

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНСТРУМЕНТА ДЛЯ КОНТУРНОГО РОЗРІЗАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Юрій Адаменко

кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
просп. Перемоги, 37, Київ, Україна, 03056, yuriy.adamenko@ukr.net

ORCID: 0000-0003-4232-3206

Юрій Бесарабець

кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
просп. Перемоги, 37, Київ, Україна, 03056, york_bessar@ukr.net

ORCID: 0000-0003-0773-099X

Сергій Майданюк

кандидат технічних наук, старший викладач кафедри конструювання машин

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
просп. Перемоги, 37, Київ, Україна, 03056, maysv3@gmail.com

ORCID: 0000-0003-2853-8606

Олександр Плівак

завідувач науково-дослідної (експериментальної) лабораторії виміральної техніки Навчально-наукового механіко-машинобудівного інституту

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
просп. Перемоги, 37, Київ, Україна, 03056, aplivak@gmail.com

ORCID: 0000-0003-3680-8485

Полімерні композиційні матеріали широко застосовуються у різних галузях промисловості – авіаційній техніці, автомобілебудуванні, енергомашинобудуванні, будівництві, виробництві товарів для спорту, дозвілля тощо. Поєднання високої питомої міцності, жорсткості, довговічності надійності під час роботи в умовах значних навантажень, високої температури, в агресивних середовищах сприяють значному поширенню композитів у якості конструкційних матеріалів.

Технологія виготовлення виробів із полімерних композиційних матеріалів дозволяє одержати деталі за формою та розмірами близькі до остаточно необхідної. Однак повністю відмовитися від обробки сформованої деталі неможливо, оскільки необхідно отримати розміри елементів в межах встановлених допусків та з заданими параметрами якості поверхні. Обрізання заготовки по фасонному контуру є однією з найбільш поширених операцій механічної обробки полімерних композитів. Переважно цю операцію виконують вручну за допомогою механізованих засобів з використанням пристроїв з електричним або пневматичним приводом. Основними проблемами, що виникають під час обрізки деталей по контуру, є складність отримання високої якості обробленої поверхні, що пояснюється високою анізотропією властивостей оброблюваного матеріалу, низька стійкість різального інструменту через високу абразивну здатність наповнювача та проблеми забезпечення охорони праці оператора, що виникають внаслідок утворення великої кількості дрібнодисперсних часток оброблюваного матеріалу, які спричиняють негативний вплив на органи дихання людини.

Досягнення прийнятної результату можливе за рахунок використання спеціального пристрою для обрізання панелей з композиційних матеріалів. У даній роботі досліджується вплив конструктивних елементів пристрою для контурного розрізання на якість обробленої поверхні.

Ключові слова: композиційні матеріали, різальний інструмент, розрізання по контуру, якість обробки.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Найбільш поширеними операціями обробки деталей з композитів є обрізання кромки, фрезерування торців, уступів, вікон, вирізання фігурних лючок,

обробка отворів під болтові та заклепувальні з'єднання та інші. У даній роботі розглянуто питання обробки кромки листових деталей із полімерних композитів.

Розрізання панелей чи обрізання кромки може виконуватися традиційними методами, тобто механічною обробкою або нетрадиційними методами, такими як лазерна обробка [1], гідроабразивна [2] тощо.

Найчастіше обрізання по контуру деталі виконують абразивними відрізними кругами, абразивними алмазними головками [3] або кінцевими фрезами. Незалежно від прийнятих методів механічна обробка є складним завданням, що полягає в складності отримання якісної обробленої поверхні і низької стійкості різального інструменту. Найбільш поширеними дефектами при механічній обробці є деструкція поверхневого шару, викликана тепловими явищами, що супроводжують процес різання, такими як вигоряння матриці, припали, залишкові напруги, а також механічні пошкодження – розшарування зовнішніх шарів матеріалу, незрізані волокна, викришування, виривання волокон тощо [4].

Низька стійкість різального інструменту викликана високою абразивною здатністю армуючих волокон композиційних матеріалів. Підвищення стійкості інструменту можна досягти шляхом вибору більш зносостійких інструментальних матеріалів, застосування доцільних схем різання, раціонального вибору геометричних параметрів різальної частини, режимів обробки тощо.

Ще одним важливим аспектом обробки різанням полімерних композитів є дотримання норм безпеки праці оператора. Процес механічної обробки, а переважно він виконується без використання охолоджуючої рідини, супроводжується виділенням значної кількості дрібних частинок стружки, що складається з армуючого матеріалу, матриці і продуктів термічного впливу на матеріал. Дрібнодисперсні частинки стружки, що знаходяться у повітрі, є канцерогенними, і вони також мають потенційну здатність ушкоджувати дихальну систему та викликати токсичне подразнення. Тому вкрай важливо під час проектування інструментів та технологічних процесів обробки композиційних матеріалів звести до мінімуму викид цих небезпечних частинок у довкілля [5].

Найбільш небезпечним дефектом при контурній механічній обробці композиційних матеріалів є внутрішньо- і міжшарові тріщини, наявність яких призводить до зниження міцності та жорсткості виробів [6].

Розшарування виникає внаслідок розділення суміжних шарів композиту під впливом зовнішньої сили. Основною причиною розшару-

вання при фрезеруванні кінцевими фрезами або алмазно-шліфувальними головками є складова сили різання, спрямована по нормалі до шарів композиту.

Існує ряд прийомів при розрізанні та контурній обробці, спрямованих на зменшення осьової складової сили різання, а, отже, і розшарування заготовки. Якість обробки можна підвищити за рахунок конструкції інструменту, оптимізації геометричних параметрів та режимів різання, а також за рахунок застосування спеціальних технологій, що враховують специфічні властивості композитів [7]. При проектуванні інструментів необхідно прагнути, щоб сила різання була спрямована всередину заготовки, тобто стискала шари матеріалуміж собою.

У роботі [8] виконано огляд останніх досягнень у галузі фрезерування та обрізки композиційних матеріалів з вуглецевим армуючим волокном, розглянуто типи кінцевих фрез, їх конструктивні та геометричні параметри, а також процеси їх виробництва. Зазначені інструменти застосовуються переважно при машинній обробці деталей із композиційних матеріалів. Однак ряд випадків є необхідність застосування ручного механізованого інструменту для розрізання або обрізання країв заготовок з полімерних композитів. Метою роботи є дослідження інструмента, що забезпечує високу якість обробленої поверхні з використанням механізованого ручного засобу.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Для контурного обрізання панелей із волокнистих композиційних матеріалів французькою фірмою Resoules було запропоновано спеціальний ручний механізований пристрій [9]. Пристрій складається з різального інструмента, зуб якого виконаний у вигляді однозахідної спіралі, що обертається в нерухомій різальній втулці. Аналіз запропонованої конструкції пристрою дозволив виявити деякі її недоліки. Радіальна складова сили різання, що виникає в процесі обробки, викликає згинання інструменту і призводить до збільшення зазору між різальним інструментом і втулкою в зоні різання. В результаті волокна зовнішніх шарів заготовки не зрізаються, а втягуються в зазор і обриваються, що знижує якість різання. Крім того, переточування зуба призводить до збільшення зазору, що знижує сумарний термін служби інструменту.

Для усунення перерахованих недоліків конструкція вказаного пристрою була доопрацьована. У корпусі 1 пристрою розміщена різально-напрямна втулка 2 і різальний інструмент 3 (рис. 1).

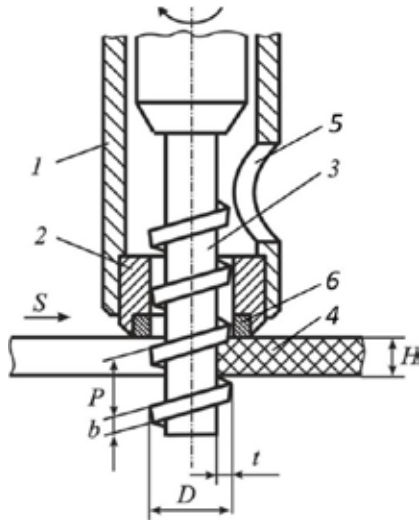


Рис. 1. Схема пристрою для обрізання листових композитів

Пристрій призначений для ручного обрізання листових матеріалів, тому його закріплюють на дрилі з електричним або пневматичним приводом. У процесі обробки торцеву поверхню втулки розташовують на поверхні листової заготовки 4, бічну поверхню втулки притискають до шаблону, виконаного за розмірами вікна або лючка в деталі, інструменту надають обертальний рух, а всьому пристрою – рух подачі S , перпендикулярний до осі обертання інструменту. При цьому заготовка, періодично потрапляючи в западину гвинтового зуба інструменту, захоплюється зубом і зрізається знизу догори, підтискаючи зрізуваний шар матеріалу до торцевої поверхні втулки.

Для реалізації такої схеми зрізання матеріалу крок гвинтового зуба P повинен бути більшим за мінімально допустимий, який визначається за формулою:

$$P_{min} = (H + b)/(1 - 2t/\pi D), \quad (1)$$

де H – товщина оброблюваної заготовки; b – товщина зуба в осьовому напрямку; t – висота зуба (конструктивно допустима подача на оберт інструменту); D – діаметр інструменту.

Зовнішні верхні шари заготовки зрізаються за принципом ножиць, коли волокно композиційного матеріалу притискається зубом інструменту до нерухої різально-напрямої втулки. Зрізана стружка транспортується гвинтовим зубом уздовж осі інструменту, звідки потім видаляється через вікно 5 у корпусі пристрою. Різально-напрямна втулка може бути виконана суцільною з інструментального матеріалу, або складатися з двох частин: різальної частини 6, наприклад, з твер-

дого сплаву та прямої частини 2 з конструкційного матеріалу.

Для компенсації радіальної сили різання, що викликає згинання інструменту і збільшення зазору між різальним інструментом і втулкою необхідно, щоб у кожний момент часу зберігався стійкий контакт між ними на лінії дії радіальної сили. Тому довжина втулки має бути більшою за крок спіральної зуба. Крок P доцільно вибрати якомога меншим, але достатнім для вільного розміщення та транспортування стружки, бо зменшення кроку сприяє кращому центруванню інструменту у втулці та зменшенню необхідної довжини самої втулки.

На напрямній ділянці для зменшення сил тертя і поліпшення умов центрування інструменту у втулці доцільно її виконувати з антифрикційного матеріалу, а інструмент із нульовими задніми кутами, тобто створити циліндричну стрічку шириною 0,3... 0,5 мм.

Робоча частина інструменту має зворотну конусність, тобто його діаметр зменшується від торця робочої частини до хвостовика. При цьому інструмент має можливість періодичного осьового переміщення відносно втулки під час налаштування пристрою. Конічна форма інструменту дозволяє збільшити число переточок, бо зазори, що при цьому збільшуються, компенсуються відповідним встановленням інструменту відносно втулки. Це, звичайно, підвищує сумарний термін служби пристрою.

Експериментальні дослідження спрямовані на встановлення впливу зазору між різальним інструментом і різальною втулкою та швидкості різання на якість обробленої поверхні для різних типів композиційних матеріалів. Для дослідів були взято три різних листових композиційних матеріали: органопластик, склопластик та армований вуглепластик товщиною відповідно 1,4, 2,3 та 1,3 мм. Різально-напрямна втулка виготовлена цільною з швидкорізальної сталі Р6М5 і має циліндричний отвір діаметром 6,25 мм.

Різальний інструмент з гвинтовим зубом (рис. 2) виготовлений з швидкорізальної сталі Р6М5, зовнішній діаметр складає 6,05 мм. Крок гвинтової лінії зуба складає 10 мм, кут нахилу зуба до осі інструменту $\omega = 59^\circ$, товщина зуба в осьовому напрямку $b = 1,44$ мм, висота зуба інструменту $t = 0,9$ мм. Крок гвинтового зуба прийнято 10 мм, що не суперечить розрахованому значенню за формулою (1).

Передній кут $\gamma = 10^\circ$, задній кут $\alpha = 2^\circ$. Задній кут інструментів для обробки полімерних

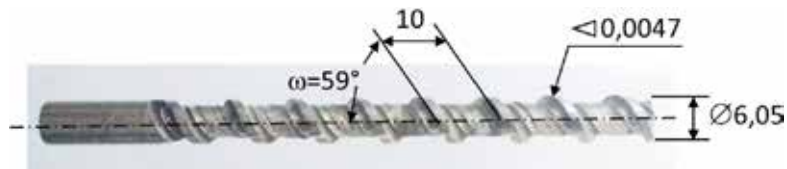


Рис. 2. Різальний інструмент з гвинтовим зубом

композитів призначають переважно в діапазоні від 10 до 20°, проте у даному випадку значення α було вибрано значно меншим, щоб забезпечити надійне центрування інструменту в отворі різально-напрямної втулки, а також зменшити вплив переточувань інструмента на його діаметральний розмір.

Завдяки зміні вильоту інструмента відносно втулки було отримано три значення зазору між ними, а саме 0,11 мм, 0,14 мм та 0,17 мм в радіальному вираженні. Пристрій було встановлено в електричному дрилі. Швидкість обертання шпинделя варіювалась на трьох рівнях $n = 2200$ об/хв, $n = 2600$ об/хв та $n = 3000$ об/хв.

Якість обробленої поверхні композиційного матеріалу оцінювалась такими параметрами як ширина різку, шорсткість поверхні, розшарування та величина незрізаних армуючих волокон.

На усіх деталях оброблялись поздовжні пази. Після обробки ширина кожного паза вимірювалась на мікроскопі по довжині у трьох перерізах (рис. 3). Середня ширина паза в органопластику склала 5,86 мм, в склопластику 5,79 мм і в армованому вуглепластику – 5,78 мм. Залежності від швидкості обертання інструменту та величини зазору між інструментом і втулкою не встановлено. Слід зазначити, що ширина паза є меншою зовнішнього діаметра різального інструменту по гвинтовому зубу. Тобто під час обробки однозубим інструментом змінюється положення ділянки контакту інструмента і заготовки. Для інструмента з правим напрямком гвинтової лінії контакт розпочинається на вхідній (лівій) ділянці

паза і закінчується на вихідній (правій) ділянці паза. Відповідно і змінюється напрямок радіальної складової сили різання, що призводить до коливання інструменту в радіальному напрямку та відповідного зменшення ширини різку. Причому величина цього коливання залежить як від властивостей оброблюваного матеріалу, так і від зусилля, з яким оператор притискає пристрій до шаблону під час обробки. Величина радіального зміщення інструмента складає 0,19 ... 0,27 мм, що значно менше від величини висоти зуба, тобто конструктивно допустимої подачі на оберт інструмента $t = 0,9$ мм.

Шорсткість обробленої поверхні паза вимірювалась на вході інструмента в заготовку за допомогою мобільного профілометра MarSurf PS1. Для оцінки шорсткості поверхні був вибраний висотний параметр Ra , довжина оцінки $Lt = 5,6$ мм. На кожній ділянці вимірювання виконувалися тричі. На рис. 4 наведені графіки залежності параметра Ra від швидкості різання. У випадку, коли різальний інструмент разом зі шпинделем обертався з частотою $n = 2200$ об/хв окружна швидкість різання склала $V_1 = 42$ м/хв, осьова (за рахунок гвинтового зуба) $V_2 = 22$ м/хв. Для $n = 2600$ об/хв $V_1 = 49$ м/хв і $V_2 = 26$ м/хв та для $n = 3000$ об/хв $V_1 = 57$ м/хв та $V_2 = 30$ м/хв. Як видно із графіків, із збільшенням швидкості різання шорсткість поверхні зростає. Очевидно, що для пристрою з ручною подачею та з силою різання, що постійно змінює напрямок дії, зростання швидкості різання призводить до збільшення осциляції різального інструмента і як

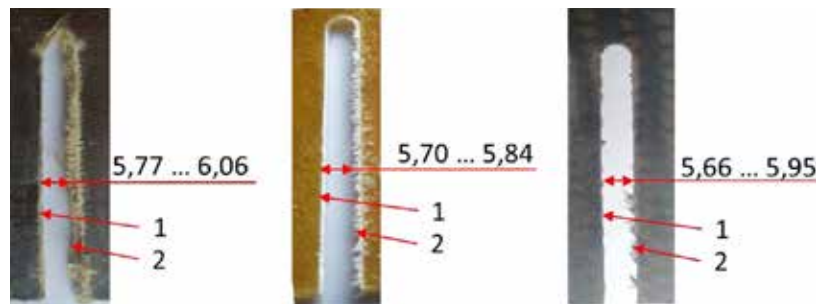


Рис. 3. Вимірювання ширини прорізаного паза:

- а) органопластик; б) склопластик; в) армований вуглепластик; 1 – вхід різального інструмента; 2 – вихід різального інструмента

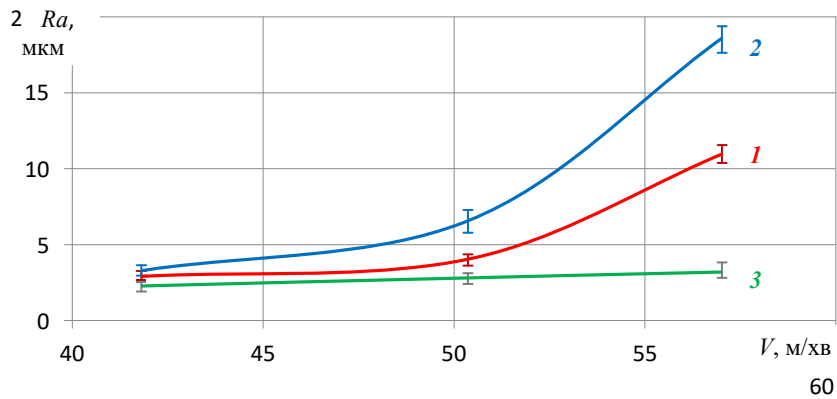


Рис. 4. Залежність шорсткості поверхні від швидкості різання: 1 – органопластик; 2 – склопластик; 3 – армований вуглепластик

наслідок – до збільшення шорсткості поверхні. Найвищою шорсткістю поверхні виявилася для заготовки з склопластику, а найнижча – з армованого вуглепластика.

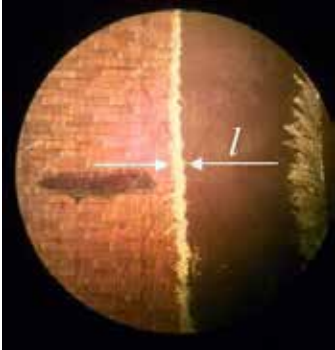
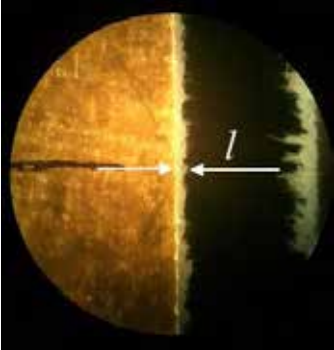
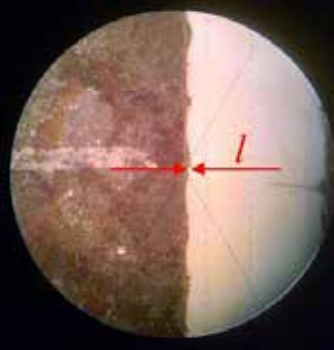
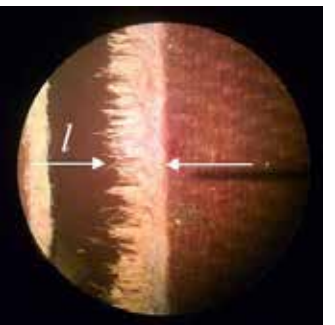
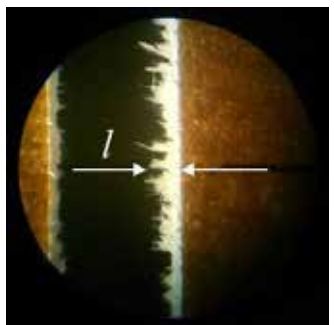
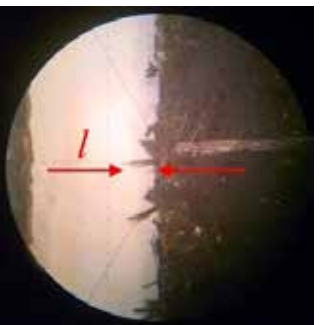
У більшості випадків розшарування матеріалу на вході різального інструмента в заготовку та виході помічено не було, проте очевидним був дефект у вигляді незрізаних волокон армуючого матеріалу. У нижній частині деталі завдяки великому куту нахилу різальної кромки гвинтового зуба ($\omega = 59^\circ$) сила різання спрямована всередину заготовки і притискає зовнішні шари

матеріалу до внутрішніх. При цьому відбувається різання з проковзуванням різальної кромки відносно джгута армуючого матеріалу, що сприяє більш легкому перерізання міцного волокна, розташованого всередині м'якої матриці [10]. У верхній частині листової заготовки гвинтовий зуб притискає оброблюваний матеріал до кромки різально-напрямної втулки та зрізає його.

Довжина незрізаних волокон оцінювалась за допомогою мікроскопа (табл. 1). Графіки залежності довжини волокон від величини зазору між різальним інструментом і втулкою наведено на рис. 5.

Таблиця 1

Визначення довжини незрізаних волокон

органопластик	склопластик	вуглепластик
<i>вхід інструмента в заготовку</i>		
		
<i>вихід інструмента із заготовки</i>		
		

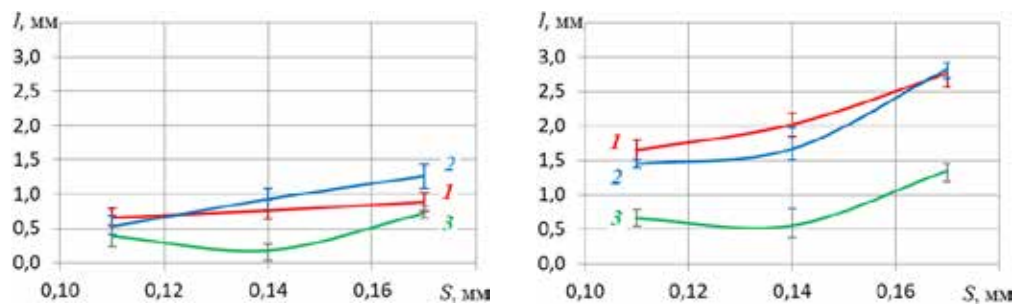


Рис. 5. Залежність довжини незрізаних волокон від величини зазору між інструментом і втулкою: а) на вході в заготовку; б) на виході з заготовки; 1 – органопластик; 2 – склопластик; 3 – армований вуглепластик

Як видно з графіка, на вході інструмента в заготовку довжина незрізаних волокон суттєво нижча, ніж на виході інструмента з контакту з деталлю для всіх типів матеріалів. При цьому довжина незрізаних волокон матеріалу суттєво залежить від величини зазору між інструментом і втулкою. Із збільшенням зазору волокна не зрізаються, а затягуються в зазор і обриваються, знижуючи якість обробки.

Таким чином, експериментально було підтверджено, що використання запропонованого пристрою, за рахунок поліпшення умов обробки, вибору геометричних параметрів інструменту і втулки, дозволяє підвищити якість обробки листових полімерних композиційних матеріалів різних типів – органопластиків, склопластиків та вуглепластиків. Встановлено, що ширина різку є меншою за діаметр різального інструмента, шорсткість поверхні дещо зростає з підвищенням швидкості різання. Очевидно, що зазор між інструментом та втулкою повинен бути меншим за діаметр армуючого волокна полімерного композиту, бо в іншому випадку волокна не зрізаються, що погіршує якість обробленої поверхні. Варто також зазначити, що робота пристрою супроводжується незначним утворенням дрібнодисперсної стружки, яка потрапляє в органи дихання людини. Це дозволяє поліпшити умови праці оператора.

ЛІТЕРАТУРА

1. R. Staehr, S. Bluemel, P. Jaeschke, O. Suttman, and L. Overmeyer. Laser cutting of composites. Two approaches toward an industrial establishment. *Journal of laser applications* volume 28, number 2 may 2016. URL: <http://dx.doi.org/10.2351/1.4943754>
2. Alberdi A., Suárez A., Artaza T., Escobar-Palafox G.A., Ridgway K. Composite Cutting with Abrasive Water Jet,

Procedia Engineering 63(2013). 421–429. doi: 10.1016/j.proeng.2013.08.217

3. Aude Boudelier, Mathieu Ritou, Sébastien Garnier, Benoît Furet. Investigation of CFRP machining with diamond abrasive cutters, *Journal of Composite and Advanced Materials. Revue des composites et des matériaux avancés*, Lavoisier, 2013, 23(3), pp. 425–436. 10.3166/RCMA.23.425-436. hal00954986

4. Глоба А.В., Адаменко Ю.И. Оценка качества обработанной поверхности при сверлении высокопрочных полимерных композиционных материалов. *Надійшла інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць*. Випуск 23. Краматорськ-Київ, 2008. С. 220–224.

5. N. Nguyen-Dinh, Akshay Hejjaji, Redouane Zitoune, Christophe Bouvet, Mehdi Salem. New tool for reduction of harmful particulate dispersion and to improve machining quality when trimming carbon/epoxy composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Elsevier, 2020, 131, pp. 105806. 10.1016/j.compositesa.2020.105806. hal-02544160.

6. Capello E. Workpiece damping and its effect on delamination damage in drilling thin composite laminates. *Journal of Materials Processing Technology* 143(2004). pp. 186–195.

7. Hocheng H., Tsao C.C., Analysis of delamination in drilling composite materials using core drill, *Aust. J. Mech. Eng.* 1 (1) (2003) pp. 49–53.

8. S. A. Sundi, R. Izamshah, M. S. Kasim, M. F. Jaafar & M. H. Hassan. Milling/Trimming of Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP): Recent Advances in Tool Geometrical Design. *Machining and Machinability of Fiber Reinforced Polymer Composites* pp. 101–128, 2020. DOI: 10.1007/978-981-33-4153-1_4

9. Patent France FR2561556A1, B23C5/10; B26D1/15; B32B5/08. Compositematerial clipping tool, 1985-09-27.

10. Тарасюк А.П. Выбор рациональных условий резания полимерных композитов, обеспечивающих максимальные показатели качества поверхности. *Вісник СумДУ. Серія «Технічні науки»*. № 4. 2012.

STUDY OF A TOOL FOR CONTOUR CUTTING OF COMPOSITE MATERIALS

Yuriy Adamenko

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Machine Design
National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute", 37 Peremogy Ave., Kyiv, Ukraine, 03056, yuriy.adamenko@ukr.net
ORCID: 0000-0003-4232-3206

Yurii Besarabets

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Machine Design
National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute", 37 Peremogy Ave., Kyiv, Ukraine, 03056, yurk_bessar@ukr.net
ORCID: 0000-0003-0773-099X

Serhiy Maidanyuk

Candidate of Technical Sciences,
Senior Lecturer at the Department of Machine Design
National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute", 37 Peremogy Ave., Kyiv, Ukraine, 03056, maysv3@gmail.com
ORCID: 0000-0003-2853-8606

Oleksandr Plivak

Head of the Scientific research (experimental) Laboratory Of Measuring Equipment Of The Educational And Scientific Mechanical And Mechanical Engineering Institute
National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute", 37 Peremogy Ave., Kyiv, Ukraine, 03056, aplivak@gmail.com
ORCID: 0000-0003-3680-8485

Polymer composite materials are widely used in various branches of industry aircraft engineering, automotive engineering, power engineering, construction, production of sports and leisure products, etc. The combination of high specific strength, rigidity, durability, reliability during operation under conditions of significant loads, high temperature, in aggressive environments contribute to the significant spread of composites as structural materials.

The technology of manufacturing products from polymer composite materials allows you to get parts in shape and size close to the final ones. However, it is impossible to completely abandon the processing of the formed part, since it is necessary to obtain the dimensions of the elements within the established tolerances and with the specified parameters of the surface quality. Cutting the workpiece according to the shaped contour is one of the most common operations of mechanical processing of polymer composites. Mostly, this operation is performed manually with the help of mechanized means using devices with an electric or pneumatic drive. The main problems that arise when cutting parts along the contour are the difficulty of obtaining a high-quality machined surface, which is explained by the high anisotropy of the properties of the machined material, the low stability of the cutting tool due to the high abrasiveness of the filler, and the problems of ensuring the safety of the operator, which arise due to the formation of a large number of finely dispersed particles of processed material that cause a negative impact on human respiratory organs.

Achieving an acceptable result is possible due to the use of a special device for cutting panels made of composite materials. This paper examines the influence of structural elements of the device for contour cutting on the quality of the processed surface.

Key words: composite materials, cutting tools, contour cutting, processing quality.

REFERENCES

1. R. Staehr, S. Bluemel, P. Jaeschke, O. Suttman, and L. Overmeyer. Laser cutting of composites-Two approaches toward an industrial establishment. *Journal of laser applications* volume 28, number 2 may 2016. <http://dx.doi.org/10.2351/1.4943754>
2. Alberdi A., Suárez A., Artaza T., Escobar-Palafox G.A., Ridgway K. Composite Cutting with Abrasive Water Jet, *Procedia Engineering* 63 (2013) 421–429. doi: 10.1016/j.proeng.2013.08.217
3. Aude Boudelier, Mathieu Ritou, Sébastien Garnier, Benoît Furet. Investigation of CFRP machining with

diamond abrasive cutters, Journal of Composite and Advanced Materials. Revue des composites et des matériaux avancés, Lavoisier, 2013, 23 (3), pp. 425–436. 10.3166/RCMA.23.425-436. hal00954986

4. Hloba A.V., Adamenko Yu.I. Otsenka kachestva obrabotanoi poverkhnosty pry sverleny vysokoprochnykh polymernykh kompozytsyonnykh materyalov. Nadiinist instrumentu ta optymizatsiia tekhnolohichnykh system. Zbirnyk naukovykh prats. Vypusk 23. Kramatorsk-Kyiv 2008. – S. 220–224. [in Russian].

5. N. Nguyen-Dinh, Akshay Hejjaji, Redouane Zitoune, Christophe Bouvet, Mehdi Salem. New tool for reduction of harmful particulate dispersion and to improve machining quality when trimming carbon/epoxy composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Elsevier, 2020, 131, pp. 105806. 10.1016/j.compositesa.2020.105806. hal-02544160

6. Capello E. Workpiece damping and its effect on delamination damage in drilling thin composite laminates.

Journal of Materials Processing Technology 143 (2004) pp. 186–195

7. Hocheng H., Tsao C.C., Analysis of delamination in drilling composite materials using core drill, Aust. J. Mech. Eng. 1 (1) (2003) pp. 49–53.

8. S.A. Sundi, R. Izamshah, M. S. Kasim, M. F. Jaafar & M. H. Hassan. Milling/Trimming of Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP): Recent Advances in Tool Geometrical Design. Machining and Machinability of Fiber Reinforced Polymer Composites pp. 101–128, 2020. DOI: 10.1007/978-981-33-4153-1_4

9. Patent France FR2561556A1, B23C5/10; B26D1/15; B32B5/08. Compositematerial clipping tool, 1985-09-27.

10. A.P. Tarasiuk, Vyborsratsyonalnykh uslovyi rezaniya polymernykh kompozytov, obespechyvaiushchykh maksimalnye pokazately kachestva poverkhnosty, Visnyk SumDU. Seriiia “Tekhnichni nauky”, №4 2012. [in Russian]

Стаття надійшла 19.08.2022