

Рис. 7. Залежність радіуса сектора від його кута повороту за час напрацювання пакування

**Висновки.** Розроблено алгоритм розрахунку параметрів механізму для забезпечення заданого закону сили притискування бобінотримача до фрикційного циліндра.

Проведено дослідження впливу параметрів механізму на силу притискування за весь цикл намотування, визначені оптимальні параметри механізму притискування.

#### Список використаних джерел

1. Коритыцкий Я. И. Колебания в текстильных машинах / Я. И. Коритыцкий. – М.: Машиностроение, 1973. – 320 с.
2. Матюшев И. И. Высокоскоростные приемно-намоточные механизмы для химических нитей / И. И. Матюшев, В. А. Климов. – М.: Легпромбытиздат, 1991. – 228 с.
3. Машины для формирования химических и минеральных волокон / под ред. проф. Х. З. Регельмана. – М.: Машиностроение, 1972. – 264 с.
4. Прошков А. Ф. Расчет и конструирование машин для производства химических волокон / А. Ф. Прошков. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 402 с.

УДК 621.91:678.5

**І.О. Булах**, аспірант

**О.В. Глоба**, канд. техн. наук

НТУУ “КПІ”, Механіко-машинобудівний інститут, м. Київ, Україна

### МЕХАНІЧНА ОБРОБКА КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

*Розглянуто області застосування, переваги та недоліки композиційних матеріалів. Проаналізовано методи механічної обробки композитів та дефекти, що виникають під час свердління. Особливу увагу сконцентровано на процесі розширення композитів при вході та виході свердла з матеріалу. Зокрема, розглянуто основи математичного моделювання, що є фундаментальним при запобіганні розширенню. Розглянуто новий склопластик Twintex, його переваги та застосування.*

**Постановка проблеми.** Свердління композиційних матеріалів є найбільш поширеною операцією їх механічної обробки. В силу того, що композиційні матеріали є анізотропними, характеризуються високою міцністю армуючих елементів при невеликій міцності матриці, мають високу абразивну здатність і низьку теплопровідність їх свердління дуже специфічне, супроводжується різноманітними пошкодженнями навколо отворів. Одна з основних проблем, що виникає під час утворення отворів у композиційних матеріалах – це розширення на вході і виході інструменту з матеріалу. Наявність цього дефекту істотно впливає на несучу спроможність і надійність виробу в цілому. Тому важливо підібрати такі параметри обробки матеріалу, щоб максимально інтенсифікувати процес свердління й одержати гарантовану якість.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Для покращення свердління композиційних матеріалів були запропоновані різні заходи. В першу чергу, вони стосувалися геометричних параметрів свердла. В роботі [1] було запропоновано використовувати від 3 до 6 ріжучих кромок, щоб збільшити довжину контакту між інструментом та матеріалом. Був розгля-

нутий комплекс дій, пов'язаний з регулюванням подачі, що застосовується в свердильних верстатах з ЧПУ. Наприклад, у роботі [2] автори запропонували метод спіральної подачі, в роботі [3] описано орбітальний метод свердління, де отвори обробляються вздовж осі та радіально. Було показано, що подача має великий вплив на осьову силу, кількість ушкоджень збільшується зі зростанням подачі. Було доведено, що під час вирішення проблеми розшарування фундаментальним є побудова механізму руйнування і побудова його математичної моделі.

**Мета статті.** Розглянути особливості та сфери застосування композиційних матеріалів. Проаналізувати свердління КМ, основні проблеми, що виникають під час механічної обробки отворів у цих матеріалах. Розкрити перспективи подальшого дослідження обробки композитів.

**Виклад основного матеріалу.** Композиційні матеріали (КМ) – це матеріали, що складаються з двох або більше матеріалів, що не розчинні один в одному, властивості яких відрізняються від властивостей їх компонентів (матеріалів).

Композиційні матеріали в наш час знайшли широке застосування. Ці матеріали застосовуються з кількох причин, зокрема, це висока жорсткість і міцність при відносно невеликій вазі, що дуже актуально для авіапромисловості, де зменшення маси літака значно знижує витрати пального. Межі витривалості композиційних матеріалів значно вищі, ніж у деяких металів. Композитам властивий низький коефіцієнт теплового розширення, що забезпечує стабільність розмірів. Виробництво композитів займає менше часу і деталь можна створити відразу потрібної форми, що зменшує час механічної обробки. Композиційні матеріали широко застосовуються в автомобільній промисловості, суднобудуванні тощо. Зокрема, на діаграмі (рис. 1) зображене процентне співвідношення використання композитів у різних галузях промисловості.



Рис. 1. Застосування композитів у промисловості

Наприклад, під час побудови літаків композити застосовуються для елементів обшивки фюзеляжу та інтер'єру, модулів та панелей крила, закрилків, елементів хвостової частини. Застосування композитів у літаку порівняно з алюмінієм, сталлю, титаном показано на рис. 2.



Рис. 2. Використання композитів для деталей літака

Механічна обробка композиційних матеріалів необхідна для досягнення бажаної якості поверхні, отримання складних конфігурацій виробу. Крім того, вона необхідна для розрізування виробів до потрібних розмірів, а також для отримання зразків, за допомогою яких визначаються фізико-механічні характеристики готових виробів.

Під час виготовлення виробів із високоміцних полімерних композиційних матеріалів застосовують такі види механічної обробки: точіння, свердління і розгортання, фрезерування, розрізування, шліфування і нарізування різьби. На діаграмі представлено їх процентне співвідношення (рис. 3).



Рис. 3. Структура механічної обробки полімерних композитів

Залежно від виду композиційного матеріалу, вимоги до інструменту відрізняються. Наприклад, для свердління деталей зі склопластиків рекомендовано застосовувати свердла з твёрдосплавного матеріалу ВК6, обробку проводити при швидкості різання 30-35 м/хв та подачі 0,1-0,5 мм/об. Можна використовувати свердла з швидкоріжучої сталі, проте стійкість і виробничість їх нижча. Для свердління деталей з вуглепластиків рекомендовано застосовувати свердла з твёрдосплавного матеріалу ВК6, обробку проводити при швидкості різання 16 м/хв та подачі 0,05-0,1 мм/об. Також можливе використання свердел із швидкоріжучої сталі. Для свердління деталей зі органоластиків потрібно застосовувати свердла з твёрдосплавного матеріалу ВК6 або ВК8 (спеціальних конструкцій), обробку проводити при швидкості різання 25-30 м/хв та подачі 0,08-0,25 мм/об. Через низьку теплопровідність виникають великі утруднення під час різання матеріалу більше 10 мм.

Незважаючи на широке розповсюдження композиційних матеріалів, необхідно брати до уваги і враховувати під час обробки деякі їх недоліки. Зокрема, це дороговизна виробництва КМ, залежність їх температурної стійкості від матеріалу зв'язуючої матриці. Композиційні матеріали є гігроскопічними, що впливає на процес обробки і поведінку виробів з КМ. Для обробки композитів потрібно враховувати такі параметри, як: товщина матеріалу, вимоги до якості та точності отвору під час обробки, вид матеріалу. Для кожного виду матеріалу потрібен індивідуальний підхід до геометрії інструменту.

Згідно з аналізом, представленим на рисунку 3, свердління композиційних матеріалів є одним із найпоширеніших видів механічної обробки. Найчастіше отвори у композиційних матеріалах створюються під болтове та заклепкове з'єднання. Вимоги до точності отворів для цих двох видів з'єднань відрізняються. Зокрема, в авіаційній промисловості вимоги до точності отворів під заклепки 3-6 квалітетів, а для болтового з'єднання 6-12 квалітетів.

Через особливості будови та фізико-хімічні характеристики композиційних матеріалів, а саме їх високу абразивну здатність, що призводить до швидкого зношування різального інструменту, низьку теплопровідність, що веде до підвищення температури у зоні різання, необхідні спеціальні інструменти та умови роботи (швидкість подачі, оптимальні сили різання тощо). Дефектів у композиційних матеріалах під час обробки можна уникнути введенням додаткових різальних кромки (свердла з подвійною заточкою тощо), створенням позитивних передніх кутів. Нульових і негативних кутів потрібно уникати, бо це призводить до виштовхування волокон матеріалу і знижує якість отворів. Важливою є величина перемички. Мала перемичка покращує здатність проникнення інструменту у

матеріал. Це покращує якість і точність обробки. Типи різальних кромок сучасних свердел для обробки композиційних матеріалів представлені на рис. 4.

Для більш успішної обробки композиційних матеріалів у НТУУ “КПІ” були розроблені свердла таких конструкцій: комбінований осьовий інструмент (рис. 5, а) [4], різальна частина якого утворена у формі триперого свердла, причому на різальній кромці відсутня перемичка, і ступінчасте свердло (рис. 5, б), що складається з двох ступенів різного діаметра.

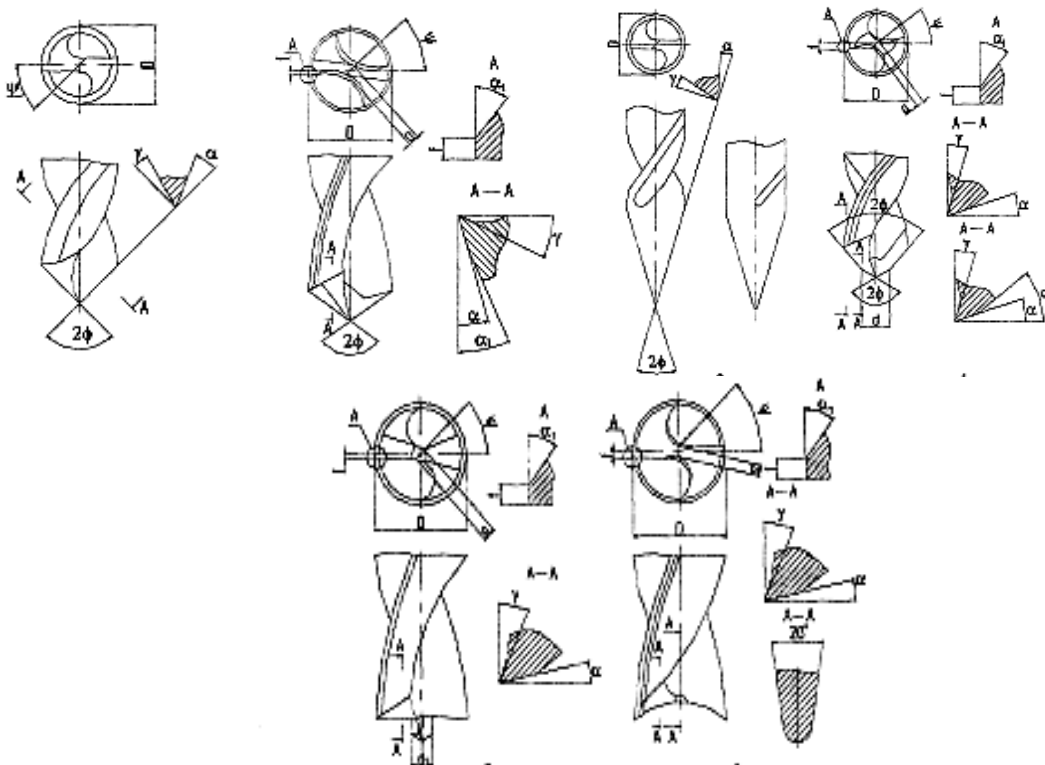


Рис. 4. Конструкції свердел для композиційних матеріалів

Як було вказано вище, КМ має високі властивості, наприклад, склоепоксидні, графіт-епоксидні КМ мають велику кількість абразивних елементів, що призводить до швидкого зношення інструменту. Тому широко почали використовуватися полікристалічні алмази PCD. Вони забезпечують підвищення стійкості інструменту, якість і точність отворів, більш високий рівень обробки.

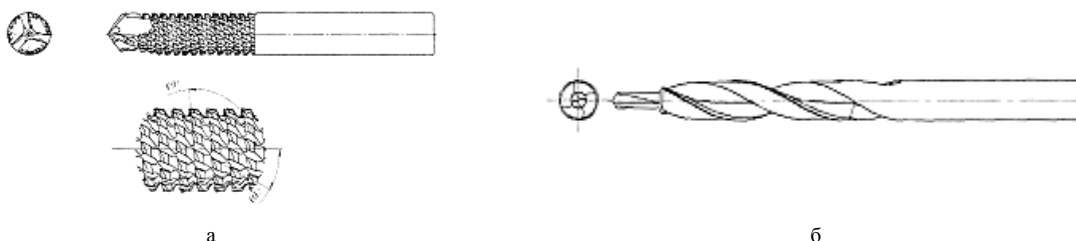


Рис. 5. Конструкції свердел для композиційних матеріалів, розроблених у НТУУ “КПІ”

Якість оброблюваної поверхні отворів включає в себе ряд показників, що характеризують як геометричні параметри, так і фізико-хімічний стан поверхневого шару виробу (рис. 6).

При свердлінні композиційних матеріалів, шари композиційного матеріалу, які потрапляють на різальну кромку, піддаються місцевій деформації на вигин, що є причиною розшарування матеріалу навколо отвору. Неважко припустити, що розшарування буде вимагати невеликого осьового зусилля, особливо коли значення товщини не зріза-

ного шару залишиться незначним, внаслідок чого на виході матеріалу буде спостерігатися розшарування матеріалу [6].

До можливих дефектів композиційних матеріалів під час свердління слід відносити розрив шарів КМ на вході свердла (рис. 7) та розшарування на виході свердла з матеріалу (рис. 8). Шорсткість є однією з найбільш важливих характеристик якості оброблювальної поверхні. В більшості випадків достатньо отримати шорсткість Rz20-Rz40. Сколи виникають під час обробки полімерних композитів з крихкою матрицею. Для зменшення сколів необхідно ретельно підбирати геометричні параметри інструменту. Під час обробки волокнистих композитів за допомогою лез, особливо органопластиків, характерна поява ворсистості, тобто незрізаних волокон армуючого матеріалу. Для зменшення ворсистості потрібно підбирати оптимальні режими різання, використовувати гострозаточений інструмент, використовувати схеми з різнонаправленими значеннями кута ріжучої кромки.

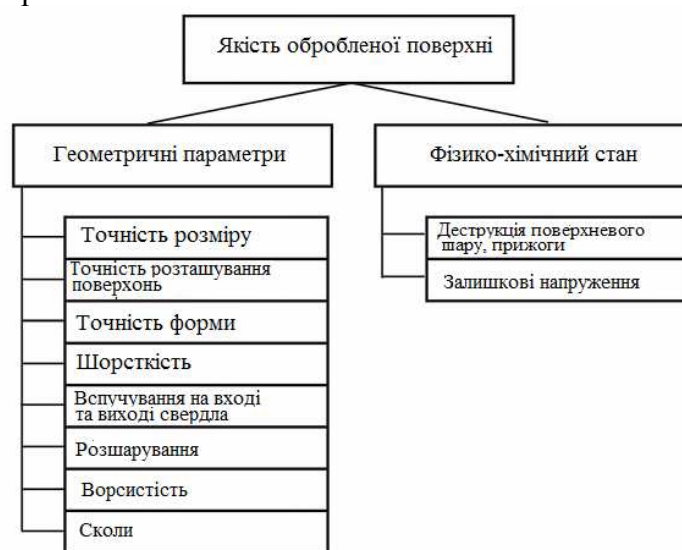


Рис. 6. Параметри якості обробки поверхонь отворів

Окрім похибок геометричних параметрів, виникають похибки, пов'язані з фізико-хімічним станом поверхні, такі як термодеструкція поверхневого шару тощо [5]. Під час обробки різанням ВМПКМ за рахунок великих контактних площ на задній поверхні інструменту і дії високих температур у зоні різання виникають прижоги.

У результаті цього процесу виникає деструктивно-диспергований шар, який погіршує експлуатаційні характеристики виробів з ВМПКМ. Глибина деструкції залежить від виду та умов обробки і коливається в проміжку 0,003-0,5 мм.

Багато авторів, зокрема [7], провели численні експерименти щодо пошуку такої схеми обробки, що дасть можливість запобігти розшаруванню. Зокрема, були зроблені висновки, що під час вирішення цієї проблеми фундаментальним є формулювання механізму руйнування та побудова математичної моделі.

Найбільш розповсюдженою є модель Hocheng і Dharan [8]. Ця модель пов'язана з визначенням критичної сили, яка забезпечує початок руху тріщини для входу і виходу свердла з матеріалу.

Згідно з цією моделлю критична сила руйнування на виході свердла:

$$F_a = \pi \sqrt{\frac{8G_{IC}EH^3}{3(1-\nu^2)}} \left(\frac{h}{H}\right)^{\frac{3}{2}}. \quad (1)$$

Критична сила руйнування на вході свердла:

$$F_c = k_{slope} \pi \sqrt{\frac{8G_{IC}EH^3}{3(1-\nu^2)}} \left(1 - \frac{h}{H}\right)^{\frac{3}{2}}, \quad (2)$$

де  $H$  – товщина шаруватого пластику;

$h$  – недорізана глибина під інструментом;

$G_{IC}$  – критична енергія інтенсивності звільнення тріщини;

$E$  – модуль пружності;

$\nu$  – коефіцієнт Пуассона;

$k_{slope}$  – постійна, що визначається величинами  $\lambda$  (кут нахилу вершини свердла) і  $\mu$  (коефіцієнтом тертя між інструментом і матеріалом).

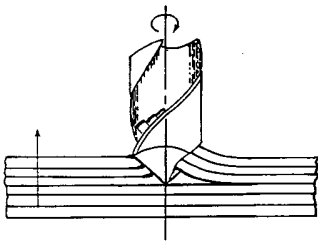


Рис. 7. Розрив шарів на вході

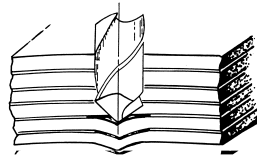


Рис. 8. Розшарування на виході

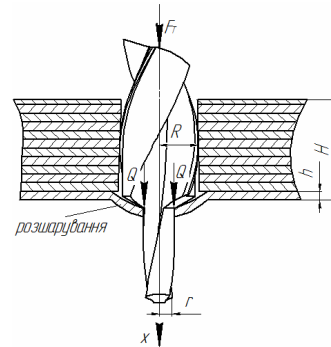


Рис. 9. Схема навантаження матеріалу наступною ступінню свердла

У роботі [9] подана схема навантаження матеріалу під час обробки ступінчастим свердлом (рис. 9), а також поданий вираз для розрахунку критичного зусилля розшарування:

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

де  $E$  – модуль Юнга,  $K_I$  – показник інтенсивності навантажень,  $\nu$  – 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.

Щоб уникнути розшарування матеріалу в процесі обробки тонкостінних і порожніх деталей, а також листового матеріалу з термопластичних матеріалів застосовують свердла з кутом при вершині  $2\varphi = 55...60^\circ$ , а для свердління оргскла – з подвійним кутом заточки  $2\varphi = 100$ ,  $2\varphi = 130...140^\circ$ . Свердління здійснюється при швидкості різання 40...50 м/хв і подачі 0,05...0,1 мм/об. Можливе застосування підкладки під матеріал під час свердління. Були проведені дослідження із заморожуванням композиційного матеріалу [10].

Для контролю розшарування композиційних матеріалів застосовуються різноманітні неруйнуючі методи, наприклад ультразвуковий, тепловий, акустичний методи. Можливе застосування магнітних рідин і холестеричних рідких кристалів.

У наш час широко досліджується новий композиційний матеріал фірми Twintex. Це сухий препрег, виготовлений з неперервного скловолокна та волокон поліпропілену методом композитування скловолокна та поліпропілену, що під час нагрівання плавиться і утворює суцільну матрицю.

Перевагами цього матеріалу є легка вторинна переробка, хімічна та ударна стійкість, подовжений термін служби, екологічність, висока швидкість переробки, можливість зварки, ремонтоздатність, відсутність деламінації.

Twintex знаходить широке застосування в автомобілебудуванні, зокрема з нього виготовляють елементи обшивки автомобілів, каркаси сидінь, модулі дверей, панелі приладів, паливні канали, елементи захисту двигуна тощо. Це зумовило великий інтерес до дослідження обробки цього матеріалу, так як він належить до групи вуглепластиків і суттєво відрізняється по оброблюваності від склопластиків, які широко застосовуються на цьому етапі.

Нині перспективними напрямками дослідження композиційних матеріалів є:

1. Створення раціональної геометрії свердел.
2. Розгляд нових схем різання.
3. Створення математичних моделей з метою прогнозування процесу різання.
4. Використання нових інструментальних матеріалів.

**Висновки.** Розглянуто поняття композиційних матеріалів, області їх застосування, переваги та недоліки цих матеріалів.

Досліджено структуру механічної обробки полімерних композитів, як найбільш розповсюджений вид механічної обробки, проаналізовано свердління композитів. Зокрема, розглянуті типи ріжучих кромок, що застосовуються для свердління композитів, а також перспективні типи свердел, що розроблені в НТУУ “КПІ” для більш успішної обробки. Вказані особливості свердління (швидкість подачі, матеріал інструменту) для різних типів композиційних матеріалів.

Проаналізовані різні типи дефектів композитів під час створення отворів. Особливо розглянуто розшарування композитів на вході і виході інструменту з матеріалу. На основі вивчення різноманітних джерел подано основи математичних моделей, заснованих на процесах руйнування. Описані деякі можливі напрямки уникнення та контролю процесу розшарування. Проте найбільш фундаментальним є метод попереднього математичного моделювання.

Описані переваги та застосування нового композиційного матеріалу Twintex, а також запропоновані напрямки подальшого дослідження обробки композиційних матеріалів.

#### Список використаних джерел

1. Experimental analysis of drilling damage in thin carbon/epoxy plate using special drills / Piquet R., Ferret B., Lachaud F. and Swider P. // *Composites*, 2000, – А, 31. – P. 1107-1115.
2. Park K.Y., Choi J.N., Lee D.J. Delamination free and high efficiency drilling of carbon fibre reinforced plastics // *J. of composite materials*, 1995, – 29 – P. 985-1003.
3. Persson E., Eriksson I., Zackrisson L. Effects of hole machining defects on strength and fatigue life of composite laminates // *Composites*, 1997, – А, 28, – P. 141-151.
4. UA 60355 U B23 B51/02 (2006/01) Комбінований осьовий інструмент: деклараційний патент України 60355/ О. В. Кухановський, О. В. Глоба; опубл. 10.06.2011, Бюл. №11.
5. Степанов А. А. Обработка резанием высокопрочных композиционных материалов / А. А. Степанов. – Л.: Машинобудування, 1987. – 178 с.
6. Глоба А. В. Оценка качества обработанной поверхности при сверлении высокопрочных полимерных композиционных материалов / А. В. Глоба, Ю. И. Адаменко // *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: збірник наукових праць*. – 2008. – № 23. – С. 220-224.
7. Dharan C.N.K., Won M.S. Machining parameters for an intelligent machining system for composite laminates // *Int. J. of machine tools and manufacture*, 2000, – 39, – P. 415-426.
8. Hocheng H., Dharan C.N.K. Delamination during drilling in composite laminates // *J. of engineering for industry*, 1995, – 112, – P. 236-239.
9. Глоба О. В. Аналітичний розрахунок критичного зусилля розшарування при обробці композиційних матеріалів ступінчастими свердлами та визначення оптимальної величини ступені / О. В. Глоба, О. В. Кухановський // *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: збірник наукових праць*. – 2011. – № 28.
10. Криштопа Н. А. Исследование и разработка способов и инструментов для сверления слоистых материалов: дис. канд. техн. наук / Н. А. Криштопа. – К.: б.и., 1974. – 208 с.