

Машинознавство

УДК 621.91:678.5

І.О. Булах, аспір.

О.В. Глоба, к.т.н., доц., с.н.с.

Національний технічний університет України «КПІ»

АНАЛІЗ ДЕФЕКТІВ ТИПУ ВІДШАРУВАНЬ ПРИ СВЕРДЛІННІ КОНСТРУКЦІЙ З КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Розглянуто процес розшарування композиційних матеріалів при виготовленні, механічній обробці та експлуатації. Проаналізовано механізм виникнення та поширення тріщини. Описано модель розшарування при виході свердла з матеріалу.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Розвиток авіаційної та космічної техніки пов'язаний з розширенням застосування композиційних матеріалів (КМ), які мають високі фізико-механічні, теплофізичні, діелектричні характеристики. КМ отримали широке поширення в авіаційній промисловості завдяки комбінації механічних, фізичних і хімічних властивостей. Наприклад, за основними показниками – щільністю, модулем пружності, міцністю при розтягуванні, повзучістю, втомною міцністю, демпфуючою здатністю і корозійною стійкістю – КМ в діапазоні температур від -60 до $+200$ °С перевершують алюмінієві сплави. Проте конструкції з композитів дуже чутливі до технологічних дефектів, наприклад, розшарування, непроклеїв і тріщин, а також дефектів, утворених в процесі експлуатації чи обробки (наприклад, до надрізів поверхневих шарів). Дефекти типу розшарувань можуть з'являтися також на стадіях транспортування, зберігання та експлуатації. Вони можуть викликатися температурними напруженнями, локальними навантаженнями, наприклад, ударами по поверхні конструкції. Дефекти типу розшарувань є найбільш поширеними при механічній обробці КМ. Наявність такого типу дефекту значно знижує якість та міцність конструкції, погіршує експлуатаційні характеристики виробу, що робить неможливим використовувати його у авіабудуванні, та інших видах промисловості, вказаних вище [10]. Тобто проблема дослідження за запобігання розшаруванню матеріалу є актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема розшарування була розглянута зокрема такими вченими, як Dharan С.N.K., Криштопа Н.А., Tsao С.С., Hocheng Н., Кобаяши А. та ін. Зокрема, був побудований механізм розшарування [7, 8], досліджені причини утворення тріщини, а також розглядалися методи, що дозволяють запобігти розшаруванню матеріалу. Був зроблений висновок, що для запобігання процесу розшарування фундаментальним є створення математичної моделі [3, 4], а також підбір параметрів різання та геометрії інструменту, що дозволять мінімізувати утворення тріщини та покращити експлуатаційні характеристики виробів.

Формулювання цілей статті. Метою даного дослідження є аналіз дефектів у КМ, розгляд на основі літературних джерел проблеми розшарування в процесі виготовлення, механічної обробки, зокрема свердління та експлуатації, механіки цього процесу. А також аналіз моделі розшарування та визначення перспектив подальшого дослідження проблеми підвищення якості обробленої поверхні.

Викладення основного матеріалу дослідження. Дефекти типу відшарувань та їх вплив на несучу здатність конструкцій. Конструкції з композитів дуже чутливі до технологічних дефектів, наприклад до розшарування, непроклеїв і тріщин, а також до знову утворених дефектів (наприклад, до надрізів поверхневих шарів). Дефекти типу розшарувань можуть з'являтися також на стадіях транспортування, зберігання та експлуатації. Вони можуть викликатися температурними напруженнями, локальними навантаженнями, наприклад, ударами по поверхні конструкції. Для поверхневого відшарування характерно випинання тонкої відшарованої ділянки, яке може відбуватися при стисненні, поверхневому нагріванні або розтягуванні через ефект Пуассона, тому механіка поверхневих відшарувань обов'язково повинна враховувати геометричну нелінійність хоча б для відшарованої області.

Типові приклади відшарувань наведені на рисунку 1. Процес відшарування вимагає енергетичних витрат, при цьому потенціальна енергія вигину накопичується лише у

відшаруванні, а робота руйнування складається з роботи, що витрачається на руйнування матричного прошарку та йде на просування тріщини у відшаруванні. Кожному типу відшарувань, наведених на рисунку 1, відповідають свої критерії та межі стійкості, що визначаються за Гріффітсом або Ейлером [9].

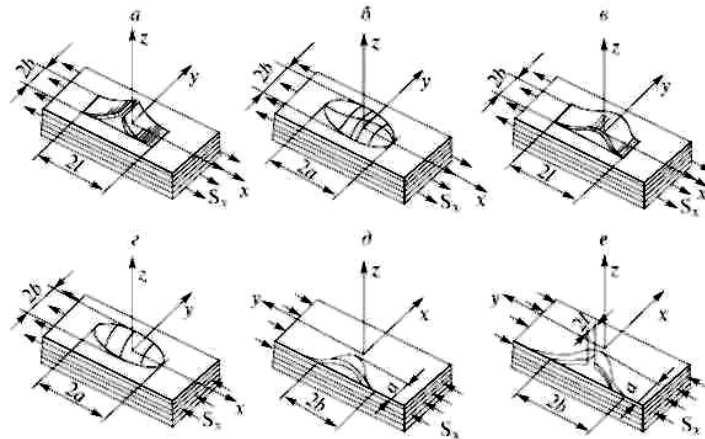


Рис. 1. Приклади відшарувань у композитах: а – відкрите відшарування при розтязї; б – еліпсоїдальне при розтягуванні; в – стисле в умовах циліндричного вигину; г – еліпсоїдальне при стисненні; д – кромочне; е – кромочне з вторинною тріщиною

Зростання відшарувань у шаруватих композитах при тривалодіючих або циклічних навантаженнях відбувається стійко, якщо параметри відшарування належать області стійкості за Гріффітсом. Однак при тривалому навантаженні в матриці та армуючих елементах виникають розсіяні ушкодження, що знижують опір відшарувань. Для розрахунку зростання розшарувань у стислих елементах потрібно враховувати енергію вигину, вивільняється при зростанні вираченими відшаруваннями. Деякі якісні особливості росту відшарування, зображеного на рисунку 1, в, наведені на рисунку 2. Криві 1–3 відповідають початковим станам. Крива 1 належить до випадку, коли початковий розмір відшарування досить великий, але початковий стан субрівноважний. Після закінчення інкубаційної стадії тривалістю t^* розмір l починає зростати.

Картина зростання відшарування якісно подібна до тієї, що спостерігається в випадку розтягнення. Крива 2 відповідає випадку, коли початковий стан так само субрівноважний, тому існує деяка нетривала інкубаційна стадія. Після підростання розшарування до нестійкого стану відбувається стрибок до нового субрівноважного стану. Новий розмір відшарування може бути оцінений, виходячи зі співвідношення енергетичного балансу. При стрибкоподібному зростанні відшарування міра пошкодження падає майже до нуля, оскільки фронт відшарування переходить в малопошкоджену область матричного прошарку (рис. 2, б, крива 3). Далі йде друга інкубаційна стадія. Після того як буде накопичено достатнє пошкодження, фронт відшарування знову стягується.

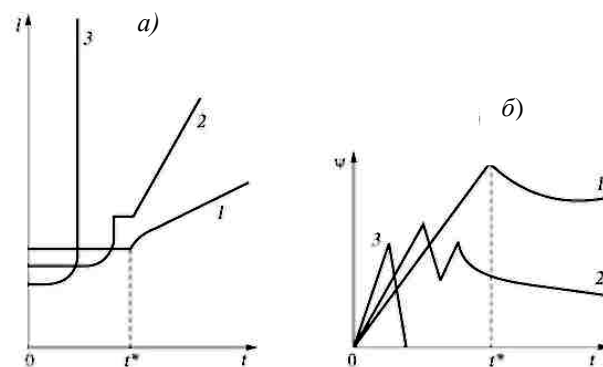


Рис. 2. Діаграма відшарувань в композиті при стисненні: а – зростання відшарувань; б – накопичення мікропошкоджень на фронті

Подальше зростання відбувається стійко. Крива 3 відповідає значенням відшарування, при яких початкова точка знаходиться в досить вузькій смузі, укладеній між областю, де відшарування немає, і областю, в якій відрізок стійкості зростання відшарування завершується повним відшаруванням зовнішнього шару. Значення критичної деформації для конструкційних композитів досить високі (близько 103 МПа), тому типова поведінка стислих відшарувань описується кривими 1 на рисунку 2, а, б.

Зазвичай вже у ненавантаженому елементі відшарування має початковий прогин, отриманий, наприклад, в процесі виготовлення.

Відшарування можуть відбуватися в шаруватих КМ при механічній обробці конструкції або деталі, певним технологічним процесом виготовлення.

Схеми руйнування композитів, що враховують взаємодію між процесом накопичення мікропошкоджень і фінальним руйнуванням наведені на рисунку 3 [5]. У початковому стані в композитах є початкові дефекти тієї ж природи, що й мікропошкодження. Після прикладання навантаження, враховуючи експлуатаційну, відбувається або крихке руйнування зразка, або йде процес накопичення мікропошкоджень.

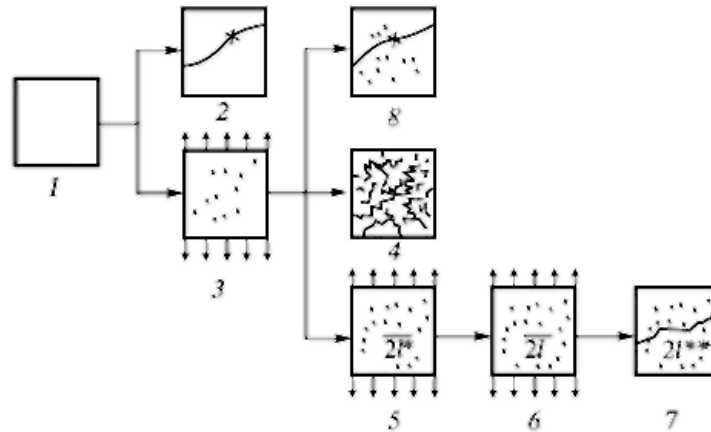


Рис. 3. Схеми етапів руйнування композитів: 1 – початковий стан; 2 – крихке руйнування; 3 – накопичення мікропошкоджень; 4 – руйнування внаслідок втрати цілісності; 5 – утворення макроскопічної тріщини; 6 – зростання макроскопічної тріщини; 7 – фінальне руйнування в результаті зростання макроскопічної тріщини; 8 – крихке руйнування як результат накопичення мікро пошкоджень; * – характерний розмір зародкової тріщини; ** – критичне значення тріщини

Результати аналізу інформації про частоту виникнення експлуатаційних пошкоджень в елементах із вуглепластика на АНТК ім. О.К. Антонова показують, що найбільш розповсюдженими серед експлуатаційних пошкоджень є пробоїни, тріщини, розшарування та зломи (рис. 4). З огляду на те, що пошкодження типу пробоїна та тріщина складають більше половини з усіх інших, то розробка технологічних методів ремонту даних пошкоджень є важливою практичною задачею.

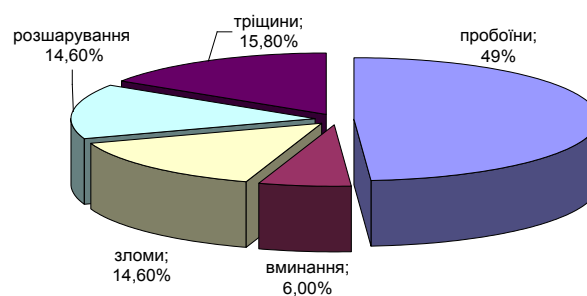


Рис. 4. Частота виникнення різних пошкоджень в елементах з вуглепластика

Якщо взяти загальну кількість появ дефектів розшарування на виході свердла з матеріалу (рис. 5, а) та на вході свердла у матеріал (рис. 5, б) у процентах, то у 70–80 % припадає на розшарування матеріалу на виході, решта – на розшарування на вході.

Коли свердять композиційний матеріал, шари композиційного матеріалу, що потрапляють під різальну кромку піддаються місцевій деформації на згин, яка являється причиною розшарування матеріалу навколо отвору ще до виходу різальної кромки свердла. На рисунку 6 зображено розшарування на виході свердла.

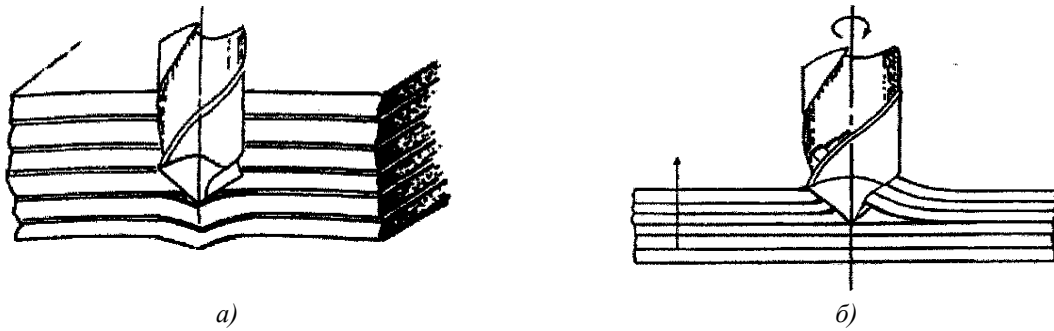


Рис. 5. розширення КПМ при свердлінні: а) на виході свердла;
б) на вході свердла в матеріал

Неважко уявити, що розширення потребує невеликих осьових зусиль та відбувається, коли значення товщини не зрізаного матеріалу стає меншим, і тому останній шар відшаровується дуже легко. Дані інтуїтивні прогнози повинні бути математично змодельовані для здійснення контролю при проектуванні інструменту для механічної обробки КМ. Далі наведена модель розширення композиційного матеріалу при свердлінні [11].

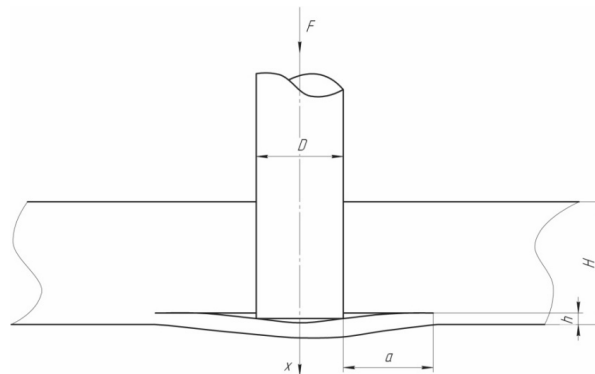


Рис. 6. Кругла листовая модель для аналізу процесу розширення при свердлінні композиційних матеріалів

На рисунку 6 зображений циліндр, який відіграє роль свердла, D – діаметр свердла; F – осьова сила; x – зміщення інструменту; H – товщина матеріалу; h – товщина, не зрізана інструментом; a – припустимий розмір існуючої тріщини.

Вираз для розрахунку критичного зусилля розширення:

$$F_{кр}(h) = \sqrt{\frac{8 G_{1c} E (H - h)^3}{3 (1 - \mu^2)}} \quad (1)$$

де E – модуль Юнга; K – показник інтенсивності навантажень; ν – коефіцієнт Пуассона; h – товщина шару матеріалу; G_{1c} – швидкість вивільнення енергії деформації при нормальному відриві.

Оскільки свердло рухається вниз, нерозрізаний прошарок під його дією виштовхується вниз і пружно деформується під дією осьової сили. Якщо напруження в кінці існуючої тріщини перевершує критичну величину, то відбувається розповсюдження тріщини.

Висновки. Розглянута схема розширення, описані причини та особливості процесу. Показане розширення на вході та виході свердла у матеріалі, а також подана кругла листовая модель для аналізу процесу розширення при свердлінні композиційних матеріалів.

Перспективами дослідження процесу розширення є розробка шляхів уникнення розширення. Для цього фундаментальним є створення математичної моделі процесу, а також підбір параметрів процесу механічної обробки та геометрії інструменту.

Список використаної літератури:

1. Акира Кобаяши Обработка пластмасс резанием / Акира Кобаяши. – М. : Вища школа, 1993. – 320 с.

2. Обробка отворів у композиційних матеріалах / *Н.А. Криштона та ін.* – К. : Техніка, 1980. – 126 с.
3. *Tsao C.C.* Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits / *C.C. Tsao, H.Hocheng* // *Journal of Materials Processing Technology.* – 140 (2003). – P. 335–339.
4. *Hocheng H.* Delamination during drillinf in composite laminates / *H.Hocheng, C.N.K. Dharan* // *J. of engineering for industry.* – 1995. – 112. – P. 236–239.
5. *Буров А.Е.* Моделирование разрушения и трещиностойкость волокнистых металлокомполитов / *А.Е. Буров, И.И. Кокшаров, В.В. Москвичев.* – Новосибирск : Наука, 2003. – 176 с.
6. *Воробей В.В.* Контроль качества изготовления и технология ремонта композитных конструкций / *В.В. Воробей, В.Б. Маркин.* – Новосибирск : Наука, 2005. – 190 с.
7. *Криштона Н.А.* Исследование и разработка способов и инструмента для сверления слоистых материалов : дис. канд. техн. наук. – К. : Б.И., 1974. – 208 с.
8. *Дударев А.С.* Перспективы механической обработки отверстий при производстве изделий из волокнистых композиционных материалов гражданской авиатехники / *А.С. Дударев, В.И. Ломаев* // *Технология машиностроения : науч.-техн. журнал.* 2006. – № 7. – С. 18–22.
9. *Raju S. Dave* Processing of composites,– with contributions from F. Abrams Distributed in the USA and in Canada by Hanser / *Raju S. Dave, Alfred C. Loos* // *Gardner Publications Inc.* – 2000. – 501 p.
10. *Булах І.О.* Механічна обробка композиційних матеріалів / *І.О. Булах, О.В. Глоба* // *Вісник ЧДТУ / Технічні науки.* – Чернігів : ЧДТУ, 2012. – № 2 (57). – С. 18–24.
11. *Глоба А.В.* Визначення зусилля розшарування при свердлінні полімерних композиційних матеріалів / *А.В. Глоба, О.А. Шевченко* // *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. пр.* – № 22. – Краматорськ, 2008. – С. 198–203.

БУЛАХ Ірина Олександрівна – аспірант кафедри Інтегрованих технологій машинобудування, Механіко-машинобудівного інститут, НТУУ «КПІ».

Наукові інтереси:

– обробка композиційних матеріалів.

ГЛОБА Олександр Васильович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри Інтегрованих технологій машинобудування, Механіко-машинобудівного інститут, НТУУ «КПІ».

Наукові інтереси:

– обробка композиційних матеріалів;

– теорія різання.

Стаття надійшла до редакції 05.01.2013

Булах І.О., Глоба О.В. Дефекти типу відшарувань і їх вплив на несучу здатність конструкцій з композиційних матеріалів

Булах И.А., Глоба А.В. Дефекты типа отслоений и их влияние на несущую способность конструкций из композиционных материалов

Булах I.O., Глоба O.V. The delamination defects and their influence on the bearing capacity of composite structures

УДК 621.91:678.5

Дефекты типа отслоений и их влияние на несущую способность конструкций из композиционных материалов / И.А. Буллах, А.В. Глоба

Рассмотрен процесс расслоения композиционных материалов при изготовлении, механической обработке и эксплуатации. Проанализирован механизм возникновения и распространения трещины. Описана модель расслоения при выходе сверла из материала.

УДК 621.91:678.5

The delamination defects and their influence on the bearing capacity of composite structures / I.O. Булах, О.В. Глоба

The delamination process of composite materials during the manufacture, machining and operation is considered. The emergence and spread mechanism of cracks is analyzed. A model of the bundle at the exit the drill from the material is named.