



Пасічник В. А., Глоба О. В.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». Україна, м. Київ

ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ОТВОРІВ У КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛАХ І МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ОБРОБКИ

Анотація

У роботі представлено аналіз сучасних методів виконання отворів у полімерних композитних матеріалах для з'єднання в складальному виробництві елементів літальних апаратів та методи контролю якості цих отворів. Наведено приклади створення на кафедрі ІТМ НТУУ «КПІ» нових свердел для свердління отворів у полімерних композитних матеріалах.

Abstract

This paper describes analysis of modern methods of holes making in polymer composite materials for further binding in aircraft components assembling and quality control methods of these holes. Given examples describe the way how new drills for drilling holes in the polymer composite materials were implemented within NTUU "KPI", department of Integrated Technologies in Mechanical Engineering.

Вступ

Розвиток науки і техніки сьогодні вимагає шукати заміну традиційним матеріалам. Композиційні матеріали (КМ) прийшли на зміну металам в багатьох галузях виробництва — авіакосмічній, автомобільній, суднобудівній та багатьох інших сферах промисловості. Свердління є найбільш розповсюдженою операцією їх обробки і є складним процесом внаслідок, високої міцності армуючих елементів при невеликій міцності і жорсткості матриці, яскраво вираженою анізотропією властивостей, високою абразивною здатністю, низькою теплопровідністю. Отримати якісно оброблену поверхню стандартним спіральним свердлом практично неможливо, так, як свердло за рахунок різальних кромки та перемички, виконує розклинюючу дію на оброблюваний матеріал. В результаті з'являється спучення на вході свердла, розшарування, сколи, тріщини і викришування на виході свердла з матеріалу. Найбільш серйозними дефектами, які впливають на поведінку композиту, його несучу спроможність, та термін служби є розшарування шарів матеріалу на виході із свердла, та тріщини через які з'єднання матеріалів вже не є таким надійним. Ці явища напряду залежать від зусиль різання та наванта-

ження матеріалу різальними кромками свердла та перемички.

Методи отримання отворів в КМ

Сьогодні для обробки КМ тією чи іншою мірою застосовують такі технології: механічна обробка лезовим інструментом; гідроабразивна обробка; електроерозійна обробка; лазерна обробка. Вони характеризуються різною продуктивністю, якістю обробленої поверхні, економічними затратами, обмеженнями на застосування. Розглянемо більш детально специфічні особливості застосування цих технологій.

Механічна обробка КМ лезовим інструментом. Технологічні процеси на базі механічної обробки лезовим інструментом характеризуються простотою реалізації, широким вибором ручного та автоматизованого обладнання; широким вибором типів свердел від різних виробників, широким різноманітним спеціальних прийомів, що застосовуються для підвищення продуктивності та забезпечення якості. Перевагами технології механічної обробки КМ є простота його реалізації, відсутність специфічних вимог до обладнання, мобільність процесу, відносна дешевизна [1]. Спеціальні рішення свердел для обробки композиційних матеріалів пропонують компанії Guhring, Think, Onsrud, Imco, Menlo, Gandtract, RobbJack, Walter, Sandvik. Конструктивно свердла виконуються суцільними, збірний інструмент, оснащений непереточуваними пластинами з твердого сплаву мають вкрай обмежене застосування і виключно для отворів великого діаметру.

Основна проблема, з якою стикаються всі користувачі спіральних свердел — розшарування КМ під впливом осьового навантаження. Основними напрямками зниження цього фактору є застосування свердел зі спеціальною геометрією та спеціальним підточуванням тощо. Для підвищення працездатності інструменту застосовують покриття, в т. ч. — алмазні.

Спеціальним процесом на базі обробки КМ лезовим інструментом слід вважати комбінацію свердління з накладанням ультразвукових коливань. Такий процес підвищує якість обробки за рахунок зменшення ймовірності розшарування матеріалу та сколювання. Розробники методу вказують на збільшення продуктивності в 2–3 рази та підвищення стійкості інструменту в 1,5–2 рази.

Великі перспективи пов'язують із процесом, який отримав назву «орбітальне свердління». Проте

назва ця є не зовсім коректною. За схемою формотворення цей процес є фрезеруванням з спіральною інтерполяцією і саме з цим пов'язані основні переваги у підвищенні якості обробки. Проте необхідність узгодженого переміщення в трьох координатних напрямках (замість одного при свердлінні) висуває додаткові вимоги до обладнання, що його реалізує, особливо з урахуванням вимог до мобільності пристроїв. Наявне на сьогодні оснащення від компанії Novator, яке знайшло певне застосування при виготовленні літаків Airbus. Орбітальне свердління має декілька відмінностей від звичайного свердління, що дозволяє використовувати його при обробці отворів у композитних матеріалах, а саме: 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 сектор.

Слід вважати, що два останні напрямки мають в подальшому найбільшу перспективу, адже дозволяють використовувати ручний інструмент, а також розширюють можливості традиційних методів у сукупності з інтенсифікацією процесу обробки.

Гідроабразивна обробка КМ має значне застосування для різання композитів в авіаційній промисловості. Цей метод практично гарантує відсутність розшарування КМ. Основними перевагами методу є: простота оснащення; відсутність термічного навантаження на деталь; застосовується один інструмент (головка) для різання всіх елементів; відсутні токсичні випаровування або газу. Проте гідроабразивна обробка має ряд недоліків, які стримують і обмежують його застосування як основного методу обробки отворів у КМ. До основних недоліків слід віднести: проблему початкового прошивання матеріалу (це не є проблемою при розкрююванні великогабаритних деталей, проте стоїть на заваді свердління великої кількості отворів); невисока мобільність процесу; висока, у порівнянні з механічною обробкою, вартість технологічного обладнання; відхилення струменя в напрямку, протилежному напрямку обробки знижує якість обробки [2].

Електроерозійна обробка КМ використовується для композитів, що містять графіт. Цей метод не можна застосовувати для діелектриків, що суттєво обмежує область його застосування. До недоліків методу також слід віднести невисоку мобільність та високу вартість обладнання та витратних матеріалів для реалізації даної технології.

Лазерна обробка КМ є ще одним методом, який може застосовуватись для обробки КМ. До суттєвих недоліків слід віднести термічне пошкодження матеріалу — розплавлення кромки, високу вартість обладнання.



Рис. 1. Співвідношення методів механічної обробки отворів в КМ

Найбільші перспективи для обробки КМ мають методи на основі механічної обробки лезовим інструментом. Співвідношення цих методів в системі координат «Якість — Продуктивність — Мобільність» представлена на рис. 1.

Основна частина

Як було вище зазначено раніше одним з важливих показників якості отворів є величина розшарування матеріалу. Прогнозувати величини розшарування, при свердленні композиційного матеріалу, є складним завданням. Визначення оптимальних значень частоти обертання інструменту і величини подачі, при яких оброблювальний матеріал не буде розшаруватись, потребує проведення великої кількості експериментів. Одним з більш дешевих і менш затяжним у часі, являється аналітичний метод прогнозування, який використовує формули механіки руйнування.

У зв'язку з необхідністю покращення процесу обробки композитних матеріалів може використовуватись свердління ступінчатими свердлами, котре дає змогу зменшити сили різання в зоні обробки, завдяки розподіленню їх на декілька різальних кромки в залежності від кількості ступенів свердла. До того як перемичка вийде із матеріалу, вона і первинні різальні кромки (перша ступень) свердла рівномірно навантажують матеріал, свердло знаходиться в тяжких умовах різання. Після того як перша ступень свердла вийшла з матеріалу, сила різання перетворюється на кругову розподілену силу, швидкість різання та передній кут збільшується і зніжиться ступінь деформації. Також перевага такої конструкції інструменту в тому, що наступна ступінь інструменту з різальними кромками знімає менший припуск матеріалу, а також сили різання там значно менші. Крім того вторинна різальна кромка вибирає дефекти (бахрома, припали, сколи та ін.) утворені проходом первинної різальної кромки, яка утворила основний отвір.

Tsao C. C., Hocheng H. [3] створили фізичну модель і знайшли метод дослідження впливу сили різання

на величину розшарування при свердленні різними конструкціями свердел. При її розрахунку використовувалось рівняння енергетичного балансу для матеріалу під свердлом було отримане критичне зусилля розшарування осьової сили різання (1) для свердління полімерних композиційних матеріалів та схема (рис. 2) навантаження матеріалу.

$$P = 4\pi \sqrt{\frac{G_{IC} 2D(1+\nu)}{(\nu+3)}}, \quad (1)$$

де ν – коефіцієнт Пуассона;

h – товщина шару матеріалу;

G_{IC} – швидкість вивільнення енергії деформації при нормальному відриві

$$G_{IC} = \left(\frac{(1-\nu^2)}{E} \right) K_I^2;$$

D – жорсткість на згин

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)};$$

E – Модуль Юнга;

K_I – показник інтенсивності навантажень.

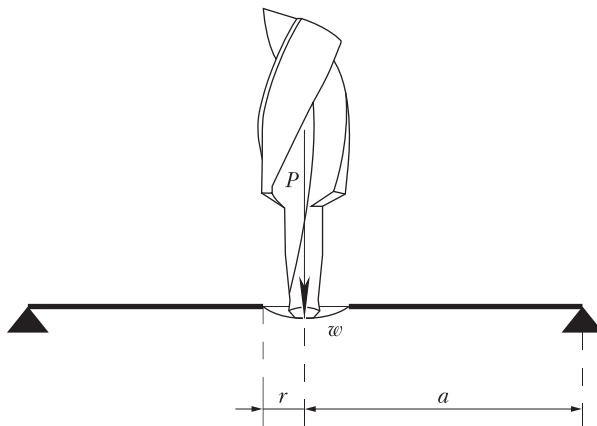


Рис. 2. Схема навантаження матеріалу першою ступені свердла:

P – зусилля навантаження матеріалу (осьова сила різання);
 ω – величина розшарування матеріалу;
 r – радіус ділянки свердла; a – відстань від точки закріплення матеріалу до зони обробки

Цю схему використовували для дослідження умов навантаження при роботі першої ділянки свердла. Згідно проведених розрахунків для матеріалу Twintex формули (1) при роботі першої ділянки свердла критичним зусиллям розшарування рівняється 61,5 (н).

Для дослідження умов навантаження при роботі наступних ділянок свердла необхідно дослідити вплив відношення розмірів меншої та більшої ділянок свердла на критичне зусилля розшарування, використана методика запропонована в роботі [4] та формула (2). Схема навантаження для наступної ділянки свердла зображена на рис. 3.

Дві вищевказаних рівняння утворюють модель розрахунку силових параметрів критичних зусиль розшарування в процесі роботи ступінчастого спірального свердла, як на етапі врізання різальної кромки первинної ділянки, так і на подальших етапах роботи наступних ділянок свердла.

Відповідно розрахунків формули (2) для другої ділянки свердла отримані критичні зусилля розшарування для різних значень ξ . Проаналізувавши отримані результати попередньо була обрана величина $\xi = 0,4$.

За методикою Родіна П. Р. [5] для проектування свердел було проведено оптимізацію геометричних параметрів першої та другої ступені. Початкові дані

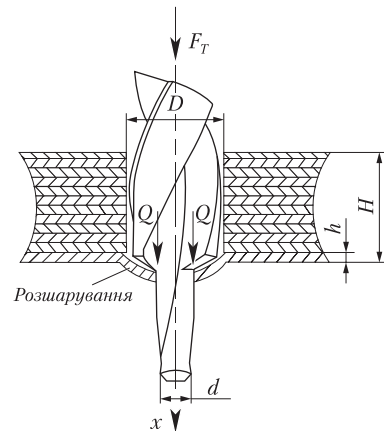


Рис. 3. Схема навантаження матеріалу наступною ступені свердла:

F_T – сконцентроване навантаження матеріалу (осьова сила різання);
 Q – розподілене навантаження матеріалу на другій ступені;
 H – товщина матеріалу; h – товщина шару матеріалу; d – діаметр першої ділянки свердла; D – діаметр наступної ділянки свердла

$$F_T = \frac{\sqrt{2\pi}}{1-\nu} \left[\frac{32G_{IC} M \{ (1-\nu) + 2(1+\nu)\xi^2 \}^2}{(1+\nu) \{ 2(1-\nu)(1+2\nu^2) - (12-4\nu+3\nu^2+3\nu^3)\xi^2 - 8(1+3\nu)\xi^2 \ln \xi \}} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

де E – Модуль Юнга; K_I – показник інтенсивності навантажень; ν – коефіцієнт Пуассона; h – товщина шару матеріалу; G_{IC} – швидкість вивільнення енергії деформації при нормальному відриві; $M=D$ жорсткість на згин; $\xi = r/R$ відношення радіусів ступенів свердла.

для розрахунків обрані за рекомендаціями [6]. Після проведення оптимізації геометрії першої та другої ступені свердла, була розроблена його конструкція, яка представлена на рис. 4.

Порівняльні експериментальні дослідження визначення критичного зусилля розшарування, виконувались на пристрої для визначення розшарування композиційного матеріалу, розробленому на кафедрі інтегрованих технологій машинобудування НТУУ «КПІ» [7].

Види стружки та якість виконаних отворів в полімерних композиційних матеріалах ступінчастим свердлом на його вході та виході представлені на рис. 5–7 [8].

При проектуванні кільцевого свердла для визначення залежності величини розшарування від сил різання була використана модель і формули, які наведено у статті [3]. Схема для розрахунку величини розшарування наведена на рис. 8. Проаналізувавши дані моделювання процесу різання і результати математичних розрахунків щодо величини розшарування, були визначені геометричні параметри, які забезпечують найменшу серед досліджуваних зразків силу різання і не викликає розшарування матеріалу. Розроблене свердло представлено на рис. 9.

Якість виконаних отворів в полімерних композиційних матеріалах кільцевим свердлом на його

вході та виході в порівнянні з спіральним представлені на рис. 10–11 [9].

Методи контролю

Поряд із контролем точності отвору та шорсткості поверхні слід обов'язково контролювати відсутність розшарування КМ. Це особливо актуально для перспективних методів механічної обробки.

Методи контролю якості оброблених отворів в КМ можна розділити на 2 групи.

1 група – оптичні методи. Спостерігаючи у мікроскоп пошкоджені зони, визначаються їхні параметри в абсолютному та відносному виразі. Площі із максимальним розшаруванням визначаються вздовж і поперек волокон КМ. Ефективним різновидом оптичного методу є Кольорова дефектоскопія. Після попереднього очищення отвору на його внутрішню поверхню розпилюється флуоресцентна фарба. В ультрафіолетовому світлі фарба, що заповнює всі щілини дає чітку уяву про характер і величину пошкоджень. До переваг оптичних методів слід віднести простоту реалізації, дешевизну, високу мобільність. До недоліків цих методів відносяться неможливість оцінити внутрішні (невидимі при візуальному огляді) пошкодження а також ускладненість отримання числової оцінки пошкодження.



Рис. 4. Ступінчасте свердло

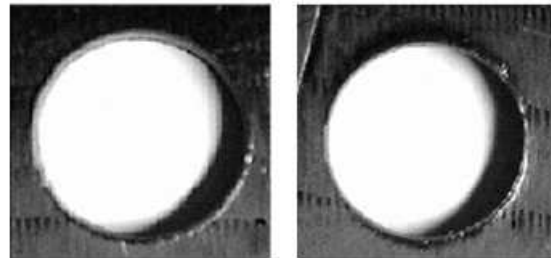


Рис. 6. Отвір у вуглепластику КМУ 8, отриманий при обробці ступінчастим свердлом:

а – на вході; б – на виході

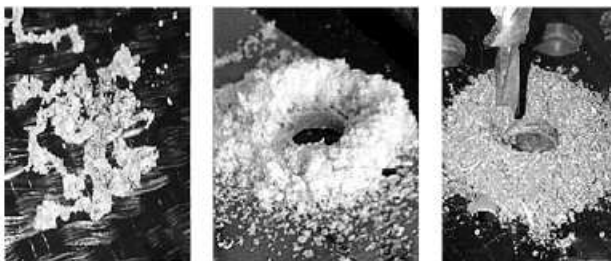


Рис. 5. Види стружки отримані при свердлінні ступінчастим свердлом композитних матеріалів:

а – Twintex; б – склопластик; в – вуглепластик

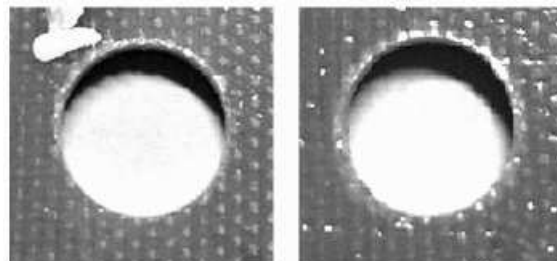


Рис. 7. Отвір в склопластику з епоксидною зв'язкою, отриманий при обробці ступінчастим свердлом:

а – на вході; б – на виході

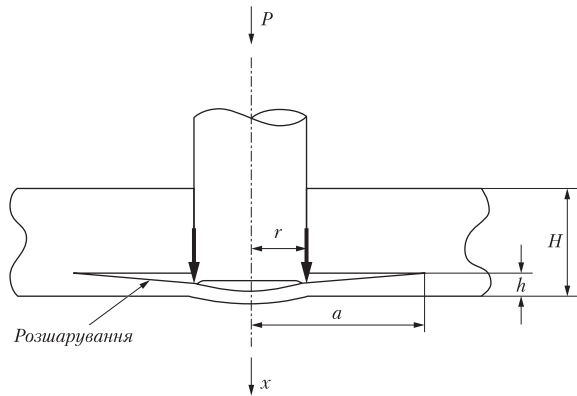


Рис. 8. Схема навантаження матеріалу кільцевим свердлом



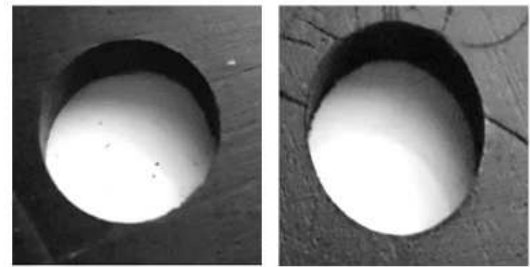
Рис. 9. Кільцеве свердло

2 група – методи неруйнівного контролю внутрішньої структури. Такі методи мають різні реалізації, зокрема, радіочастотний метод (радіографічна дефектоскопія, яка виконується з використанням рентгенівського та гама-випромінювання), ультразвукові дослідження, комп'ютерна томографія, вихротокове дослідження тощо. До переваг цієї групи методів можна віднести можливість виявлення характеру і розмірів внутрішніх пошкоджень, отримати числову оцінку розшарування в КМ. До недоліків слід віднести залежність методу дослідження від групи КМ та високу вартість окремих видів досліджень.

Висновки

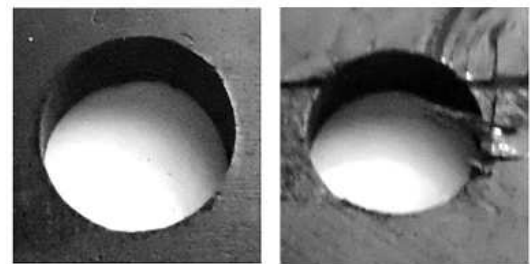
Аналіз співвідношення різних методів обробки отворів у КМ в системі показників «Якість – Продуктивність – Мобільність» показав, що найбільші перспективи для обробки КМ мають методи на основі механічної обробки лезовим інструментом.

Використання аналітичного методу розрахунку зусиль розшарування при проектуванні свердел для отримання отворів в полімерному композиційному матеріалі дозволяє прогнозувати появу небажаного негативного ефекту розшарування та запобігати йому. Проте нестабільність фізико-механічних властивостей КМ вимагає проведення додаткових експериментальних досліджень.



а б

Рис. 10. Зображення отвору на вході (а) і виході (б), просверделеного кільцевим свердлом



а б

Рис. 11. Зображення отвору на вході (а) і виході (б), просверделеного спіральним свердлом, без використання підкладки

Аналітично та експериментально показані переваги застосування для обробки композиційних матеріалів ступінчастих спіральних свердел, а саме, зменшення сили вздовж різальних кромки, зменшення ймовірності розшарування, оскільки границя критичних навантажень матеріалу при роботі ступінчастим свердлом більш як в два рази вища у порівнянні зі звичайним. Не менш важливим у досягненні високої якості отриманого отвору є те, що вторинна різальна кромка при свердлінні зрізує зони розшарування, тріщини та інші локальні дефекти викликані роботою першої ділянки.

При свердленні отвору кільцевим свердлом як на вході, так і на виході інструменту забезпечується висока якість поверхні, відсутні видимі дефекти. Проте слід відмітити, що кільцеві свердла мають низьку точність позиціонування отвору, особливо при обробленні ручним інструментом, а також високі вимоги щодо перпендикулярності осі інструменту по відношенню до оброблюваної поверхні.

Експериментальні дослідження показали, що точність отворів, оброблених ступінчастим і кільцевим свердлом, знаходиться в межах 10–11 квалітету.

Література

1. *P. M. Ajayan, L. S. Schadler, P. V. Braun.* Nanocomposite Science and Technology, 2003 WILEY-VCH Verlag GmbH Co. KGaA, Weinheim.
2. *F. C. Campbell.* Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials, 2006.
3. *Tsao C. C., Hocheng H.* Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits, Journal of Materials Processing Technology 140 (2003) 335–339.
4. *G. DiPaolo, S. G. Kapoor, R. E. DeVor,* An experimental investigation of the crack growth phenomenon for drilling of fiber-reinforced composite materials, ASME J. Eng. Ind. 118 (1996) 104–110.
5. *Родін П. П.* «Геометрия режущей части спирального сверла». — К.: «Техніка», 1971, 136 с.
6. *Степанов А. А.* Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов. — Л.: Машиностроение, 1987. — 176 с.
7. *Глоба А. В., Шевченко О. А.* Визначення зусилля розшарування при свердлінні полімерних композиційних матеріалів // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем, збірка наукових праць, № 22. Краматорськ. 2008 р., с. 198–203.
8. *Кухановський О. В.* Дослідження конструкцій осевого інструменту на точність обробки отворів в твинтексе. Дипл. роб. магістра, Київ: Націон. Техн. ун-т України «КПІ». — 2011, 114 с.
9. *Кульбачний О. В.* Дослідження впливу геометрії кільцевого свердла на точність обробки отворів у вуглепластику. Дипл. роб. магістра, Київ: Націон. Техн. ун-т України «КПІ». — 2011, 100 с.