

**Богдан Дзюман<sup>1</sup>, Олексій Осипчук<sup>2</sup>, Олександр Охріменко<sup>3</sup>**<sup>1</sup>аспірант кафедри технології машинобудування

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

**E-mail:** [dzyumanbogdan@gmail.com](mailto:dzyumanbogdan@gmail.com), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0008-5928-4569><sup>2</sup>аспірант кафедри технології машинобудування

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

**E-mail:** [aleksei.osypchuk@gmail.com](mailto:aleksei.osypchuk@gmail.com), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7865-9484><sup>3</sup>доктор технічних наук, професор кафедри технології машинобудування

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

**E-mail:** [okhrimenko.oleksandr@iit.kpi.ua](mailto:okhrimenko.oleksandr@iit.kpi.ua), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5446-6987>**ResearcherID:** [M-2462-2017](https://orcid.org/0000-0002-5446-6987), **Scopus Author ID:** [57222590572](https://orcid.org/0000-0002-5446-6987)**ОСОБЛИВОСТІ СВЕРДЛІННЯ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ  
ТА ЇХНІЙ ВПЛИВ НА ДЕФЕКТИ ОБРОБКИ**

У сучасному світі композитні матеріали стали більш затребуваними і пов'язано це, в першу чергу, з розвитком машинобудування та авіабудування. Більшість підприємств має за мету покращення технічних характеристик виробу, але зменшення затрат часу, фінансів та виробничих відходів. Підраховано, що заміна 40 % конструкцій з алюмінію на ВПКМ призводить до зниження 12 % ваги конструкції, що покращує характеристики виробу. Технології виготовлення деталей, вузлів та складальних одиниць з композитних матеріалів є досить затребуваними та активно розвиваються. Вони розуміють собою виготовлення отворів з хорошою точністю та якістю.

У статті запропоновані методи оцінки розширення при свердлінні. Було проаналізовано причини утворення такого виду деформації, та спосіб їх вирішення. Детальний аналіз розширення показав, що для правильної оцінки розширення важливо враховувати площу розширення на вході та виході інструменту та площі міжшарових тріщини, що виникають безпосередньо у зоні різання

**Ключові слова:** свердло; розширення; різальний інструмент; композитний матеріал; КМ; обробка; ВПКМ.

Табл.: 1. Рис.: 17. Бібл.: 12.

**Актуальність теми дослідження.** Полягає у вивченні та аналізу особливостей композитних матеріалів, зокрема їх деформацію під час обробки різальним інструментом та оцінці ступеня пошкодження.

Композитні матеріали відіграють значну роль у сучасних галузях таких, як авіабудування та машинобудування. Їхніми перевагами є низька вага, висока міцність, жорсткість, низька теплопровідність.

Проте конструкції виготовлені з композитних матеріалів (далі – КМ) є досить чутливими до дефектів, таких як (розширення, непроклеї, міжшарові тріщини, сколи, витягування волокон). Розширення здебільшого утворюється під час механічної обробки КМ. Присутність такого дефекту суттєво знижує якість та міцність конструкції, що робить подальше її використання неможливим.

Таким чином аналіз, та виявлення дефектів під час їх обробки стає досить актуальним дослідженням для запобігання руйнуванню конструкцій з КМ та прогнозування їх ресурсу довговічності.

**Постановка проблеми.** Проаналізувати причини утворення розширення під час обробки КМ, методи запобігання таких деформації для подальшого дослідження. Побудова та визначення відношення таких факторів як вид пошкодження, його характеристика, оцінка розміру розширення та причини виникнення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблему розширення розглядали такі вчені як С. С. Tsao, Н. Hocheng, Brandon C. Gegg., С. Steven Suh., Albert C.J.Luo, Faraz, Mehta, Davim, Tsao, Nagarajan та ін. Під час дослідження було виявлено, що зміна режимів різання та геометрії інструменту значно впливають на процес утворення розширення, що дозволяє забезпечити конструкцію від утворення такої деформації.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Головною проблемою при дослідженні процесу розширення є правильна оцінка розширення, що має враховувати усі фактори цього явища. Ця проблема є маловивчена та недосліджена в наукових працях. Крім цього, планується розглянути перспективу для подальшого дослідження, що має на меті вирішення проблеми підвищення якості оброблюваних конструкцій та деталей з КМ.

**Метою статті.** Аналіз процесу розшарування композитних матеріалів. Дослідити механізм виникнення та поширення розшарування у процесі механічної обробки. Крім цього проаналізувати схеми розшарування, що виникають при обробці різальним інструментом і оцінити розмір та область пошкодження що виникла у процесі обробки отвору.

**Виклад основного матеріалу.** Будова та характеристика вуглецевого полімерного композитного матеріалу (далі - ВПКМ).

Міцність композитних матеріалів, а саме ВПКМ залежить від багатьох факторів. Через високу анізотропію властивостей одним з них є напрямок прикладеної сили відносно напрямку шару волокон (рис. 1) [1]. Через це застосування ВПКМ при тривимірному навантаженні є недоцільним так, як відбувається зменшення міцності.

Істотний вплив на механічні властивості ВПКМ є температура. Як правило, зі збільшенням температури зменшуються механічні властивості матриці. Низька температура теж впливає на волокнистий наповнювач матриці, але не так вагомо.

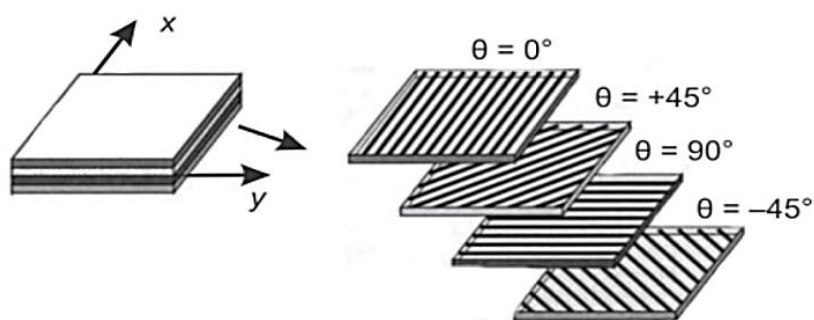


Рис. 1. Схема шарування матриці ВПКМ [1]

Питома міцності (границя міцності/густина) та жорсткість (модуль пружності/густина) ВПКМ більше чим у міцних аерокосмічних матеріалів, в тому числі і металів (рис.2)[1]. Це пояснює зазубуваність таких композитних матеріалів як вуглепластик у порівнянні з іншими матеріалами.

Але у ВПКМ існують і недоліки, що виникають при їх обробці та експлуатації. Про основні з них буде наведено нижче.

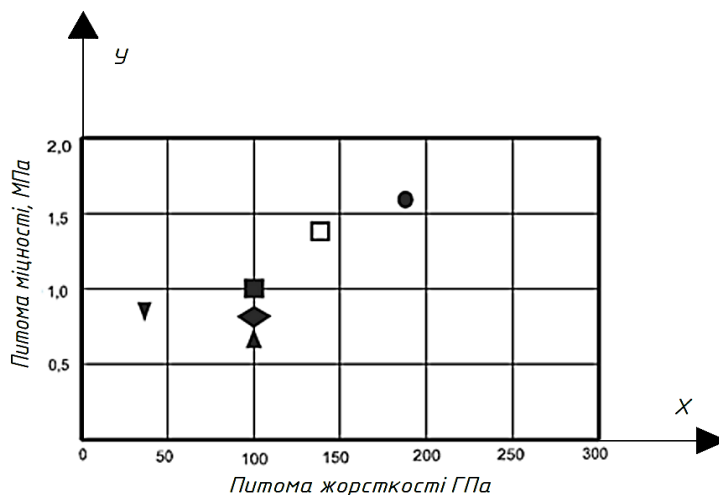


Рис. 2. Питома міцності жорсткість матеріалів [1]:

- ▼ - чавун;
- ◆ - сталь;
- ▲ - алюмінієвий сплав;
- - титановий сплав;
- - арамід;
- - вуглепластик

Поглинання вологи призводить до набухання матриці і знижує її механічні властивості. Крім того, набухання матриці запускає процес її теплового деформування при збільшенні температури. Деформація, яка виникла у результаті набухання може викликати вигини та кручення деталі з ВПКМ, що як наслідок вплине на експлуатаційні характеристики деталі. Під час циклів замерзання/відтаювання, поглинання вологи за рахунок циклічного збільшення об'єму (при замерзанні) і його зменшення (при відтаюванні), як правило, супроводжується тріщеноутворенням у матриці, що може призвести до розколу. При стрімкому підвищенні температури волога, що вбирається у матрицю, може перетворитись у пар, що може змінити (збільшити) напругу матриці. Утворювані внутрішні пари тиску можуть призвести до перевищення межі міцності ВПКМ та його розшаруванню.

Методи утворення отворів у композитних матеріалах ВПКМ.

Формування отворів для механічних з'єднань є одна з головних операцій у машинобудуванні та авіабудуванні. Для формування отворів у деталях можуть застосовуватись різні процеси, а саме: механічні різка, гідроабразивна різка, лазерна різка, електроерозійна різка. Однак специфічні складальні вузли значно звужують перелік можливих видів обробки, тому зупинимось на механічному процесі різання.

При обробці свердлінням, виникає осьова сила вздовж осі отвору, що при обробці ВПКМ викликає розшарування на вході та виході інструменту та утворення міжшарових тріщин. Тому одним із завдань у процесі свердління є зменшення осьової сили за рахунок модернізації геометрії різального інструменту (свердла) та визначенням оптимальних режимів різання.

Для підвищення стійкості інструменту застосовують нові інструментальні матеріали та покриття, вводять особливі вимоги до геометрії інструменту (округлення різальної кромки та форму робочих поверхонь).

Спіральне фрезерування - це альтернативний спосіб свердління отворів. У зарубжній літературі можна зустріти таку назву як «орбітальне свердління» (orbital drilling)[1]. Спіральне фрезерування являє собою фрезерування гвинтовою (спіральною) подачею. Пояснити таке фрезерування можна наступним чином: вісь обертання фрези зміщена відносно осі отвору, а сам інструмент відносно заготовки рухається по спіральній лінії. Завдяки такому руху кінематики у процесі спірального фрезерування виникають сили, які менші чим при звичайному свердлінні. Це забезпечує кращу якість отвору за рахунок зменшення розшарування, тому що стружка при таких рухах краще видаляється із зони різання та виключає пошкодження вже оброблених поверхонь. Також слід зазначити, що відсутність постійного контакту лез інструменту із заготовкою за принципом «різання – відпочинок», зменшує температуру та нагрів інструменту, і температуру що діє на заготовку, тому це теж покращує якість отвору та стійкість інструменту.

Аналіз деформацій та причини їх утворення.

Показники якості отворів у деталях з ВПКМ включають у себе такі показники: розмірна точність, погіршеність форми отвору, шорсткість та показники пошкодження обробленої поверхні.(розшарування, сколи кромки, витягування волокон, термічні деформації, розпушування, велика шорсткість, тріщини) (рис. 3, табл. 1). Характерним пошкодженням є міжшарові тріщини, через не дорізання шарів, що розшаровуються на вході інструменту не всі волокна зрізаються, якщо цих волокон мало, вони формують задирки, якщо їх багато, то відбувається розпушування волокон. Відомо що 60% браку деталей з композитних матеріалів при складанні літальних апаратів виникає через пошкодження отворів при їх обробці[1].

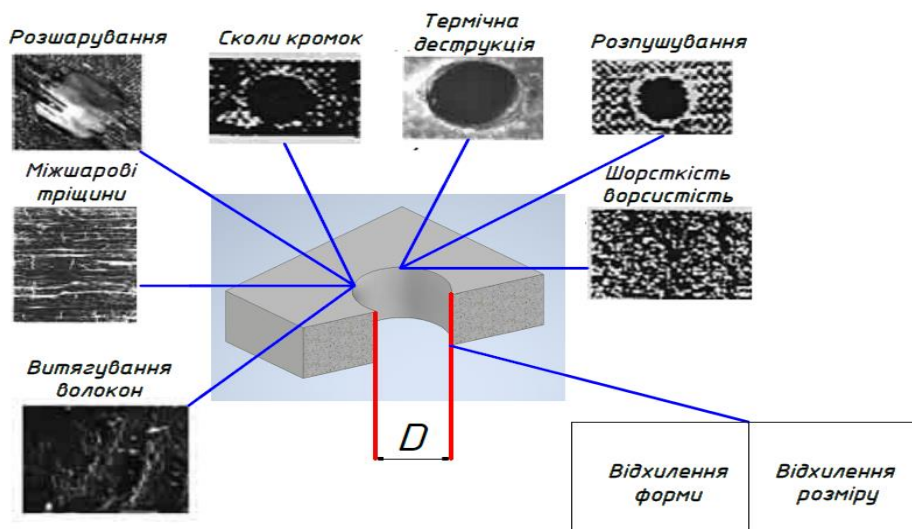


Рис. 3. Види деформацій отворів у композитних матеріалів з ВПКМ [1]

Табл. 1. Види та характеристика деформацій отворів деталей з ВПКМ [1]

Вид деформації	Характеристика деформації	Причина виникнення деформації
Розшарування зовнішніх шарів на поверхні врізання різального інструменту	Рівномірне утворення розшарування шарів поверхні врізання інструменту	Сила різання на перемичці та на стрічці інструменту більша чим міцність міжшарових з'єднань верхніх шарів заготовки
Розшарування зовнішніх шарів на поверхні виходу різального інструменту	Рівномірне утворення розшарування шарів поверхні на виході інструменту	Осьова сила різання, що діє на не зрізані шари ВПКМ, більше міцності міжшарових з'єднань нижніх шарів заготовки
Задирки	Частина волокон на виході інструменту з отвору залишається недорізаною	Недорізани нижні шари через їх деформацію та відслоювання нижнього шару
Міжшарові тріщини	Формуються тріщини між шарами ВПКМ у середині отвору	Осьова сила різання більше міцності міжшарових з'єднань
Витягування волокон	Витягування волокон з матриці	Мала адгезія волокон у матриці при данні осьові силі
Скол кромки	Мікроруйнування кромки отвору	Підвищена крихкість ВПКМ та вібрації при обробці
Термічна деструкція	Пошкодження поверхні отвору через підвищену температуру	Температура різання більше граничної ВПКМ (КМ)

Найбільш поширеною є деформація розшарування, що являє собою розділення поверхні шарів ВПКМ під дією осьових сил, що виникають у процесі різання. Цей вид деформації обумовлений тим, що вісь отвору, як правило, розміщується перпендикулярно площині волокон і діючій силі різання, що намагаються відірвати один шар від іншого.

Залежно від причин виникнення деформації можна спостерігати (розшарування зовнішніх шарів на поверхні врізання різального інструменту та розшарування зовнішніх шарів на поверхні виходу різального інструменту). Цей вид деформацій відрізняється від міжшарових тріщин тим, що формується винятково на поверхнях заготовки (рис. 4, 5, 6) [1; 2].

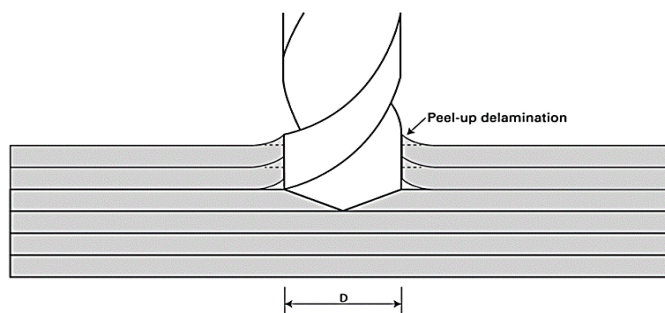


Рис. 4. Схема деформацій розшарування на вході інструменту [2]

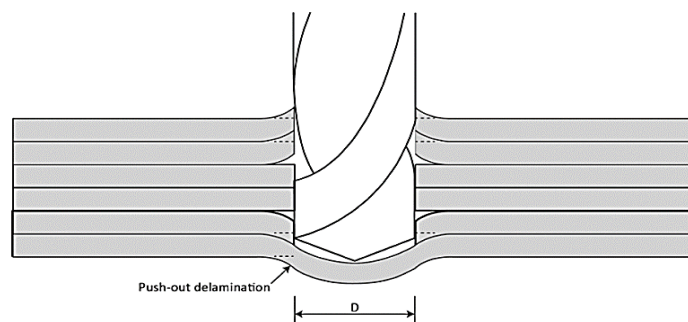


Рис. 5. Схема деформації розшарування на виході інструменту [2]

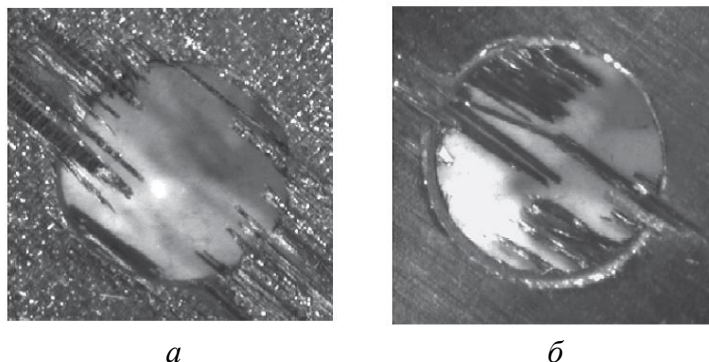


Рис. 6. Приклад розшарування зовнішніх шарів [1]:  
а – при врізанні інструменту; б – при виході інструменту

До основних причин розшарування навіть при обробці «гострим» інструментом (свердлом) можна віднести: розшарування зовнішніх шарів на поверхні врізання – наявність від’ємних кутів на перемичці інструменту (свердло); розшарування зовнішніх шарів на поверхні виходу різального інструменту – велика подача.

Також розшарування зовнішніх шарів на поверхні врізання різального інструменту виникає внаслідок дій сили, що притискають верхні шари ВПКМ до робочих поверхонь свердла (рис. 4, 5, 6) [2]. Частина зрізаного матеріалу (стружка) накручується у стружко відвідний канал свердла та ущільнюється ще до того, як він буде повністю відділений від шару ВПКМ. У результаті чого в зоні його контакту, що формується та обробленою поверхнею виникає сила тертя, ця сила призводить до розшарування шарових зв’язків матриці. Отже, схильність до розшарування на поверхні врізання визначається властивостями матеріалу інструменту, режимами різання, конструкцією інструменту та силами різання.

Розшарування зовнішніх шарів на поверхні виходу інструменту виникає внаслідок – пошкодження міжшарових зонах нижніх шарів ВПКМ при виході інструменту з заготовки. Ця деформація характеризується наслідком дій осьової сили різання на ще не повністю розрізанні шари заготовки. Під дією осьової сили ще необроблені шари вигинаються, що призводить до порушень умов міцності між шарами матриці, формуючи та поширюючи тріщини у їх з’єднаннях та розриву адгезійного зв’язку, утворюючи розшарування. Експериментально доведено, що при свердлінні розшарування на поверхні врізання набагато менше, чим на поверхні виходу інструменту [13]. Область пошкодження навколо отвору на вході та виходу часто має еліптичну форму, при чому вісь цього еліпса орієнтується вздовж напрямлення волокон (рис. 7) [1]. Залежно від властивостей волокон оброблюваного ВПКМ та схеми матриці укладання (рис.1) [1]. Пошкодження можуть мати вигляд задирок або розпушування. Задирки являють собою окремі незрізані волокна, а розпушування – велике число незрізаних волокон по периметру отвору. Розпушування

виникає в області різання гострим кутом направлення волокон відносно різального інструменту, в умовах коли обробка виконується інструментом з збільшеним радіусом заокруглення різальної кромки (рис. 8) [2].

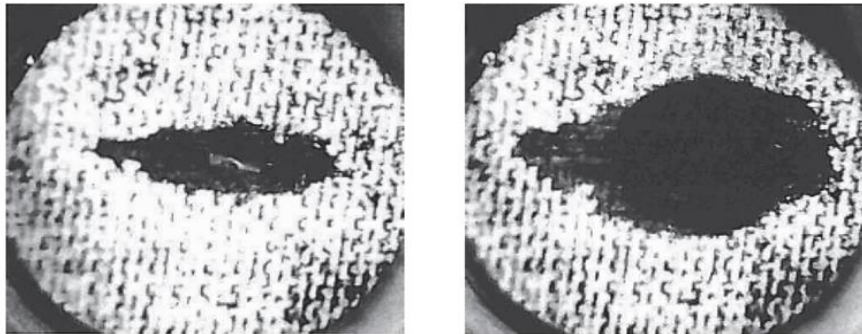


Рис. 7. Приклад розшарування (еліптичної форми) [1]

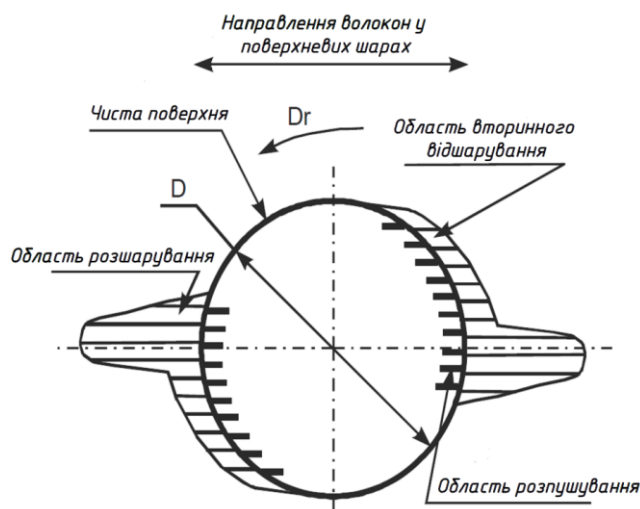


Рис. 8. Схема формування задирок та розпушування

Для кількісної характеристики розшарування використовують наступні коефіцієнти: Коефіцієнт розшарування  $Fd$  - являє собою відношення максимального діаметра пошкодженої області  $D_{max}$  до номінального діаметра отвору  $D$  (рис. 9) [3].

$$Fd = \frac{D_{max}}{D}, \tag{1}$$

де  $Fd$  – коефіцієнт розшарування;  
 $D_{max}$  – максимальний діаметр пошкодженої області;  
 $D$  – номінальний діаметр отвору.

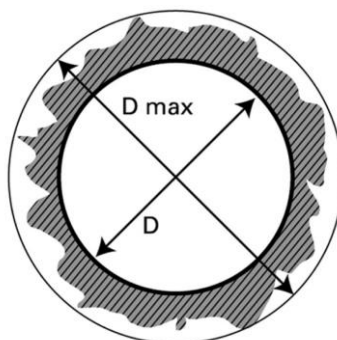


Рис. 9. Схема оцінки коефіцієнта розшарування [2]

Розмір розшарування (рис. 10)[4],[2]- представляє собою різницю між максимальним радіусом пошкодженої ділянки  $R_{max}$  і радіусом просвердленого отвору  $R$

Формула для розрахунку розміру розшарування:

$$R_{max} - R = D_{роз} \tag{2}$$

де  $D_{роз}$  – розмір розшарування;  
 $R_{max}$  – максимальний радіус пошкодження;  
 $R$  - радіус оброблюваного отвору.

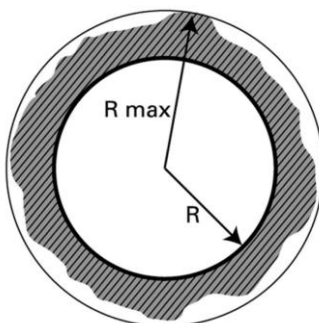


Рис. 10. Схема оцінки розміру розшарування [2]

Як зазначив Faraz A.[5] коефіцієнт  $Fd$  (рис. 9) [2], [5], може неповністю відобразити розшарування. Він пояснював це тим, що декілька розшарованих волокон можуть мати великий радіус із невеликою периферією отвору (рис. 11) [5]. Тому Faraz запропонував для повноти картини коефіцієнт двовимірного розшарування  $Fa$ , він дає більш чітку інформацію на розподіл розшарування навколо отвору.

Формула для розрахунку двовимірного розшарування:

$$Fa = \left( \frac{A_d}{A_{nom}} \right) \% \tag{3}$$

де  $Fa$  – коефіцієнт двовимірного розшарування;  
 $A_d$  - область пошкодження;  
 $A_{nom}$  – номінальна площа свердління.

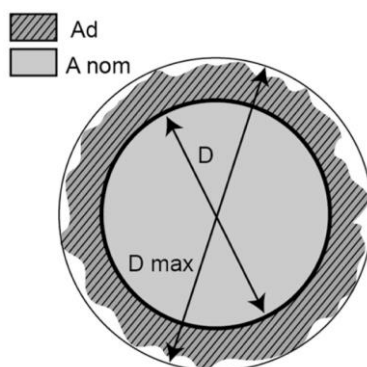


Рис. 11. Схема оцінки коефіцієнта двовимірного розшарування [2]

Але слід враховувати, що метод двовимірного розшарування може бути не точним (рис. 12) [5]. На цьому рисунку ми бачимо, що область розшарування варіантів *a*) та *b*) з однаковим коефіцієнтом  $Fa$ , але ж зразок на варіанті *b*) має більшу схильність до руйнування при меншому навантаженні, ніж варіант *a*). Пояснюється це тим, що Faraz у своєму методі не враховував внесок тріщин у пошкодження від розшарування. Метод двовимірного розшарування враховує лише розшаровану область.

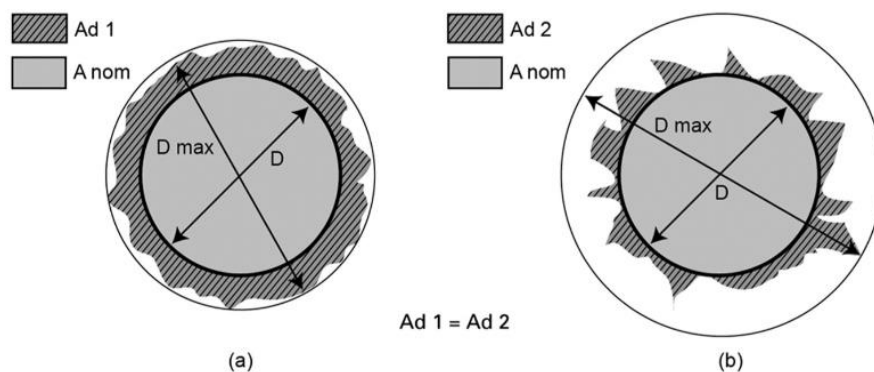


Рис. 12. Діаграма пошкодження від розшарування [2]

а – рівномірне пошкодження; б – не рівномірне пошкодження з тріщинами

Mehta M. [6], та інші пропонують коефіцієнт пошкодження  $D_{RAT}$ , що визначає відношення площі пошкодження на периферію отвору  $D_{MAR}$  до номінальної площі отвору  $D_{AVG}$  [6].

$$D_{RAT} = \frac{D_{MAR}}{D_{AVG}}, \tag{4}$$

де  $D_{RAT}$  – коефіцієнт пошкодження;  
 $D_{MAR}$  – площа пошкодження;  
 $D_{AVG}$  – площа отвору.

Коефіцієнт пошкодження  $D_{RAT}$  подібний до двовимірного, але визначається як коефіцієнт, а не відсоток. Метод має ті ж недоліки, що і двовимірний.

Коефіцієнт розшарування  $F_d$  запропонований Mohan N.S. [7] визначає відношення площі розшарування до площі номінальної площі отвору.

Формула для розрахунку коефіцієнта розшарування  $F_d$  обчислюється:

$$F_d = \frac{A_d}{A}, \tag{5}$$

де  $A_d$  - сумарна площа отвору та відшарування;  
 $A$  – номінальна площа отвору.

Метод запропонований Mohan, має ті ж недоліки, що і згадані вище.

Оскільки коефіцієнт розшарування  $F_d$  (5) не відповідає дійсним величинам розшарування, тому що не враховує площу розшарування, а метод двовимірного коефіцієнта розшарування  $F_a$  (3) не враховує довжину тріщин розшарування при оцінці розшарування. Davim J.P.[8] запропонував інший підхід до розрахунку, який називається скоригований коефіцієнт розшарування  $F_{da}$  (6), який схематично зображений на (рис. 13) [2].

Пояснення скорегованого коефіцієнта розшарування наступне: перша частина рівняння (6) є умовним коефіцієнтом розшарування  $F_d$  (5), що відображає пошкодження тріщини, а друга розмір площі пошкодження  $F_a$  (3)  $D_{RAT}$  (4).

$$F_{da} = F_d + \frac{A_d(F_d^2 - F_d)}{A_{max} - A_0}, \tag{6}$$

де  $A_{max}$  – це площа, що відповідає  $D_{max}$ ;  
 $A_0$  – це площа, що відповідає  $D_0$ ;  
 $D_0$  – діаметр отвору.



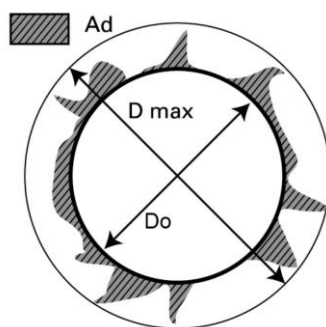


Рис. 13. Схема оцінки скоригованого коефіцієнта розшарування [2]

Цей метод більш прийнятний ніж ті, що наведені вище, оскільки він враховує довжини тріщин і розмір пошкодженої області (рис. 14)[2]. варіант *a*), *b*), *c*). Проте цей метод може бути неточним для варіанту *b*) – (рис. 14)[2], на цьому варіанті зображений випадок з великою кількістю дрібних тріщин, що становлять невелику площу.

Отже, коефіцієнт розшарування *Fda* для варіантів *a*), *c*), може бути однаковий, але варіант *b*) може бути схильний до помилкового значення *Fda* при малих навантаженнях. Більше того у цьому варіанті пошкоджена область *Ad* має множинний вплив на коефіцієнт *Fda*, що призведе до високих значень цього показника [2].

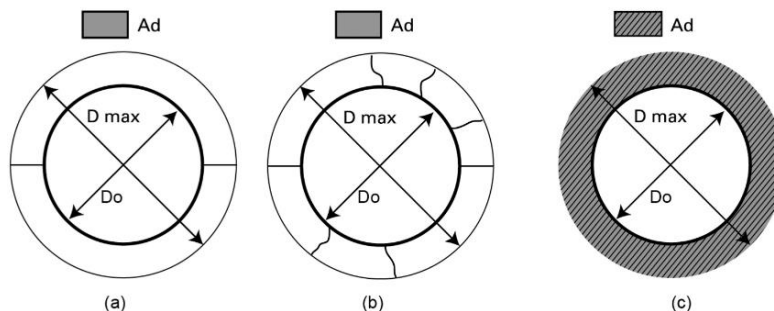


Рис. 14. Схематична діаграма пошкодження від розшарування [2]:

*a* – дрібні тріщини; *b* – велика кількість тріщин; *c* – максимальна площа відшарування

Скоригований коефіцієнт розшарування - *Fda* не має прямої кореляції з *Fa* і здебільшого як і методи, що наведені вище, може перевищувати значення фактору. Тому Tsao С.С. [9] запропонував визначати розшарування за еквівалентним коефіцієнтом розшарування *Fed* (рис.15) [2], що розраховується за формулою (7) [9].

$$F_{ed} = \frac{D_e}{D_0}, \tag{7}$$

де *D<sub>e</sub>* – еквівалентний діаметр, який можна розрахувати за формулою (8) [9].

$$D_e = \left[ \frac{4(A_d + A_0)}{\pi} \right]^{0,5}, \tag{8}$$

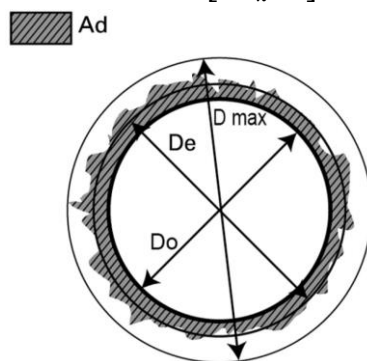


Рис.15 Схема визначення еквівалентного коефіцієнта розшарування [2]

Метод еквівалентного коефіцієнту розшарування  $F_{ed}$  теж може давати похибку, це пояснюється на (рис. 16) [2]. На цьому рисунку запропонована та ж схема розшарування для варіанту *a*) та *b*), а отже варіант *b*) має теж більшу схильність до руйнування при малих навантаженнях, ніж варіант *a*). Отже, цей метод показує те, що вплив тріщин на пошкодження є незначним. Основною увагою у цьому методі є пошкодження області, що утворилась внаслідок розшарування. Тому був запропонований наступний метод виміру розшарування, що використовував у своїй роботі Nagarajan V.A.[10] – уточнений коефіцієнт розшарування  $F_{DR}$ .

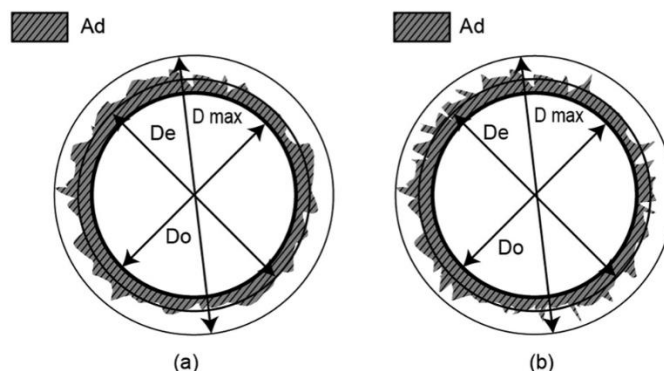


Рис. 16. Схема пошкодження від розшарування:  
*a* – рівномірне пошкодження; *b* – пошкодження з тріщинами [2]

Уточнений коефіцієнт розшарування ( $F_{DR}$ ) - Nagarajan запропонував розділити загальну площу розшарування на три зони, а саме ( $A_H$ ) – площа сильного розшарування, ( $A_M$ ) – площа середнього розшарування та ( $A_L$ ) – площа малого розшарування. Ступінь пошкодження, яких визначається на основі глибини пошкодження. З допомогою програмного пакету MATLAB та Пі-теореми Букінгема він зміг пояснити це кількісно, що дало змогу виразити рівняння уточненого коефіцієнта розшарування ( $F_{DR}$ ) (9)[10].

$$F_{DR} = \frac{D_{max}}{D_o} + 1,783 \left( \frac{A_H}{A_o} \right) + 0,7156 \left( \frac{A_M}{A_o} \right)^2 + 0,03692 \left( \frac{A_L}{A_o} \right)^3. \quad (9)$$

Цей метод є більш ефективний, так як враховує усі складові розшарування перелічені вище. Nagarajan провів декілька експериментів, щоб підтвердити свій метод, але його досліди обмежувались одним незмінним параметром, що був однаковий для усіх зразків, а саме швидкістю шпинделя  $V=1400$  об/хв, що не дає змогу оцінити цей метод повністю.

Таким чином, для підтвердження методу уточненого коефіцієнту розшарування ( $F_{DR}$ ) потрібно провести більше експериментів зі зразками при різних швидкостях обертання.

Також слід відмітити ще один такий фактор, як круглість форми його запропонував Dugao, який враховує форму пошкодженої області при визначенні розшарування. Цей метод визначається шляхом розрахунку подібності форми відшарованої області у порівнянні з колом рівного параметра[11].

Круглість форми при оцінці розшарування визначається за формулою:

$$f = 4\pi \frac{A_e}{P^2}, \quad (10)$$

Цей метод пояснюється тим, що коли область пошкодження нагадує коло, то круглість буде рівна 1, а коли витягнутою, то буде рівна 0. Цей метод орієнтується на форму пошкодження області. У своєму дослідженні Dugao дійшов висновку, що використання свердла із швидкорізальної сталі при обробці призводять до більш круглої форми пошкодженої області, тоді як твердосплавні не впливають на форму пошкодження. Але цей метод не є правильним тому як, він не зміг встановити зв'язок кореляції між круглістю та довжиною пошкоджень.

Отже, метод круглості форми не може оцінювати ступінь розшарування.

Одним із противників вище перерахованих методів був Da Silva, який підійшов до оцінки області розшарування з іншого боку. Він запропонував інший підхід до визначення пошкодження, що виникає при свердлінні і назвав його мінімальний коефіцієнт розшарування  $Fd_{\min}$  [12]. Da Silva припустив, що визначення фактору розшарування базується на тому, щоб легко порівняти отримані результати пошкодження різними методами свердління. Він пояснював його тим, що якщо мета оцінки пошкодження полягає в кількісній характеристиці, то форма пошкодження не є важлива і правильна. Оцінка розшарування має базуватись на найменшій площі, яка містить усі пошкодження, що виникають при свердлінні [12]. Коефіцієнт  $Fd_{\min}$  схожий на коефіцієнт  $Fd(1)$ , що зображений на (рис. 9), однак у його методі акцент робиться на мінімізацію. Це досягається шляхом проведення найменшого кола, що охоплює всю область пошкодження і його центр може збігатись або не збігатись з центром обробленого отвору.

Мінімальний коефіцієнт розшарування  $Fd_{\min}$  зображений на (рис. 17) [2] та розраховується за формулою (11) [12].

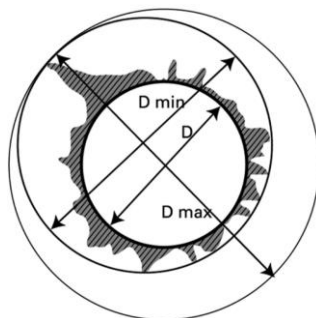


Рис. 17. Схема оцінка мінімального коефіцієнта розшарування [2]

$$Fd_{\min} = \frac{D_{\min}}{D}, \quad (11)$$

Метод Da Silva використовує концепцію мінімальних пошкоджень, що виникають при свердлінні і дає змогу порівнювати різні методи пошкоджень при свердлінні.

Його результати не дуже відрізняються від результатів, що виникають при оцінці методу вимірювання коефіцієнта розшарування  $Fd(1)$ , коли пошкодження є рівномірними навколо обробленого отвору, оскільки центр мінімальної області розшарування буде наближений до центру отвору (рис. 17)[2]

Отже, цей метод нехтує внеском площі та форми пошкодженої області в оцінці розшарування.

На практиці дослідниками були розроблені різні методи вимірювання, що включають такі розмірні параметри, як довжина та площа. Інсуочі методи вимірювання розшарування, що використовувались наведені нижче: мікроскопія Tagliaferri V. [14], обробка зображень Khashaba U.A. [15], акустична емісія Hocheng H. J. [16], рентгенографія [12], рентгенівська комп'ютерна томографія Hounsfield G.H.[17] та інші.

**Висновки.** Сьогодні композитні матеріали затребуванні в різних сферах промисловості і їх галузь застосування буде тільки зростати. Пояснюється це тим, що деталі з композитних матеріалів, а саме ВПКМ мають кращі експлуатаційні характеристики (легкість, собівартість, та міцність) ніж інші конструкційні матеріали.

Але деталі виготовлені з ВПКМ мають ряд недоліків, що виникають під час механічної обробки (процесу свердління), а саме деформації, що мають назву розшарування. У даній статі було з'ясовано, як правильно оцінити розмір розшарування та причини його утворення аби запобігати цьому в подальшому та збільшити ресурс експлуатації деталей з ВПКМ. Також при вивченні методів оцінки розшарування було з'ясовано, що метод – уточненого коефіцієнта розшарування  $F_{DR}$  який запропонував Nagarajan [10] є найбільш підходящим для подальших досліджень тому що цей метод враховував площу усіх пошкоджень що виникають при свердлінні.

Отже під час обробки ВПКМ свердлом виникають деформації, а саме (витягування волокон, міжшарові тріщини, розпушування, розшарування та ін.). Причини утворення розшарування є неправильно підібрані режими різання і неправильна або непідходяща геометрична форма свердла (кут загострення, форма каналу відводу стружки та покриття), що є дуже важливим фактором адже розшарування за часту виникають саме при вході та виході інструменту з отвору деталі.

Подальші дослідження у цьому напрямку будуть спрямовані саме на покращення цих параметрів.

### Список використаних джерел

1. Механическая обработка композиционных материалов при сборке летальных аппаратов (аналитический обзор) / Д. В. Криворучко, В. А. Залого, В. А. Колесник и др. ; по общей ред. проф. В. А. Залого. – Сумы : Университетская книга , 2013. – 272 с.
2. Assessment of delamination in composite materials: A review. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B / J. Babu, T. Sunny, N. A. Paul, K. P. Mohan, J. Philip, J.P. Davim // Journal of Engineering Manufacture. – 2016. – № 230(11). – Pp. 1990-2003.
3. Chen, W. C. Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates / W. C. Chen // Int J Mach Tool Manu. – 1997. – № 37(8). – P. 1097-1108.
4. Sonbaty, E. I. Factors affecting the machinability of GFR/epoxy composites / E. I. Sonbaty, U. A. Khashaba, T. Machaly // Compos Struct. – 2019. – № 63. – Pp. 329-338.
5. Faraz, A. Cutting edge rounding: an innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates / A. Faraz, D. Biermann, K. Weinert // Int J Mach Tool Manu. – 2009. – № 49. – Pp. 1185-1196.
6. Mehta, M. Effect of fastener hole drilling anomalies on structural integrity of PMR-15/Gr composite laminates / M. Mehta, T. J. Reinhart, A. H. Soni // Proceedings of the machining composite materials symposium: ASM materials week (Chicago, IL, 1-5 November 1992). – Chicago, 1992. – Pp. 113-126.
7. Mohan, N. S. Delamination analysis in drilling process of glass fiber reinforced plastic (GFRP) composite materials / N. S. Mohan, S.M. Kulkarni, A. Ramachandra // J Mater Process Tech. – 2007. – № 186. – Pp. 265-271.
8. Davim, J. P. A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates / J. P. Davim, J. C. Campos Rubio, A. M. Abrão // Compos Sci Technol. – 2007. – № 67. – Pp. 1939-1945.
9. Tsao, C. C. Evaluation of a novel approach to a delamination factor after drilling composite laminates using a core-saw drill / C. C. Tsao, K. L. Kuo, I. C. Hsu // Int J Adv Manuf Tech. – 2012. – № 59. – Pp. 617-622.
10. Nagarajan V. A. A digital image analysis to evaluate delamination factor for wind turbine composite laminate blade / V. A. Nagarajan, S. J. Rajadurai, A. T. Kumar // Compos Part B Eng. – 2012. – № 43. – P. 3153-3159.
11. Damage evaluation of drilled carbon/epoxy laminates based on area assessment methods / L. M. P. Durão, M. R. S. Tavares, V. H. C de Albuquerque, D. J. S. Gonçalves // Compos Struct. – 2013. – № 96. – Pp. 576-583.
12. Da Silva D. N. R. Image processing methodology for assessment of drilling induced damage in CFRP : Thesis [Electronic resource] / Da D. N. R. Silva ; Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa. – Lisboa, 2013. – Access mode: <http://hdl.handle.net/10362/9866>.
13. Durao, L. M. Machining of hybrid composit. Ph. D : dissertation: 05.03.0 1 / L. M. Durao. – Porto, 2005. – 2024 p.
14. Caprino G. Damage development in drilling glass fiber reinforced plastics / G. Caprino, V. Tagliaferri // Int J Mach Tool Manu. – 1995. – № 35(6). – Pp. 817-829.
15. Khashaba, U. A. Delamination in drilling GFR-thermoset composites / U. A. Khashaba // Compos Struct. – 2004. – № 63. – Pp. 313-327.
16. Hocheng, H. J. Reliability monitoring in drilling electronic circuit boards / H. J. Hocheng // ASME Trans J Electron Package. – 1991. – № 113. – Pp. 263-267.
17. Hounsfield, G. H. Computerized transverse axial scanning (tomography). Part-I. Description of system / G. H. Hounsfield // Br J Radiol. – 1973. – № 46. –Pp. 1016-1022.

### References

1. Krivoruchko, D.V., Zaloga, V.A. (ed.), Kolesnik, V.A., etc. (2013). *Mekhanicheskaia obrabotka kompozytsionnykh materialov pry sborke letalnykh apparatov (analytycheskyi obzor) [Mechanical processing of composite materials during the assembly of aircraft]*. University Book.

2. Babu, J., Sunny, T., Paul, N.A., Mohan, K.P., Philip, J., Davim, J.P. (2016). Assessment of delamination in composite materials. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 230(11), 1990-2003.
3. Chen, W.C. Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates. *Int J Mach Tool Manu* 1997; 37(8): 1097–1108.
4. Sonbaty, E., Khashaba, U.A., Machaly, T. (2019). Factors affecting the machinability of GFR/epoxy composites. *Compos Struct*, 63, 329–338.
5. Faraz, A., Biermann, D., Weinert, K. (2009). Cutting edge rounding: an innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates. *Int J Mach Tool Manu*, 49, 1185–1196.
6. Mehta, M., Reinhart, T.J., Soni, A.H. (1992). Effect of fastener hole drilling anomalies on structural integrity of PMR-15/Gr composite laminates. *Proceedings of the machining composite materials symposium: ASM materials week*. (PP. 113–126). Chicago, IL.
7. Mohan, N.S., Kulkarni, S.M., Ramachandra, A. (2007). Delamination analysis in drilling process of glass fiber reinforced plastic (GFRP) composite materials. *J Mater Process Tech*, 186, 265–271.
8. Davim, J.P., Campos Rubio, J.C., Abrão, A.M. (2007). A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates. *Compos Sci Technol*, 67, 1939–1945.
9. Tsao, C.C., Kuo, K.L., Hsu, I.C. (2012). Evaluation of a novel approach to a delamination factor after drilling composite laminates using a core-saw drill. *Int J Adv Manuf Tech*, 59, 617–622.
10. Nagarajan, V.A., Selwin Rajadurai, J., Annil Kumar, T. (2012). A digital image analysis to evaluate delamination factor for wind turbine composite laminate blade. *Compos Part B Eng*, 43, 3153–3159.
11. Durão, L.M., Tavares, M.R.S., de Albuquerque, V.H.C. (2013). Damage evaluation of drilled carbon/epoxy laminates based on area assessment methods. *Compos Struct*, 96, 576–583.
12. Da Silva, D.N.R. (2013). Image processing methodology for assessment of drilling induced damage in CFRP. Thesis 2013; Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.
13. Durao, L.M. (2005). Machining of hybrid composit. Ph. D. dissertation : 05.03.01.
14. Caprino, G., Tagliaferri, V. (1995). Damage development in drilling glass fiber reinforced plastics. *Int J Mach Tool Manu*, 35(6), 817–829.
15. Khashaba, U.A. (2004). Delamination in drilling GFR-thermoset composites. *Compos Struct*, 63, 313–327.
16. Hocheng, H. J. (1991). Reliability monitoring in drilling electronic circuit boards. *ASME Trans J Electron Package*, 113, 263–267.
17. Hounsfield, G.H. (1973). Computerized transverse axial scanning (tomography). Part-I. Description of system. *Br J Radiol*, 46, 1016–1022.

Отримано 22.03.2024

UDC 621.7

**Bogdan Dzyuman<sup>1</sup>, Oleksii Osypchuk<sup>2</sup>, Oleksandr Okhrimenko<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>PhD-student of the Department of Manufacturing Engineering  
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)  
**E-mail:** [dzyumanbogdan@gmail.com](mailto:dzyumanbogdan@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0008-5928-4569>

<sup>2</sup>PhD-student of the Department of Manufacturing Engineering  
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)  
**E-mail:** [aleksei.osypchuk@gmail.com](mailto:aleksei.osypchuk@gmail.com) **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7865-9484>

<sup>3</sup>Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology  
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)  
**E-mail:** [okhrimenko.oleksandr@ill.kpi.ua](mailto:okhrimenko.oleksandr@ill.kpi.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5446-6987>  
**ResearcherID:** [M-2462-2017](https://orcid.org/0000-0002-5446-6987). **Scopus Author ID:** [57222590572](https://orcid.org/0000-0002-5446-6987)

## **FEATURES OF DRILLING COMPOSITE MATERIALS AND THEIR INFLUENCE ON PROCESSING DEFECTS**

*This article is a review. Presented in the article information is an overview.*

*In the modern world, composite materials have become more in demand and this is connected to the rapid development of mechanical engineering and aircraft construction. Most companies aim to improve the performance of their product and reduce the cost of manufacturing time, financing and production waste.*

*The technology of manufacturing parts, assemblies and assembly units from composite materials is rapidly developing, but there are still a number of unresolved problems arising during their processing. The effect of delamination on the quality of the hole being processed is one of them. The quality of the opening is one of the main parameters of any design, how exactly this element can be used as a connecting element, which is responsible for the entire future assembly unit.*

*When processing holes with a drill, a defect often occurs - delamination, which subsequently affects the quality and ability of the part to perform its functions. The problem of delamination in parts made of fibrous polymer composite materials is poorly studied. Therefore, the purpose of this article is to review existing problems and methods of solving them. Stratifications that occur during the processing of holes are mostly formed as a result of incorrectly selected cutting modes, namely feed ( $S$ ) and tool rotation speed ( $V$ ), which in turn leads to a number of defects: cracks, chips, pulling out fibers, loosening) and with the subsequent formation of delamination. This article examined how important and correct it is to assess the size and area of damage during delamination in order to understand how to prevent this process.*

*Therefore, after analyzing scientific works and understanding the process of formation of delamination, namely its assessment and its distribution in the treated area, it is possible to understand that the assessment of the size of delamination should take into account the following factors: the maximum diameter of the damaged area, the number and density of interlayer cracks, the area of delamination and cutting modes .*

*Optimizing cutting modes and improving the geometric shape of the cutting tool makes it possible to minimize or even eliminate the delamination process for parts made of SPCM.*

**Keywords:** *drill, layering, cutting tool, composite material, CM, processing, SPCM.*

*Table: 1. Fig.: 17. References: 12.*