

УДК 621.95.04

Пасічник В.А., д.т.н., проф., Черказний В.Ю.  
НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

## СИСТЕМАТИЗАЦІЯ ТА АНАЛІЗ МЕТОДІВ МЕХАНІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ ОТВОРІВ В КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛАХ

Pasichnyk V., Cherkaznii V.  
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine (mmi@kpi.ua)

### SYSTEMATIZATION AND ANALYSIS OF METHODS FOR MACHINING HOLES IN COMPOSITES

*В роботі представлено аналіз літературних джерел щодо механічних методів оброблення отворів в композиційних матеріалах. В результаті аналізу встановлено переваги та недоліки кожного з методів, розроблена система оцінювання методів за параметрами якості, продуктивності й економічності та параметрів технологічних властивостей, яка дозволяє обрати найкращий метод для певної ситуації виходячи з встановлених пріоритетів. В більшості випадків встановлено, що найбільш продуктивними та якісними методами є метод «орбітального» свердління та метод похилого планетарного свердління.*

*Ключові слова:* композиційні матеріали; механічне оброблення отворів; свердління; «орбітальне» свердління; похиле планетарне свердління; система оцінювання.

#### Вступ

В авіаційній та автомобілебудівній галузях з кожним роком зростає ступінь використання композиційних матеріалів, зокрема вуглепластиків та підвищуються вимоги до параметрів якості й продуктивності механічного оброблення. Особливо гостро стоїть питання про оброблення отворів в таких деталях. Це зумовлено великою кількістю отворів, суттєвим впливом на якість та експлуатаційні характеристики з'єднань, а також часто обмеженнями доступу до них. Існує велика кількість технічних рішень щодо забезпечення параметрів якості оброблюваних отворів і їхня кількість постійно зростає. В роботі [1] показано, що поряд з такими методами оброблення отворів, як лазерне, електричне або гідроабразивне, найбільш перспективні має саме спосіб механічного оброблення, як такий, що висуває найменше обмежень на можливість його застосування й має найкращі економічні показники. Інтенсивний розвиток й удосконалення методів оброблення отворів у композиційних матеріалах вимагає удосконалення їх систематизації [2, табл. 7.1]. Тому існує нагальна потреба в критичному аналізі та систематизації новітніх технічних рішень, що реалізують процес механічного оброблення отворів у композиційних матеріалах.

**Метою роботи** є систематизація та аналіз методів механічного оброблення отворів в композиційних матеріалах.

#### Основна частина

Всі методи механічного оброблення отворів у композиційних матеріалах можна поділити на дві групи: методи свердління, що передбачають наявність двох узгоджених рухів інструменту – обертання навколо осі та подачі вздовж осі оброблюваного отвору з можливим додаванням нестабільності і їхні значення; методи на основі, так званого, «орбітального свердління», які передбачають додаткові кругові й кутові подачі для покращення перебігу процесу оброблення отвору.

#### Методи свердління

Операція свердління є однією з найбільш поширених при обробленні отворів в композиційних матеріалах. Суттєвими перевагами методу є простота реалізації, широкий діапазон діаметрів, незначні обмеження щодо можливості застосування в якості ручного або автоматизованого методу та умов доступу. В той же час даному методу властиві такі недоліки, як розшарування матеріалу, наявність нерозрізаних волокон, викришування, невисока точність оброблених отворів. Як вказує [3], головною причиною розшарування є велика осьова сила, причиною якої є перемичка свердла. Так на вході свердла (рис. 1,а) перемичка «розтискує» матеріал, а різальні кромки «підхоплюють» його й «витагують» назовні. При виході перемичка не ріже, а відтискає нижні шари, утворюючи тим самим дуже небезпечне відділення шарів (рис. 1,б).

Можливими шляхами зниження негативного впливу процесу свердління на розшарування композиційних матеріалів можуть бути: удосконалення геометрії інструменту, удосконалення процесу без зміни його суті та удосконалення оснастки для реалізації.

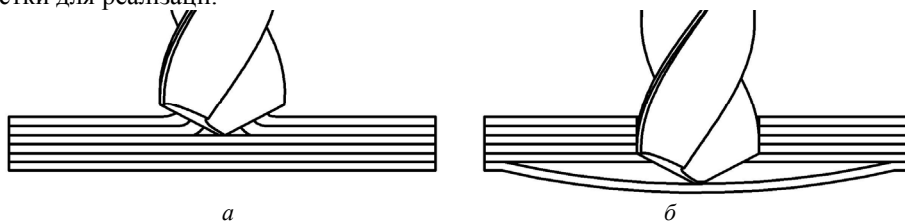


Рис. 1. Схеми виникнення розшарування на вході (а) та виході (б) свердла [3]

**Удосконалення геометрії інструменту свердла.** В першу чергу зниження негативного впливу процесу свердління на розшарування композиційних матеріалів здійснюється за рахунок удосконалення геометрії свердла [4]. Найпростішим варіантом удосконалення є зміна кутів, застосування різних варіантів підточувань поперечної кромки, збільшення кількості різальних кромки. Все це за оцінками розробників позитивно впливає на зниження ймовірності розшарування за рахунок зменшення осьової сили та на підвищення точності й продуктивності процесу за рахунок покращення центрування інструменту, зменшення температури в зоні різання тощо.

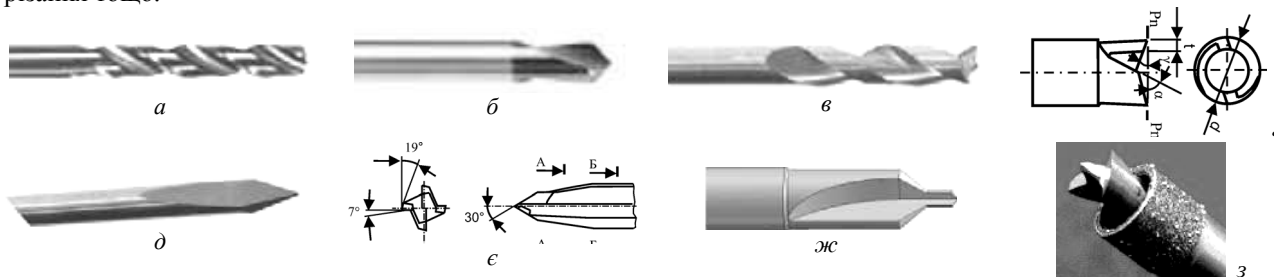


Рис. 2. Еволюція геометрії свердел для оброблення композиційних матеріалів:

- а – спіральне свердло з кутом при вершині  $120^\circ$ ; б – свердло підвищеної жорсткості з кутом при вершині  $85^\circ$ ;  
в – свердло з центрувальною частиною та кутом при вершині понад  $180^\circ$ ; г – корончатє свердло;  
д – «кинджальне» свердло; е – комбіноване свердло-розвертка; ж – ступінчастє свердло;  
з – комбінація свердла з абразивним кільцем

Так зменшення кута при вершині до  $85^\circ$  та підточування перемички (рис. 2,б) зменшує значення осьової сили. Застосування свердел з центрувальною частиною та кутом при вершині понад  $180^\circ$  (рис. 2,в) дозволяє покращити центрування, знизити ймовірність появи нерозрізаних волокон. Корончатє свердло (рис. 2,г) [5] є варіантом розвитку геометрії інструменту, коли поперечна кромка взагалі відсутня. Такий інструмент забезпечує кращі показники щодо ймовірності появи розшарування, проте має нижчі показники точності оброблення та, особливо, центрування. Застосування «кинджальних» свердел (рис. 2,д) з кутом при вершині до  $30^\circ$  дозволяє зменшити осьову силу проте вимагає наявності достатнього простору під вихід свердла. Ще одним напрямком удосконалення геометрії є комбінація свердла з розверткою (рис. 2,е) [6]. Цей напрямок по суті є розвитком ідеї «кинджального» свердла в якому, за оцінкою авторів, за рахунок розвитку й удосконалення геометрії вдається досягти високої якості оброблюваних отворів. Проте, так само як і для «кинджального» свердла даний інструмент висуває суттєві обмеження щодо наявності вільного простору під вихід інструменту. Ефективним напрямком удосконалення геометрії, що позитивно впливає на якість та точність оброблюваного отвору є використання ступінчастих свердел (рис. 2,ж). Суть використання даної конструкції інструменту пояснюється тим що, при обробці матеріалу первинна різальна кромка (конструкція звичайного спірального свердла) утворює отвір меншого діаметру, викликаючи розшарування та інші дефекти викликані особливостями такої конструкції інструменту (через розклинаючу дію перемички та концентрацію сил у зоні перемички). Наступним етапом в роботу входить вторинна ступінь яка прибирає локальні дефекти розшарування, вириви та доводить розмір отвору до потрібного. Перевага у тому що вторинна кромка менше навантажує матеріал, оскільки сила різання розподілена по колу, а її функція лише остаточне оброблення отвору. Існують різні варіанти комбінації різальних частин та, зокрема, можлива комбінація з абразивним інструментом (рис. 2,з) [7].

**Удосконалення процесу свердління.** Змінюються такі параметри процесу, як подача та частота обертання зі стаціонарних до таких, що змінюються за спеціальними законами. Так в роботі [8] пропонується застосування адаптивного керування величиною подачі на виході свердла. За допомогою нейронного контролера через кожні три оберти шпинделя вимірювалося значення осьової сили. Осьова сила не повинна перевищувати значення міжшарової міцності композиту. У разі необхідності величина подачі зменшувалася.

Зазначимо, що керування подачею при обробленні композитів позитивно впливає на уникнення розшарування, а застосування такого підходу до оброблення пакетів «метал-композит» дозволяє підвищити й ефективність процесу. Ще одним напрямком підвищення якості оброблюваних отворів є застосування «реверсивного» свердління [9], при якому напрям обертання шпинделя змінюється циклічно, а різання забезпечується за рахунок зміни геометрії інструменту.

Вказують на покращення перебігу процесу застосування переривчастого свердління [10] або накладання низькочастотних коливань [11]. До удосконалення процесу свердління можна віднести метод ультразвукового свердління, суть якого полягає у накладанні на основну подачу або обертання ультразвукових коливань, наприклад [12]. Процес виконується на спеціалізованому обладнанні. Верстати для ультразвукової прошивки отворів дозволяють виконувати отвори різної форми без створення внутрішніх напружень у матеріалі. Це дозволяє проводити свердління отворів, розташованих дуже близько до краю заготовки або виконувати багато поруч розташованих отворів без небезпеки розколювання/розшарування композиційного матеріалу через внутрішні напруження. Ефект дії ультразвукових коливань на процес різання залежить від амплітуди і частоти коливань, відношення коливальної швидкості інструменту і швидкості переміщення інструмента щодо заготовки, величини перетину зрізаного шару, фізико-механічних та теплофізичних властивостей матеріалу інструмента і заготовки.

**Удосконалення оснастки для свердління.** Напрямок передбачає введення додаткових елементів, які у тій чи іншій спосіб знижують ймовірність появи тріщин, сколів або розшарування.

В роботі [13] досліджувався механізм розшарування в листових композитах з підтримкою (опорною втулкою) і без підтримки (рис. 3). Вплив опорної втулки зводиться до механічного зміцнення нижніх шарів композиту. Експерименти показали, що уникнути в цьому разі розшарування на виході свердла виявилось неможливим. Встановлено, що механізм розшарування на виході свердла без підтримки є більш складним, ніж з підтримкою. Свердло відчуває різке пружне розвантаження в міру виходу сердцевини свердла з заготовки. При цьому заготовка різко подається на свердло, викликаючи розшарування.

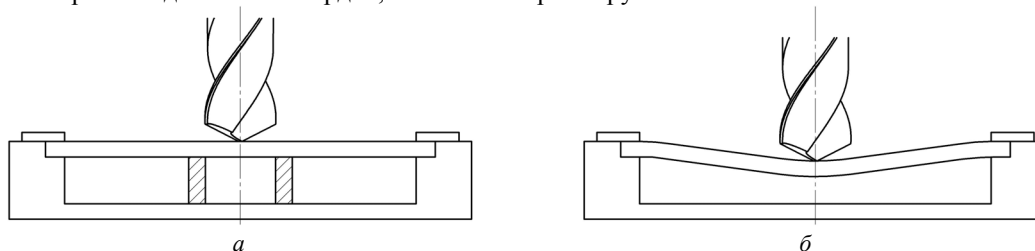


Рис. 3. Свердління з використанням підтримки (а) та без підтримки (б) [13]

Ще один вихід для усунення пошкоджень при обробці – нанесення на ділянки поверхні в місці свердління тонкого шару (0,3...0,5 мм) додаткового технологічного покриття, що зміцнює кромку отвору в основному матеріалі при врізанні інструменту, попереджує її руйнування та утворення бахроми [14] (рис. 4,а). Подібний ефект досягається також при використанні притискної втулки типу кондукторної, гострі краї якої з певним зусиллям (10...15 Н) заглиблюються в оброблюваний матеріал приблизно на 0,5мм і створюють стисні напруження в зовнішніх шарах матеріалу при врізанні свердла [14] (рис. 4,б).

Недолік останніх двох методів полягає в тому, що розшарування та утворення бахроми при виході інструменту не усувається, крім того, технологічне покриття, це не тільки витрати на матеріал самого покриття, а й суттєві витрати часу на його нанесення та видалення, що негативно впливає на економічність процесу.

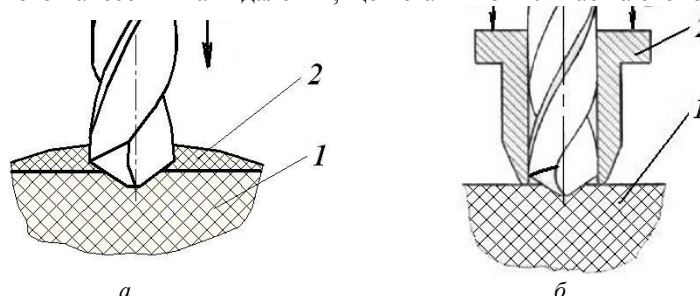


Рис. 4. Варіанти застосування притискних елементів зверху [14]:

а – нанесення технологічного покриття; б – застосування притискної втулки;  
1 – композиційний матеріал, що оброблюється, 2 – технологічне покриття (а), притискна втулка (б)

#### Розвиток методів спірального фрезерування («орбітального» свердління)

В кінці 1980-х років, шведський професор Інґвар Ерікссон (Ingvar Eriksson) отримав запит від Saab Aerotech в Лінчепінґу (Linköping), Швеція [15]. Завдання полягає в тому, щоб просвердлити отвір без

розширення в композиційних матеріалах. Лейф Закріссон (Leif Zakrisson), Інґвар Ерікссон (Ingvar Eriksson) та Ян Беклунд (Jan Bäcklund) виступили з ідеєю використання інструменту меншого діаметру, ніж отвір, що необхідно обробити. По-перше, отримується охолодження процесу обробки, завдяки повітряним зазором. Це означає, що охолоджуюча рідина не потрібна. По-друге, осьова сила складає лише десять відсотків того, що необхідно для звичайного свердління. В результаті збільшується термін служби інструменту, підвищення безпеки процесу і підвищення продуктивності.

«Орбітальне» свердління насправді є спіральним фрезеруванням, де інструмент одночасно обертається навколо своєї осі й одночасно обертається навколо вісі отвору, і в той час отримує осьове переміщення (рис. 5). Цей процес має декілька відмінностей від звичайного свердління, що дозволяє використовувати його при обробленні отворів в композиційних матеріалах [16]:

- зменшення осьової сили різання, внаслідок чого зменшується ефект розширення;
- поліпшене відведення стружки;
- можливість оброблення одним інструментом отворів різного діаметра;
- зменшення температури нагріву інструменту (внаслідок того, що ріжучим є не весь діаметр, а лише деякий сектор).

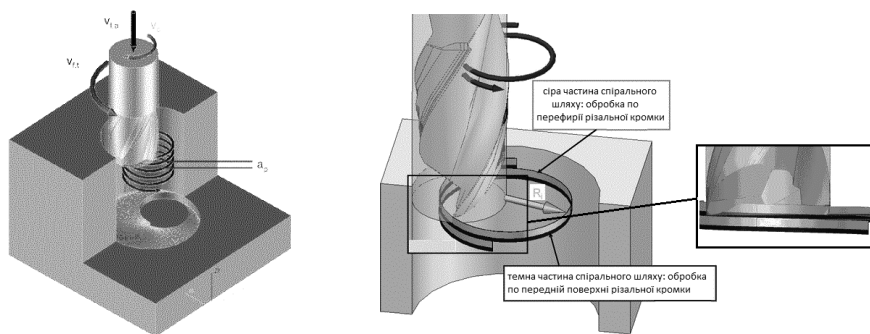


Рис. 5. Схема орбітального свердління [16]

Розвитком методу «орбітального свердління» є удосконалення можливих схем руху інструменту (рис. 6,а), що дозволяє обробляти різні ділянки й зони отвору з різними режимами, а також забезпечує зняття чорнового й чистового припуску з різними режимами та різним напрямком осьової подачі [17]. Інший варіант [18] забезпечує оброблення спочатку конічного (рис. 6,б) або ступінчастого (рис. 6,в) отвору як чорнового й остаточне його оброблення з силами різання, що спрямовані всередину пакету.

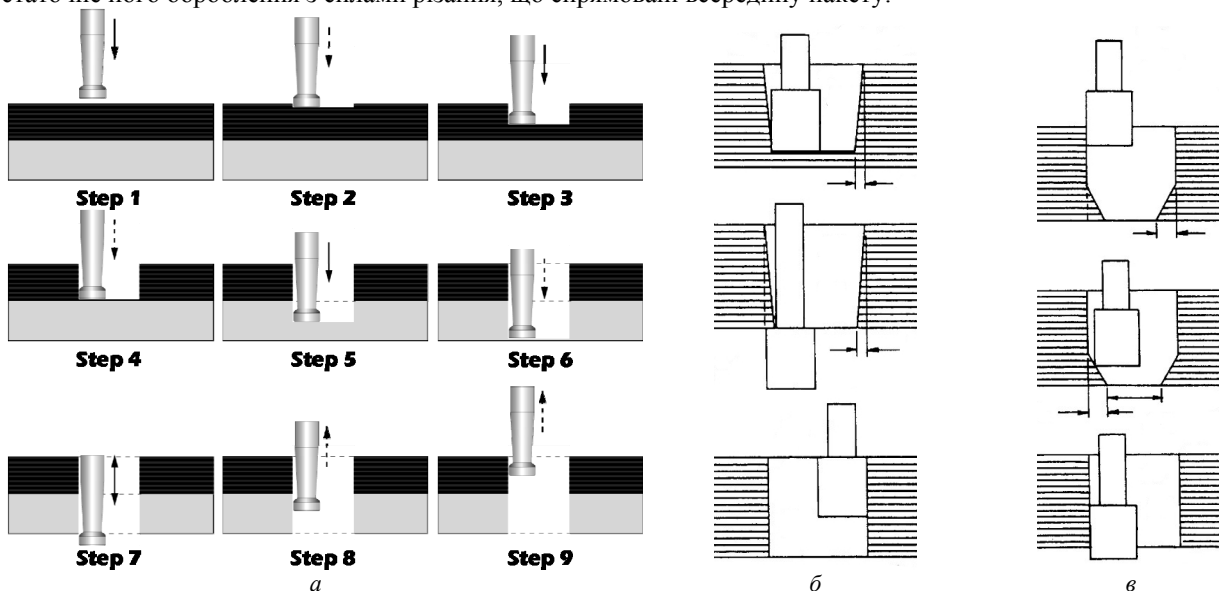


Рис. 6. Варіанти руху інструменту, що реалізує процес «орбітального свердління»:

- а – удосконалення схем для пакетів «метал-композит» [17]; чорновий перехід оброблення конічного (б) або ступінчастого (в) отвору та чистове оброблення циліндричного [18]

1. Не можна уникнути обробки центром ріжучого інструменту, де швидкість різання дорівнює нулю.
  2. Вібрації, які виникають внаслідок «орбітального» руху різального інструменту.
- Подальшим розвитком «орбітального» свердління стало «похиле планетарне свердління» [20].

На рис. 7 показано рухи, які здійснюються при похилому планетарному свердлінні. Нахилене планетарне свердління має дві осі. У випадку «орбітального» свердління, вісь ріжучого інструменту паралельна осі обертання та зміщена на величину ексцентриситету. У випадку розробленого методу, ексцентриситет реалізується шляхом нахилу осі шпинделя інструменту. Таким чином, інерційне коливання обертання інструменту знижується, тому що кут нахилу механізму менше ексцентриситету кінчика ріжучого інструменту. Ще одною перевагою похилого планетарного свердління є те, що центр різального інструменту, який має нульову швидкість різання, не має контакту з оброблюваним матеріалом [20].

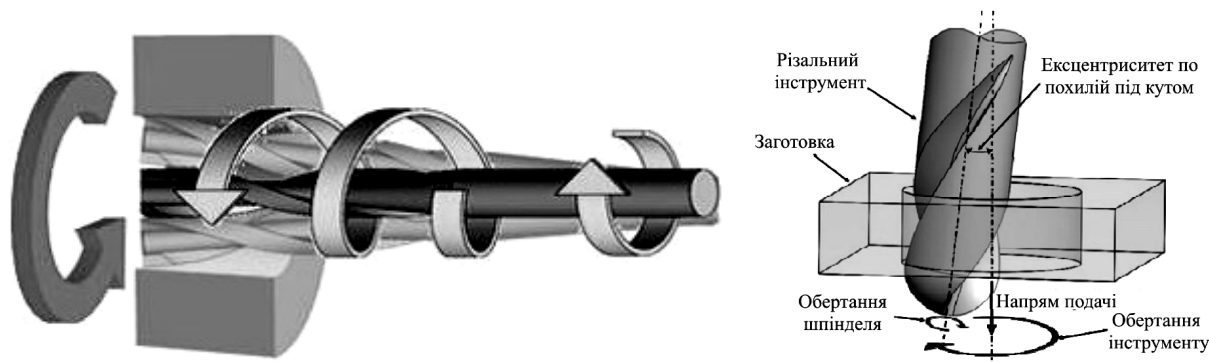


Рис. 7. Схема процесу похилого планетарного свердління [19, 20]

Іншою неминучою проблемою «орбітального» свердління є відшарування та задирки на виході просвердлених отворів. Так при обробленні методом «орбітального» свердління зовнішній передній край є першою точкою проникнення інструменту в тіло заготовки, при цьому знімається тонкий шар матеріалу, що і викликає розшарування і задирки на краю (рис. 8,а). З іншого боку, в разі похилого планетарного свердління, першою в тіло деталі проникає не «зовнішня», а «внутрішня» різальна кромка (рис. 8,б). При появі задирок, вони зрізаються «зовнішньою» різальною кромкою. Крім того, використання даного методу може зменшити сили різання і механічну вібрацію [21].

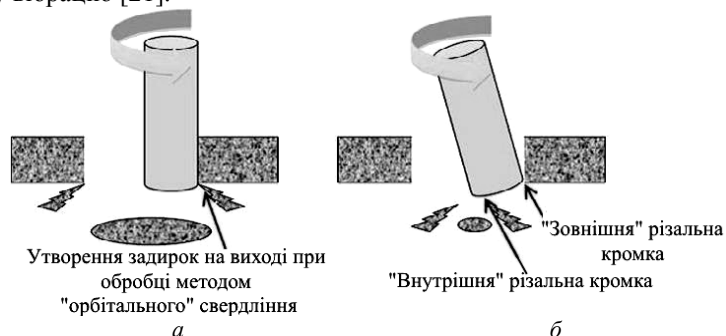


Рис. 8. Порівняння утворень задирок при орбітальному (а) та похилому планетарному (б) свердлінні [21]

#### Порівняльний аналіз переваг та недоліків різних схем оброблення

На основі наведеної вище інформації з першоджерел, а також використовуючи дані з [2] наведемо варіант якісного порівняння варіантів механічного оброблення отворів у композиційних матеріалах. Для цього введемо систему показників, розділивши їх на три групи: 1 – група параметрів якості; 2 – група параметрів продуктивності й економічності; 3 – група параметрів технологічних можливостей. До першої групи слід віднести показники, які визначають, в першу чергу, геометричну точність отвору та відсутність дефектів оброблення (розшарування, задирок, нерозрізаних волокон). До цієї групи також слід включити можливу температуру в зоні різання, адже вона може стати обмежуючим фактором, призвести до оплавлення або деструкції матеріалу. До другої групи слід віднести продуктивність процесу з урахуванням всіх складових часу на реалізацію процесу оброблення, в т.ч. підготовчих та завершальних дій, пристосованість до автоматизації з використанням роботів або маніпуляторів, адже неможливість їх використання суттєво обмежить продуктивність процесу, а також додаткові витрати на обладнання, оснащення та інструмент, які можуть суттєво знизити економічність застосування даного методу. Зазначимо, що групи параметрів 1 і 2 є обов'язковими при проведенні аналізу, причому в різних випадках вони можуть мати однаковий або різний пріоритет. До третьої групи показників віднесемо можливість оброблювати отвори різних розмірів, адже це не тільки зменшує набір використовуваного інструменту, а й знижує час на переналадження, можливість створення мобільних або ручних пристроїв, адже деякі технології потребують тільки стаціонарного обладнання, врахування обмежень щодо доступу, що може стати критичним при обробленні отворів, що не мають достатнього місця для виведення інструменту або для підведення габаритної головки до позиції отвору. Ця

група показників по відношенню до двох перших має дещо вторинну, обмежувальну функцію. На нашу думку, її значущість не може перевищувати значущість першої та другої груп.

Далі кожен показник групи оцінимо системою «добре – задовільно – незадовільно». «Добре» – означає найкраще значення з можливих або позитивний вплив в комбінації з іншими методами; «задовільно» – означає в цілому прийнятне, проте не найкраще рішення або відсутність позитивного впливу в комбінації з іншими рішеннями; «незадовільно» – означає найгірший варіант з можливих, або неможливість досягнення показника, або погіршення впливу в комбінації з іншими. Перелік параметрів із тлумаченням відповідного рівня оцінювання наведено у табл. 1.

Таблиця 1

<b>Параметри оцінювання способів механічного оброблення отворів у композиційних матеріалах</b>				
<b>№</b>	<b>Параметр оцінювання</b>	<b>(D) Добре</b>	<b>(Z) Задовільно</b>	<b>(N) Незадовільно</b>
<b>1</b>	<b>Група параметрів якості</b>			
<b>1.1</b>	Точність оброблених отворів	Висока	Середня	Низька
<b>1.2</b>	Ймовірність появи розшарування матеріалу, нерозрізаних волокон, викришування матеріалу	Мала	Середня	Висока
<b>1.3</b>	Температура в зоні різання	Нормальна	Підвищена	Висока
<b>2</b>	<b>Група параметрів продуктивності та економічності</b>			
<b>2.1</b>	Продуктивність	Висока	Середня	Низька
<b>2.2</b>	Прийнятність до автоматизації	Без обмежень	Із обмеженнями	Не можливе
<b>2.3</b>	Витрати на інструмент і обладнання	Мінімальні	Середні	Максимальні
<b>3</b>	<b>Група параметрів технологічних можливостей</b>			
<b>3.1</b>	Діапазон оброблюваних отворів	Широкий	Незначна зміна	Незмінний
<b>3.2</b>	Мобільність (відсутність вимог до стаціонарного обладнання та пристосованість до ручного оброблення)	Висока (без обмежень)	Можлива за умови додаткового оснащення (Із обмеженнями)	Тільки стаціонарне обладнання (ручне оброблення не можливе)
<b>3.3</b>	Обмеження щодо доступу	Майже немає	Із обмеженнями	Критично велика кількість обмежень

Таблиця 2

**Оцінка напрямків, варіантів та особливостей удосконалення базових процесів механічного оброблення отворів у композиційних матеріалах**

<b>Напрямки, варіанти та особливості удосконалення</b>			<b>Оцінка за показниками табл. 1</b>								
			<b>1.1</b>	<b>1.2</b>	<b>1.3</b>	<b>2.1</b>	<b>2.2</b>	<b>2.3</b>	<b>3.1</b>	<b>3.2</b>	<b>3.2</b>
Удосконалення геометрії різальної кромки	Зміна форми різальних та поперечної кромки або ліквідація останньої		Z	N	N	D	D	D	N	D	D
	Використання ступінчастих та комбінованих свердел		D	Z	Z	Z	D	Z	N	D	D
Удосконалення процесу	Зміна закону управління	Подачі	Z	Z	Z	Z	Z	Z	N	Z	D
		Обертання	Z	Z	Z	Z	Z	Z	N	Z	D
	Накладання додаткових коливачів	Низькочастотних	Z	Z	D	Z	Z	Z	N	Z	Z
		Високочастотних (ультразвукових)	Z	Z	D	D	N	N	Z	N	N
Удосконалення оснастки	Технологічні покриття		Z	Z	N	N	Z	Z	Z	D	Z
	Підпори (напрямні втулки)	Зверху	Z	Z	N	Z	Z	Z	N	D	D
		Знизу	Z	D	N	Z	Z	Z	N	N	N
Спіральне фрезерування (орбітальне свердління)	Без нахилу осі інструменту	З простим рухом осьової подачі	Z	Z	D	D	D	N	D	Z	Z
		Зі складним рухом осьової подачі	Z	D	D	Z	D	N	D	Z	Z
	З нахилом осі інструменту		Z	D	D	D	D	N	D	Z	Z

Тепер усі напрямки удосконалення оброблення отворів та представленням їхніх переваг і недоліків відповідно до запропонованої системи (табл. 1) зведемо до табл. 2. Зазначимо, що оцінки методів носять

експертний характер, відмінності між рівнями не є рівномірними, в деяких випадках два гарні варіанти оцінювались як «добре» для найкращого з них і як «задовільно» для того, який лише трохи поступається першому.

Стосовно інтегральної оцінки рішення, то вона суттєво залежить від задач, що ставляться. Так групи параметрів (табл. 1) можуть мати різну цінність для користувача, так саме різну цінність можуть мати самі показники в межах групи. Для експрес-оцінювання варіантів рішень у Microsoft Excel створена система, яка дозволяє користувачеві на початковому етапі (лист «Початок») визначити цінність груп параметрів в системі значущості: 0 – абсолютно не має значення — 5 – надзвичайно важливо. Далі (лист «Перерахунок») здійснюється автоматичний перерахунок значень вагових коефіцієнтів всіх параметрів оцінювання. На останньому етапі (лист «Результат») здійснюється автоматичний перерахунок рейтингу кожного напрямку удосконалення, який представляється числом, де значенню «1» відповідає один чи кілька найкращих варіантів. Автоматично будується діаграма. Залежно від обраного пріоритету показників, рекомендовані варіанти можуть різнитися. На рис. 9 наведені результати розрахунків для значення оцінок  $D=2$ ,  $Z=1$ ,  $N=0$ .

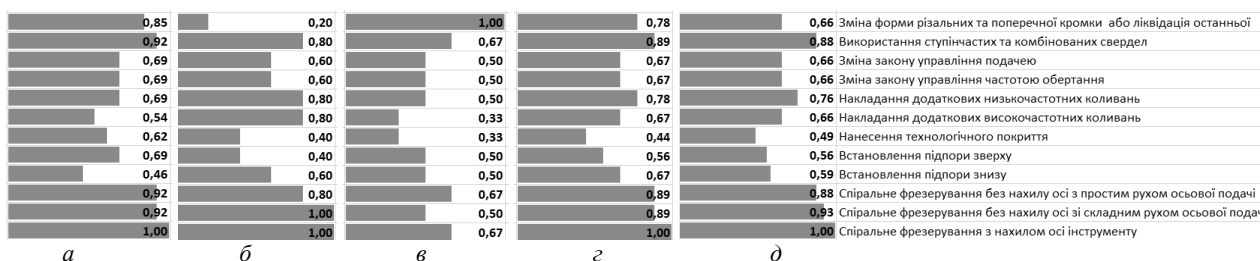


Рис. 9. Оцінка перспективності різних варіантів для умов:

а – рівної цінності трьох груп; б – цінності лише групи якості; в – цінності лише групи показників продуктивності та економічності; г – рівної цінності груп якості та економічності та нульовій цінності групи показників технологічних можливостей; д – співвідношення «якість – економічність – можливості» = «5–3–1»

Як видно з рисунків, що рекомендовані результати можуть доволі сильно різнитися. Так варіант зміни форми різальних та поперечних кромки є найкращим для пріоритету економічності та продуктивності процесу, проте він програє для випадку пріоритету якості оброблення. Можна також звернути увагу на суттєві перспективи методів спірального фрезерування, які у більшості випадків є лідерами.

### Висновки

Під час механічного оброблення отворів, через шарувату структуру композитів та їх властивостей, виникають багато дефектів обробки, таких як деструкція, нерозрізані волокна та пластик, які можуть бути ліквідовані наступною чистою обробкою, такою як розвертування, обробкою абразивним інструментом, але існують такі дефекти, наприклад розшарування, які в подальшому ліквідувати неможливо. Для зменшення та ліквідації даних дефектів розробляти нові конструкції різального інструменту або удосконалюють методів оброблення. Проведений аналіз показав, що в більшості випадків гарні результати може забезпечити використання комбінованого інструменту або, так званий, метод «орбітального» свердління та його різновиди. Дані методи мають ряд переваг в порівнянні з іншими методами механічного оброблення, таких як зменшення осьової сили різання, внаслідок чого зменшується ефект розшарування, поліпшене відведення стружки, можливість обробки одним інструментом отворів різного діаметра, зменшення температури нагріву інструменту, внаслідок того, що ріжучим є не весь діаметр, а лише деякий вектор. Але поряд з перевагами вони мають також ряд недоліків, таких як вібрації при використанні методу «орбітального» свердління та можливе розшарування при виході різального інструменту в обох методах в ряд різних причин.

**Анотація.** В роботі представлений аналіз літературних джерел стосовно механічних методів обробки отворів в композиційних матеріалах. В результаті аналізу встановлено переваги та недоліки кожного з методів, розроблена система оцінки методів по параметрам якості, продуктивності та економічності та параметрам технологічних властивостей, котра дозволяє вибрати найкращий метод для однієї ситуації виходячи з встановлених пріоритетів. В більшості випадків встановлено, що найбільш продуктивними та якісними методами є метод «орбітального» сверлення та метод нахилного планетарного сверлення.

**Ключевые слова:** композиционные материалы; механическая обработка отверстий; сверление; «орбитальное» сверление; наклонное планетарное сверление; система оценивания.

**Abstract. Purpose.** Analysis of the literature on mechanical methods of processing holes in composite materials, analysis and systematization. Creating a system of evaluation according to the needs and situation.

**Design/methodology/approach.** Managing estimates for sets of indicators on quality, productivity and efficiency, technological capabilities of each method, the system determines which method in this situation is the most effective.

*Findings.* Conducted analysis of methods for machining holes in composite materials and developed a system of them evaluation in Microsoft Excel.

*Originality/value.* Using the developed system analysis and estimates in terms of quality, performance and technological properties determine which method is best suited to a particular situation.

*Keywords:* composite materials; machining holes; drilling; "orbital" drilling; tilted planetary drilling; evaluation system.

#### Бібліографічний список використаної літератури

1. Пасічник В.А., Глоба О.В., Технології отримання отворів у композиційних матеріалах і методи контролю якості обробки // Технологические системы / № 4(57). – 2011.
2. Криворучко Д.В. Механическая обработка композиционных материалов при сборке летательных аппаратов: (аналитический обзор): монография / Д.В. Криворучко, В.А. Залого, В.А. Колесник и др.; Под общей ред. проф. В.А. Залого. – Сумы: Университетская книга, 2013. – 272 с.
3. Durão, L.M.P.; Tavares, J.M.R.S.; Marques, A.T.; Baptista, A.M.; Magalhães, A.G. Damage analysis of carbon/epoxy plates after drilling. *Int. J. Mater. Prod. Technol.* 2008, 32, pp. 226–242.
4. Durão, L.M.P.; Gonçalves D.J.S., Tavares J.M.R.S., de Albuquerque V.H.C., Vieira A.A., Marques A.T. Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates. *Composite Structures* 2009 (1-24).
5. Mathew P., Ramakrishnan N., Naik N.K. Trepanning on unidirectional composites: delamination studies. *Composites: Part A: Applied Science and Manufacturing.* 1999, pp. 951-959.
6. Fernsdes M., Cook C. Drilling of carbon composites using a one shot drill bit. Part I: Five stage representation of drilling and factors affecting maximum force and torque. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 46 (2006) pp. 70–75.
7. Hocheng H., Tsao C. C. The path towards delamination-free drilling of composite materials. *Journal of Materials Processing Technology* 167 (2005) pp. 251–264.
8. Tsao C. C., Hocheng H. Effects of exit back-up on delamination in drilling composite materials using a saw drill and a core drill. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45 (2005), pp. 1261–1270.
9. Глоба О.В. Оцінка якості отворів при обробці ПКМ з застосуванням реверсивного руху свердла [Текст] / Глоба О.В., Солодкий В.І., Булах І.О. // Технологічні системи, УкрНДІАТ. – Київ, 2013. – №4 (65). – С. 38-44.
10. Cordell J., Stump K., Shaver C. Study of positive feed drilling parameters for optimized drilling in stickups of composite-metallic materials. *SAE International.* 2005, no. 1, pp. 3325-3325.
11. Zhang P.F., Churi N.J., Pei Z.J., Treadwell C. Mechanical drilling processes for titanium alloys: a literature review. *Machining Science and Technology.* 2008, Vol. 12, no. 4, pp. 417–444.
12. Hocheng H., Hsu C.C. Preliminary study of ultrasonic drilling of fiber-reinforced plastics, *J. Mater. Process. Technol.* 48 (1995) p. 255–266.
13. Capello E. Workpiece damping and its effect on delamination damage in drilling thin composite laminates. *Journal of Materials Processing Technology* 148 (2004), pp. 186–195.
14. Ярославцев В.М. Высокоэффективные технологии обработки изделий из композиционных материалов [Электронный ресурс] // Электронное научно-техническое издание «Наука и образование» – 2012. – №4. Режим доступа до ресурсу: <http://technomag.edu.ru/doc/361759.html>
15. Novator – a small story about a great idea (2012). Available at: <http://compositemachining.org/2012/10/novator-small-story-about-great-idea/>.
16. Novator. The orbital drilling company. Available at: <http://novator.eu>.
17. Whinnem, E., Lipczynski, G., and Eriksson, I., Development of Orbital Drilling for the Boeing 787, *SAE Int. J. Aerosp.* 1(1):811-816, 2009, doi:10.4271/2008-01-2317
18. Pham D.D. Method for generating holes in laminates materials. US Patent # 6,761,516 B2, Jul. 13, 2004.
19. H. Tanaka, K. Ohta, K. Takeda, R. Takizawa, K. Yanagi. Experimental Study on Planetary Mechanism Drilling for Carbon Fiber Reinforced Plastic (2nd Report). Development of Inclined Planetary Milling Spindle Unit, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 3-80 (2014), 297-301.
20. K. Ohta, H. Tanaka, R. Takizawa. Development of Tilted Planetary Drilling System. Proceedings of 5th CIRP International Conference on High Performance Cutting; 2012, p. 681-682.
21. H. Tanaka, K. Ohta, R. Takizawa, K. Yanagi. Experimental Study on Tilted Planetary Motion Drilling for CFRP. Proceedings of 5th CIRP International Conference on High Performance Cutting; 2012, p. 443-448.

#### References

1. Pasichnik V.A., Globa O.V., Tehnologii otrimannja otvoriv u kompozicijnih materialah i metodi kontrolju jakosti obrobki. *Tehnologicheskie sistemy*, no. 4(57), 2011.
2. Krivoruchko D.V. Mehanicheskaja obrabotka kompozicionnyh materialov pri sborke letatel'nyh apparatov: (analiticheskij obzor): monografija [Machining of composite materials in the assembly of aircraft: (analytical review): monograph], 2013. – 272 p.
3. Durão, L.M.P.; Tavares, J.M.R.S.; Marques, A.T.; Baptista, A.M.; Magalhães, A.G. Damage analysis of carbon/epoxy plates after drilling. *Int. J. Mater. Prod. Technol.* 2008, 32, pp. 226–242.
4. Durão, L.M.P.; Gonçalves D.J.S., Tavares J.M.R.S., de Albuquerque V.H.C., Vieira A.A., Marques A.T. Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates. *Composite Structures* 2009 (1-24).
5. Mathew P., Ramakrishnan N., Naik N.K. Trepanning on unidirectional composites: delamination studies. *Composites: Part A: Applied Science and Manufacturing.* 1999, pp. 951-959.



6. *Fernsdes M., Cook C.* Drilling of carbon composites using a one shot drill bit. Part I: Five stage representation of drilling and factors affecting maximum force and torque. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 46 (2006) pp. 70–75.
7. *Hocheng H., Tsao C. C.* The path towards delamination-free drilling of composite materials. *Journal of Materials Processing Technology* 167 (2005) pp. 251–264.
8. *Tsao C. C., Hocheng H.* Effects of exit back-up on delamination in drilling composite materials using a saw drill and a core drill. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45 (2005), pp. 1261–1270.
9. *Globa O.V., Solodkij V.I., Bulah I.O.* Ocinka jakosti otvoriv pri obrobcu PKM z zastosovannjam reversivnogo ruhu sverdla. *Tehnologichni sistemi, UkrNDIAT*, 2013, no. 4 (65). pp. 38–44.
10. *Cordell J., Stump K., Shaver C.* Study of positive feed drilling parameters for optimized drilling in stickups of composite-metallic materials. *SAE International*. 2005, no. 1, pp. 3325–3325.
11. *Zhang P.F., Churi N.J., Pei Z.J., Treadwell C.* Mechanical drilling processes for titanium alloys: a literature review. *Machining Science and Technology*. 2008, Vol. 12, no. 4, pp. 417–444.
12. *Hocheng H., Hsu C.C.* Preliminary study of ultrasonic drilling of fiber-reinforced plastics, *J. Mater. Process. Technol.* 48 (1995) p. 255–266.
13. *Capello E.* Workpiece damping and its effect on delamination damage in drilling thin composite laminates. *Journal of Materials Processing Technology* 148 (2004), pp. 186–195.
14. *Jaroslavcev V.M.* Electronic scientific and technical journal "Science and Education", 2012, no. 4. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/361759.html>
15. *Novator* – a small story about a great idea (2012). Available at: <http://compositemachining.org/2012/10/novator-small-story-about-great-idea/>.
16. *Novator*. The orbital drilling company. Available at: <http://novator.eu>.
17. *Whinnem, E., Lipczynski, G., and Eriksson, I.* Development of Orbital Drilling for the Boeing 787, *SAE Int. J. Aerosp.* 1(1):811-816, 2009, doi:10.4271/2008-01-2317
18. *Pham D.D.* Method for generating holes in laminates materials. US Patent # 6,761,516 B2, Jul. 13, 2004.
19. *H. Tanaka, K. Ohta, K. Takeda, R. Takizawa, K. Yanagi.* Experimental Study on Planetary Mechanism Drilling for Carbon Fiber Reinforced Plastic (2nd Report). Development of Inclined Planetary Milling Spindle Unit, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 3-80 (2014), 297-301.
20. *K. Ohta, H. Tanaka, R. Takizawa.* Development of Tilted Planetary Drilling System. *Proceedings of 5th CIRP International Conference on High Performance Cutting*; 2012, p. 681-682.
21. *H. Tanaka, K. Ohta, R. Takizawa, K. Yanagi.* Experimental Study on Tilted Planetary Motion Drilling for CFRP. *Proceedings of 5th CIRP International Conference on High Performance Cutting*; 2012, p. 443-448.

Подана до редакції 08.02.2015