчасте (б) свердло;  $v_p = 40$  (1), 80 (2), 120 (3) мм/хв.

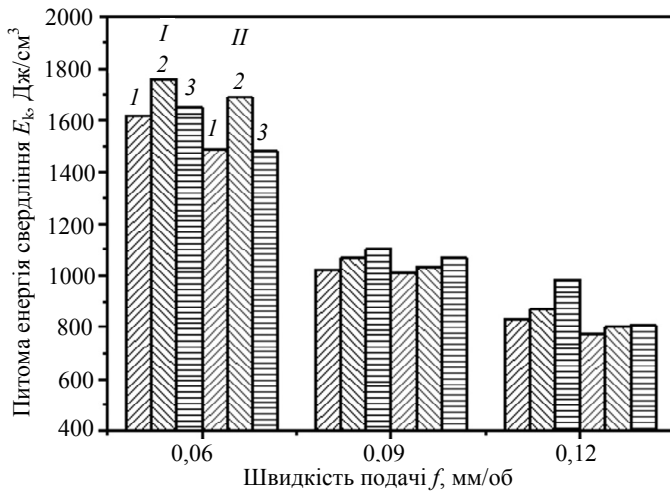


Рис. 4. Питома енергія свердління за різними параметрами процесу та виду свердла: свічникове (I) і ступінчасте (II) свердло;  $v_p = 40$  (1), 80 (2), 120 (3) мм/хв.

показують, що ступінчасте свердло створює менше осьове зусилля свердління, ніж свічникове свердло (див. рис. 3). Це явище означає більш низький опір різанню у разі видалення стружки композитного матеріалу для ступінчастого свердла під час обробки CFRP. Це пов'язано зі ступінчастою геометричною формою ступінчастого свердла, що дозволяє виконувати дві процедури, відповідальні за видалення стружки. Таким чином, контактна взаємодія між кромками інструменту та композитним матеріалом поділяється на два етапи, що мінімізує об'єм видалення матеріалу за один крок свердління і, отже, зменшує опір різанню, що виникає на поверхні заготовки. Крім того, оскільки сила осьового навантаження домінує у формуванні та поширенні розшарування, викликаного свердлінням, очікується, що ступінчасте свердло, як правило, має здатність сприяти меншому пошкодженню від розшарування, ніж свічникове. Крім того, встановлено, що як швидкість різання, так і швидкість подачі здійснюють позитивний вплив на розвиток осьового зусилля під час свердління. Збільшення обох параметрів процесу має тенденцію до підвищення сил осьового навантаження, незалежно від типу свердла, що використовували. Щодо збільшення сил осьового навантаження зі швидкістю різання

ня, то воно міцно пов'язане з посиленням контактної взаємодії між композитним матеріалом і кромками інструменту у разі збільшення швидкості різання. Зусилля свердління підвищується зі швидкістю подачі. Оскільки швидкість подачі пов'язана з глибиною різання в напрямку руху інструменту, то підвищена швидкість подачі приводить до збільшення об'єму стружки композитного матеріалу. Отже, це явище пов'язане з різким збільшенням опору різання, оскільки кромка ріжучого інструменту зі збільшенням швидкості подачі взаємодіє з великою кількістю стружки композита. Щоб зменшити зусилля свердління з метою стримати утворення розшарування, для свердління CFRP рекомендують менші швидкості різання та нижчі швидкості подачі, особливо в досліджуваному діапазоні параметрів. Нарешті, питому енергію свердління ( $E_k$ ) було розраховано для кількісної оцінки оброблюваності композита, що означає енергію різання, яку витрачає ріжучий інструмент для видалення одиниці об'єму матеріалів заготовки. Його можна виразити наступним рівнянням [25]:

$$E_k = \frac{T\omega}{MRR}1000, \quad (1)$$

де  $T$  – обертальний момент свердління, Н·м;  $\omega$  – швидкість обертання, рад/с;  $MRR$  – швидкість видалення матеріалу, мм<sup>3</sup>/с. Зауважимо, що  $T$  було розраховано як середнє значення сигналів обертального моменту свердління, які виникають в усталеному процесі буріння, тобто всі кромки свердла повністю задіяні в різанні композитів. Отримані результати  $E_k$  представлено на рис. 4 в залежності від різних параметрів процесу та свердла. Помітно, що ступінчасте свердло споживає менше питомої енергії різання, ніж свічникове, для всіх перевірених умов різання, що вказує на набагато кращу здатність до економії енергії під час операції свердління композита. Це пов'язано зі ступінчастою геометричною формою ступінчастого інструменту, яка мінімізує опір різанню для видалення стружки на ріжучу кромку і, отже, зменшує питоме споживання енергії під час свердління. Це явище також свідчить про те, що ступінчасте свердло має переваги в послабленні жорсткої контактної взаємодії з твердою поверхнею заготовки CFRP під час операції свердління. У більшості випадків збільшення швидкості різання має тенденцію до зниження  $E_k$ , особливо в умовах більш високих швидкостей подачі ( $f = 0,09$  і  $0,12$  мм/об.). На відміну від цього, швидкість подачі однозначно негативно впливає на питому енергію свердління, так що підвищена швидкість подачі має тенденцію до зниження  $E_k$  незалежно від свердла, що використовували, або швидкості різання, що змінюється.

### **Характеристика дефектів розшарування оброблених композитних виробів**

Розшарування є найбільш критичним недоліком оброблених волокнистих композитних виробів через його неусувний характер [26]. Оскільки високоміцний CFRP має надзвичайно високі фізико-механічні властивості (наприклад, високу (4900 МПа) міцність на розрив і високий (240 ГПа) модуль пружності), це, швидше за все, спричинить серйозні дефекти розшарування всередині оброблених композитних шарів через жорстку контактну взаємодію з ріжучим інструментом після операції видалення стружки. Незважаючи на те, що інструменти з алмазним покриттям показали можуть використовувати на етапі завершення свердління композитів завдяки їхнім високим твердості та теплопровідності, вони все ще, як і раніше, можуть викликати пошкодження у вигляді розшарування. Тому важливо охарактеризувати та кількісно визна-

чити стан розшарування оброблених високоміцних продуктів CFRP. На рис. 5 представлено морфологію розшарування після оброблення двома типами свердел на стороні вихідного отвору за різних умов свердління. Слід підкреслити, що обидва свердла з покриттям мають однаковий радіус заокруглення кромки та однакову ширину перехідної кромки. Зазначимо, що перший шар є останнім шаром волокна на стороні виходу вирізаного отвору в композиті, а шари з другого по шостий є внутрішніми шарами волокна всередині вирізаного композитного ламінату. Як показано на рис. 5, дефект відшарування може поширюватися і поширюватися між проміжними шарами. Це пов'язано з низькою міжшаровою міцністю на зсув між сусідніми шарами волокна композита CFRP. Таким чином, пошкодження, пов'язане з розтріскуванням, переважно розвивається серед проміжних шарів композитного ламінату. Більше того, таке явище також пов'язане з добре відомим режимом виштовхування, за якого сила свердління, що діє на вихідні шари волокна, прагне відокремити сусідні шари і, отже, спричинити міжшарове роз'єднання через зниження жорсткості шару. Крім того, морфологія розшарування характеризується

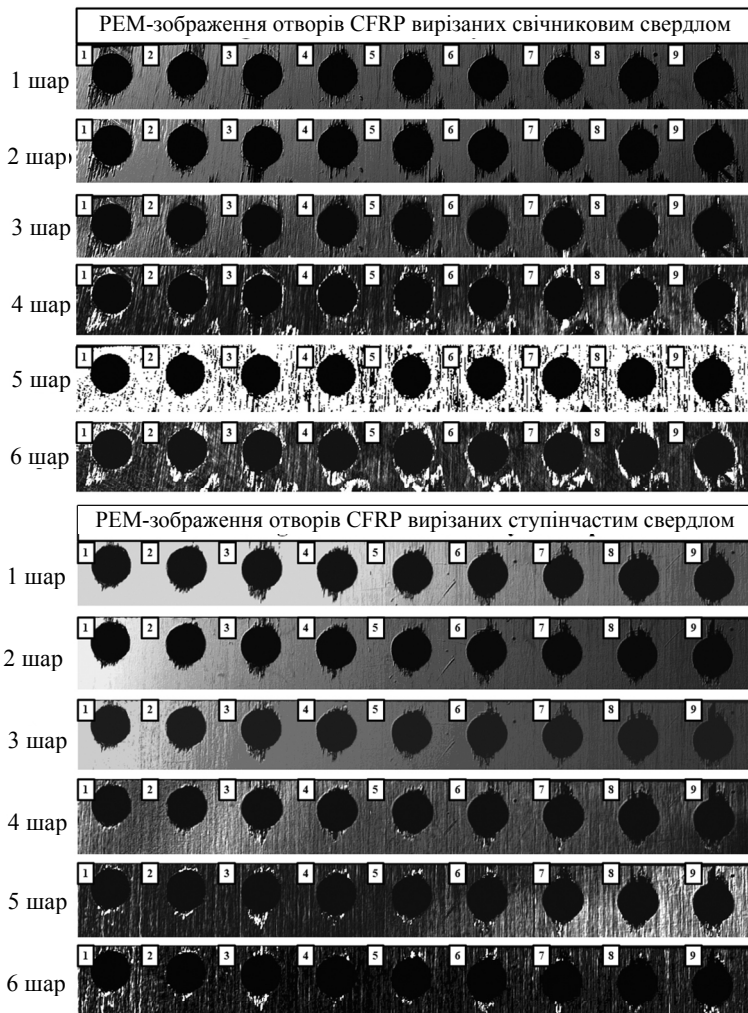


Рис. 5. PEM-зображення, що показують морфологію розшарування вирізаних отворів CFRP: 1–3 шар –  $v_p = 40$  м/хв,  $f = 0,06, 0,09, 0,12$  мм/об. відповідно; 4–6 шар –  $v_p = 80$  м/хв,  $f = 0,06, 0,09, 0,12$  мм/об. відповідно; 7–9 шар –  $v_p = 120$  м/хв,  $f = 0,06, 0,09, 0,12$  мм/об. відповідно.

розщепленням вуглецевих волокон по периферії отвору, незалежно від типу свердла, що використовували. Це відбувається через сильну видавлюючу взаємодію алмазного ріжучого інструменту з попередньо нарізаними волокнистими шарами, коли свердло має тенденцію просуватися вздовж напрямку подачі. Таким чином, сусідні шари волокон, які зазнають сильного стискання, будуть розколюватися через низьку міцність на зсув серед сусідніх композитних шарів. Більше того, отвори композита, вирізані ступінчастим свердлом, мають меншу площу відшаровування, ніж ті, що здійснюються свічковим свердлом. Крім того, на рис. 6 показано зміну коефіцієнтів розшарування, отриманого двома типами свердел у різних умовах свердління. Зрозуміло, що ступінчасте свердло в основному дає нижчі коефіцієнти розшарування, ніж свічкове для всіх перевірених параметрів. Це пов'язано з нижчою осьовою силою, що створюється ступінчастим свердлом через мінімізовану контактну взаємодію з твердим матеріалом заготовки з вуглепластика, що знижує створення сили свердління. Нарешті, збільшення швидкості різання або подачі призводить до підвищення коефіцієнта розшарування незалежно від типу свердла. Це пояснюється підвищеною контактною взаємодією між ріжучим інструментом і заготовкою композита CFRP, коли швидкість різання або подача зростають. Такі спостереження також добре узгоджуються з тенденціями зміни осьової сили в залежності від параметрів процесу. Це явище вказує на те, що нижчі швидкості різання і нижчі швидкості подачі сприяють придушенню розшарування, викликаного свердлінням, для високоміцних вуглепластиків, особливо в дослідженому діапазоні параметрів, а ступінчасте свердло сприяє меншому пошкодженню від розшарування, ніж свічкове.

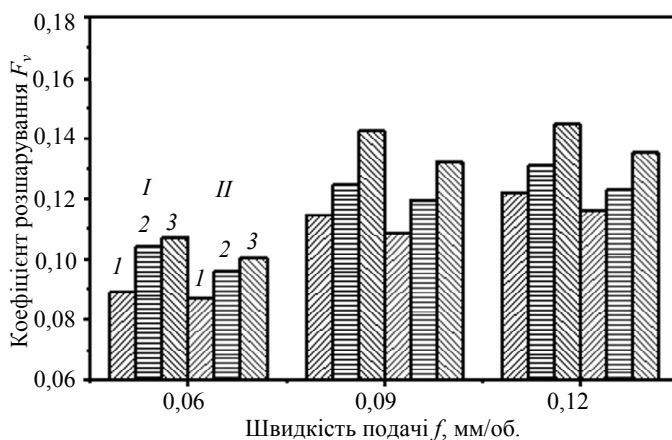


Рис. 6. Коефіцієнти розшарування вирізаних отворів композита залежно від різних режимів різання: свічкове (I) і ступінчасте (II) свердло;  $v_p = 40$  (1), 80 (2), 120 (3) мм/хв.

### Характеристика поверхневих шарів композитних виробів, що обробляються

Стан поверхневого шару оброблених композитних виробів за фіксованих умов різання ( $v_p = 120$  м/хв і  $f = 0,09$  мм/об.) було охарактеризовано за допомогою растрового електронного мікроскопа, а отримані результати наведено на рис. 7. Зазначимо, що оброблені поверхневі шари CFRP в основному складаються з тонко нарізаних волокон/епоксидних поверхонь і поверхневих порож-



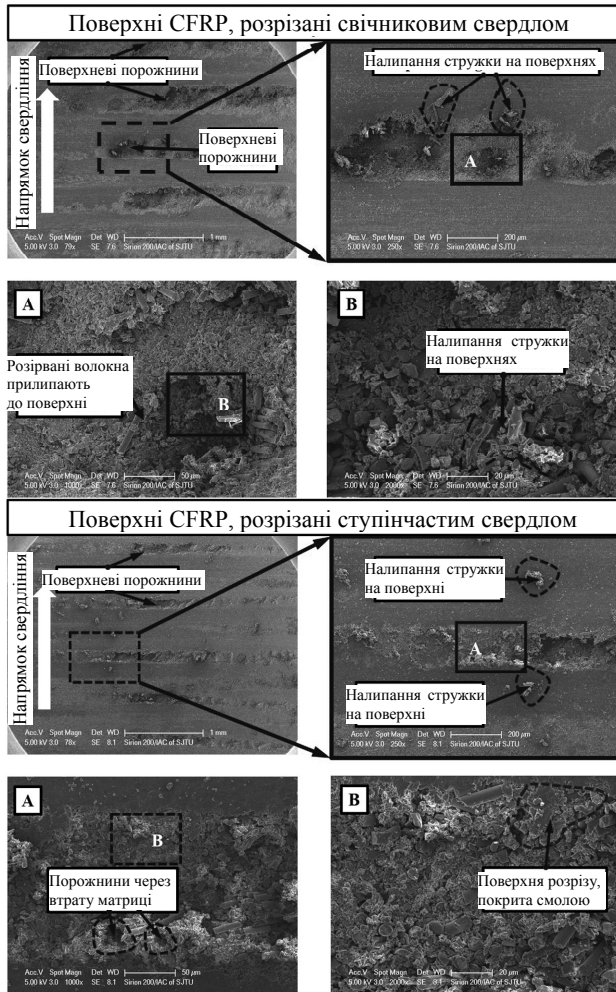


Рис. 7. Морфологія поверхні стінок вирізаних отворів композита ( $v_p = 120$  м/хв і  $f = 0,09$  мм/об.).

нин. Загалом, дрібно нарізані поверхні утворюються під час переднього різання, коли задіяні гострі кути різання волокон. Це пов'язано з руйнуванням, викликаним зсувом, що регулює процес створення отворів у композиті CFRP. Оскільки композит CFRP демонструє набагато нижчу ( $\sim 125$  МПа) міцність на зсув (див. табл. 2), стружку набагато легше відокремлювати у разі прямого різання, оскільки руйнування, викликане зсувом, домінує під час її видалення. Таким чином, ріжучий інструмент буде менше взаємодіяти з твердими матеріалами CFRP для відокремлення композитної стружки. Як наслідок, утворюються набагато кращі поверхні шари. Крім того, поверхні порожнини зазвичай стають дуже поширеними під час свердління CFRP, незалежно від типу використовуваного свердла. Вони є основним видом пошкодження композитних отворів CFRP, оброблених двома свердлами, які розташовані на погано зрізаних поверхнях через втрату епоксидної смоли. Деякі ознаки адгезії порошкоподібного матеріалу помітно на стінках композитних отворів, які є відокремленими композитними стружками, що виходять із границі інструмент-стружка під час операції свердління. Крім того, сильно пошкоджені зони в основному утворюються за протидії різанню, в яких розломи, викли-

кані вигином, домінують у відділенні стружки композитного матеріалу. Оскільки руйнування композитів під час згину визначається міцністю та модулем заготовки CFRP, виключно висока міцність та високий модуль волокнистих шарів в умовах протидії різанню значно ускладнюють розділення композитних матеріалів. Отже, під час обробки композитних шарів різальний інструмент стикається з набагато вищим опором різання, і, зрештою, утворюються композитні поверхні нижчої якості. Крім того, оскільки ступінчасте свердло тягне за собою розгортання стінок прорізаного отвору його другорядними ступінчастими кромками, воно дає набагато гладкіші і якісні поверхні стінок отвори з менш пошкодженою зоною, ніж свічкове свердло (див. рис. 7). Результати також свідчать про функціональність геометричної конструкції ступенів алмазного різального інструменту, що значно зменшує інтенсивну контактну взаємодію з твердим матеріалом CFRP заготовки під час операції свердління композита.

## ВИСНОВКИ

Експериментально досліджено властивості свердління високоміцних вуглецево-епоксидних композитних матеріалів за допомогою спеціального свердла з алмазним покриттям. Розглянуто характеристики алмазного інструменту під час свердління високоміцних композитів CFRP. Результати експерименту демонструють важливу роль геометрії інструменту у покращенні оброблюваності CFRP. Швидкість різання, як і швидкість подачі, позитивно впливають на зміну сил свердління, але негативно впливають на питому енергію свердління під час обробки CFRP. Незважаючи на використання надтвердих алмазних покриттів, композити CFRP все ще можуть викликати серйозні дефекти поверхні через їх надзвичайно високі фізико-механічні властивості.

Підтверджено, що під час обробки високоміцних CFRP ступінчасте свердло працює більш ефективно; зменшує дефекти відшарування та обробки, дає кращу якість поверхні, ніж свічкове свердло. Це явище пов'язане з ступінчастою геометричною формою, яка мінімізує суттєву контактну взаємодію з твердою композитною заготовкою CFRP під час процесу відділення стружки.

Використання низьких швидкостей різання та подачі сприяє зменшенню сил свердління та мінімізації дефектів відшарування для композитів CFRP.

## ФІНАНСУВАННЯ

Робота виконана за підтримки Національного фонду природничих наук Китаю (грант № 51705319).

Jinyang Xu, Linfeng Li, Tieyu Lin, Ming Chen  
State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration,  
School of Mechanical Engineering,  
Shanghai Jiao Tong University, P.R. China  
Evaluation of diamond-coated tools in drilling high-strength  
CFRP composites

*High-strength carbon fiber reinforced polymers (CFRPs) are advanced superhard engineering materials being extensively utilized in modern aerospace industries but show poor machinability. The present paper aims to address the performance of the diamond-coated special tools on the machining properties of high-strength CFRP composites. The studied CFRP specimen was a polymer-based multidirectional composite laminate fabricated by high-strength T700 carbon fibers and the FRD-YZR-03 epoxy resin. The diamond tool performance on the cutting of the high-strength CFRPs was carefully studied in terms of the workpiece*

responses, surface defects status, and cut product quality state. The results indicate that the tool geometries significantly affect the composite cutting responses, and the step drill outperforms the candlestick tool due to the step geometrical structure that minimizes the severe contact interaction with the hard CFRP composite workpiece during the chip separation process. The CFRP composite is likely to induce serious surface flaws because of its extremely high strength and modulus despite the use of diamond-coated tools. Moreover, well-designed geometrical modification of diamond tools can greatly improve the composite product surface quality.

**Keywords:** high-strength composites, diamond-coated tools, machinability behavior, delamination damage

1. Devin L.N., Grechuk A.I., Lupkin B.V. Drilling of composites using tools of polycrystalline superhard materials. *J. Superhard Mater.* 2018. Vol. 40, no. 1. P. 58–64.
2. Che D., Saxena I., Han P., Guo P., Ehmann K.F. Machining of carbon fiber reinforced plastics/polymers: a literature review. *J. Manuf. Sci. Eng.–Trans. ASME.* 2014. Vol. 136, no. 3. P. 034001.
3. Aamir M., Tolouei-Rad M., Giasin K., Nosrati A. Recent advances in drilling of carbon fiber-reinforced polymers for aerospace applications: a review. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2019. Vol. 105, no. 5. P. 2289–2308.
4. Xu, J., Li, C., Chen, M., El Mansori, M. and Ren, F., An investigation of drilling high-strength CFRP composites using specialized drills. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2019. Vol. 103, no. 9–12. P. 3425–3442.
5. Xu J., Huang X., Chen M., Paulo Davim J. Drilling characteristics of carbon/epoxy and carbon/polyimide composites. *Mater. Manuf. Process.* 2020. Vol. 35, no. 15. P. 1732–1740.
6. Abrão A.M., Faria P.E., Rubio J.C.C., Reis P., Davim J.P. Drilling of fiber reinforced plastics: A review. *J. Mater. Process. Technol.* 2007. Vol. 186, no. 1–3. P. 1–7.
7. Davim J.P. Machining composite materials. Wiley-ISTE, 2009.
8. Liu D., Tang Y., Cong W.L. A review of mechanical drilling for composite laminates. *Compos. Struct.* 2012. Vol. 94, no. 4. P. 1265–1279.
9. Xu J., Li C., Mi S., An Q., Chen M. Study of drilling-induced defects for CFRP composites using new criteria. *Compos. Struct.* 2018. Vol. 201. P. 1076–1087.
10. Davim J.P., Rubio J.C., Abrao A.M. A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates. *Compos. Sci. Technol.* 2007. Vol. 67, no. 9. P. 1939–1945.
11. Davim, J.P. and Reis, P., Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave-experimental and statistical study. *Mater. Des.* 2003. Vol. 24, no. 5. P. 315–324.
12. Hrechuk A., Bushlyya V., Ståhl J.-E. Hole-quality evaluation in drilling fiber-reinforced composites. *Compos. Struct.* 2018. Vol. 204. P. 378–387.
13. Kannan S., Pervaiz S. Surface morphology of inclined CFRP holes when machined under cryogenic environment. *Mater. Manuf. Process.* 2020. Vol. 35, no. 11. P. 1228–1239.
14. Davim J.P., Reis P. Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using design experiments. *Compos. Struct.* 2003. Vol. 59, no. 4. P. 481–487.
15. Ameer M.F., Habak M., Kenane M., Aouici H., Cheikh M. Machinability analysis of dry drilling of carbon/epoxy composites: cases of exit delamination and cylindricity error. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2017. Vol. 88, no. 9. P. 2557–2571.
16. Xu J., An Q., Chen M. An experimental investigation on cutting-induced damage when drilling high-strength T800S/250F carbon fiber-reinforced polymer. *Proc. Inst. Mech. Eng. Pt. B - J. Eng. Manuf.* 2017. Vol. 231, no. 11. P. 1931–1940.
17. Faraz A., Biermann D., Weinert K. Cutting edge rounding: an innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2009. Vol. 49, no. 15. P. 1185–1196.
18. Wang X., Kwon P.Y., Sturtevant C., Kim D., Lantrip J. Tool wear of coated drills in drilling CFRP. *J. Manuf. Process.* 2013. Vol. 15, no. 1. P. 127–135.
19. Çelik A., Lazoglu I., Kara A., Kara F. Wear on SiAlON ceramic tools in drilling of aerospace grade CFRP composites. *Wear.* 2015. Vol. 338. P. 11–21.
20. Hocheng H., Tsao C.C. Effects of special drill bits on drilling-induced delamination of composite materials. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2006. Vol. 46, no. 12–13. P. 1403–1416.
21. Durão L.M.P., Gonçalves D.J.S., Tavares J.M.R.S., de Albuquerque V.H.C., Aguiar Vieira A., Torres Marques A. Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates. *Compos. Struct.* 2010. Vol. 92, no. 7. P. 1545–1550.

22. Heisel U., Pfeifroth T. Influence of point angle on drill hole quality and machining forces when drilling CFRP. *Procedia CIRP*. 2012. Vol. 1. P. 471–476.
23. Grilo T.J., Paulo R.M.F., Silva C.R.M., Davim J.P. Experimental delamination analyses of CFRPs using different drill geometries. *Compos. Pt. B: Eng.* 2013. Vol. 45, no. 1. P. 1344–1350.
24. Feito N., Díaz-Álvarez J., López-Puente J., Miguelez M. Experimental and numerical analysis of step drill bit performance when drilling woven CFRPs. *Compos. Struct.* 2018, Vol. 184. P. 1147–1155.
25. Meena A., El Mansori M. Specific cutting force, tool wear and chip morphology characteristics during dry drilling of austempered ductile iron (ADI). *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2013. Vol. 69, no. 9–12. P. 2833–2841.
26. Geng D., Liu Y., Shao Z., Lu Z., Cai J., Li X., Jiang X., Zhang D. Delamination formation, evaluation and suppression during drilling of composite laminates: A review. *Compos. Struct.* 2019. Vol. 216. P. 168–186.

Надійшла до редакції 17.04.21

Після доопрацювання 02.08.21

Прийнята до опублікування 03.08.21