

Технологічне забезпечення оброблювання композитів типу пултрузійний склопластик

В. А. Пронін¹ • О. А. Охріменко¹ • Д. К. Шуплєцов¹ • В. М. Ночвай²

Received: 20 June 2024 / Revised: 15 July 2024 / Accepted: 24 August 2024

Анотація. Розглянуто проблеми, що виникають на виробництві, що займаються обробленням композитних матеріалів. А саме, вирішення проблем, що виникають при механічній обробці композитів, результати наведено у вигляді аналізу зарубіжних наукових досліджень та власними рішеннями, що використовуються на підприємстві. Основні проблеми, що були розглянуті: розширення пултрузійного склопластику, підбір правильного ЗОР для обробки. Розроблено математичну модель для розрахунку режимів різання. Математичну модель, перевірено проведенням експериментів для визначення коефіцієнту розширення з розрахованими режимами різання. Змодельовано процес обробки заготовки в системі р використовуючи Лагранжевий підхід з використанням метода скінченних елементів. Проведено обчислювальний експеримент за допомогою ПЗ ПРІАМ. Розроблено методику проектування операцій кінцевого фрезерування за критерієм обмеження величини розширення та за умови забезпечення заданої шорсткості обробленої поверхні шаруватих скловолоконних композитів. Встановлено, при сталій швидкості різання та глибині різання змінюючи тільки подачу, при збільшенні подачі коефіцієнт розширення збільшується. Встановлено, при однаковій глибині різання та подачі, та змінній швидкості різання, якість поверхні є задовільною, а отже коефіцієнт розширення менше. Математична модель на основі проведених експериментів виявилася доцільною та робочою, за допомогою якої можна визначити наближений коефіцієнт розширення. Отримані результати стали доцільними та використовуються на підприємствах по механічній обробці склопластику.

Ключові слова: фрезерування композитних матеріалів, коефіцієнт розширення, оброблення пултрузійного склопластику, ЗОР для композитних матеріалів.

Вступ

Обробка композитних матеріалів за допомогою фрезерування є важливою проблемою, що вирішується в сучасному виробництві при обробці таких матеріалів. Склопластикові матеріали та конструкції мають ряд переваг і особливих властивостей, таких як високі фізико-механічні характеристики та низька вага, хімічна стійкість, стійкість до впливу вологи та ультрафіолету, естетичний зовнішній вигляд, економічність експлуатації у разі фарбування, високі електротехнічні харак-

теристики, низька теплопровідність, можливість виготовлення профілю з низькою горючістю (Г1), стабільність розмірів і не магнітність [1], [3]–[5] вони застосовуються в різних галузях від авіабудування, машинобудування, також у будівництві (рис. 1) [14], і так далі, з часом область застосування їх буде збільшуватись.

Одним із основним видом обробки таким матеріалів є процес різання, найбільш поширене це свердління та фрезерування. Процес фрезерування використовується для обробки пазів та приєднувальних елементів при складанні конструкцій з такого матеріалу і тому вимоги щодо якості і точності отримання таких поверхонь є важливими так як це впливає на подальшу експлуатацію всього виробу в цілому.

Під час фрезерування композитів існує ризик розширення через вплив сил обробки. Що може призвести до зменшення міцності компонентів чи взагалі до невірної браку деталей і залежить від орієнтації волокон щодо напрямку обробки, а також від швидкості подачі [1]. Тому ефективність фрезерування скло-

✉ В. А. Пронін
proninvadyt@gmail.com

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

² Державний університет “Житомирська політехніка”, Житомир, Україна

пластиків є важливою задачею, яка потребує вирішення. Орієнтація волокон має значний вплив на процес різання. Найкращі параметри оброблюваної поверхні при різанні можна отримати, якщо процес різання буде відбуватись паралельно волокнам. Сили різання, які діють під час обробки склопластика відносно волокон під кутом 45° , 90° та більше, вищі, ніж при різанні волокон під кутом 0° , оскільки при згинанні, або зсуві вони є за своїми значеннями більші [2], [3], [6].

Для досягнення найкращої якості поверхні рекомендується використовувати оптимальну швидкість 50 м/хв і подачу 0,1 мм/зуб. Тип матеріалу матриці впливає на шорсткість поверхні. Середня шорсткість поверхні Ra зазвичай знаходиться в діапазоні 0,4–0,6 мкм (порівняно з 1 мкм у фрезеруванні металів) [9], [12]. Значення Ra не залежить від параметрів різання. Зі збільшенням швидкості різання від 25 м/хв до 250 м/хв спостерігається підвищення температури, що призводить до розм'якшення матеріалу і, як наслідок, до відсутності помітних слідів фрези [7], [8]. Найбільший вплив на шорсткість поверхні має швидкість подачі. При високих швидкостях подачі тріщини або сліди подачі можуть збільшувати шорсткість поверхні, особливо при вимірюванні в поперечному напрямку [10], [11].

Ще одним способом для покращення оброблення композитних матеріалів є використання змашувально-охолоджуючих рідин на основі емульсії, або води для виведення стружки та охолодження ріжучого інструменту та заготовки. Проте для деяких матеріалів, наприклад, пластмас та композитів, це може призводити до утворення абразивної суспензії через утворення графітового пилу, який змішується з рідким холодоагентом.



Рис. 1. Швидкозбірний будинок індивідуального будівництва з елементами деталей з пултрузійного склопластику

Однією з альтернатив традиційним змашувально-охолоджуючим рідинам є сушка машини за допомогою пристрою, такого як пістолет-розпилювач

Vortec від ITW Air Management [15]. Цей пристрій використовує стиснене повітря із вихровими трубами, щоб направляти холодний потік повітря до -30°C через сопло в зону різання, що дозволяє охолодити зону різання і не утворює абразивну емульсію і це покращує процес різання склопластиків.

Проте питання оброблюваності, покращенню якості поверхонь і рекомендації в основному стосуються виробів, які виготовляються з карбонового скловолокна або зі звичайного склопластику, що використовуються в авіаційній техніці, суднобудуванні та інші високотехнологічні галузі виробництва, що до матеріалів з пултрузійного склопластику, який використовується у будівництві таких рекомендацій практично немає. Тому питання покращення оброблюваності таких склопластиків є актуальним, особливо ця проблема зараз постає при обробці деталей з пултрузійного склопластику, що використовуються у будівельному виробництві для виготовлення швидкозбірних будинків індивідуального будівництва (рис. 1) [14], які зараз дуже затребувані для населення України, що втратили свої домівки, через військову агресію Росії проти нашої держави.

Мета і задачі дослідження

Мета дослідження є визначення параметрів різання для забезпечення необхідної якості поверхні при фрезеруванні деталей з пултрузійного склопластику, що забезпечить в подальшому необхідні експлуатаційні параметри таких деталей.

Для вирішення поставлених задач необхідно провести ряд дослідів при фрезеруванні таких композитних матеріалів і побудувати математичну модель залежності коефіцієнту розшарування від режимів різання, що дасть можливість обрати необхідні режими обробки, які забезпечать необхідну якість поверхні таких виробів.

Матеріали та методи дослідження

При використанні статистичних методів обробки експериментальних даних необхідно планувати експеримент та попередньо формувати вибірку, це зумовлено тим, що при розробці статистичних методів це є основним способом забезпечення виконання висунутих передумов і припущень, які без цього не будуть коректними. На сьогодні для більшості методів існує лише набір певних рекомендацій та перевірок, таких як рандомізація. Найбільш придатною є теорія планування регресійних та дисперсійних експериментів. Оскільки класичні плани експериментів мають недоліки, зокрема є оптимальними лише для певних рівнянь регресії, які необхідно знати заздалегідь, були розроблені робастні плани. Робастні плани відрізняються тим, що точки плану експериментів розташовані рівномірно в

багатофакторному просторі, що забезпечує найкращі умови для визначення рівняння регресії. Важливою передумовою для виконання всіх завдань є забезпечення стійкості коефіцієнтів регресії та проведення регресійного аналізу.

На першому етапі моделювання процесу обробки заготовки в системі Ansys вибираються матеріали для заготовки та інструменту. Враховуючи поставлену задачу, для вирішення будемо використовувати Лагранжевий підхід, реалізований у модулі Explicit Dynamics системи Ansys (рис. 2). Цей підхід заснований на методі скінченних елементів, який полягає у поділі робочої зони на обмежену кількість підобластей, кожен з яких розглядаємо як статично навантажене тіло.

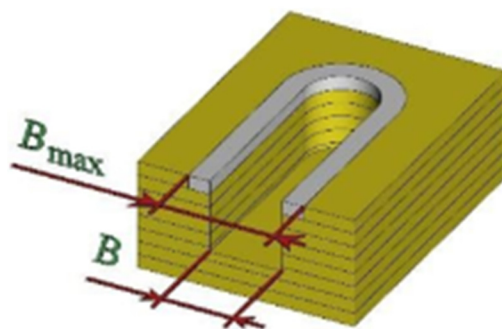


Рис. 3. Визначення коефіцієнту розшарування

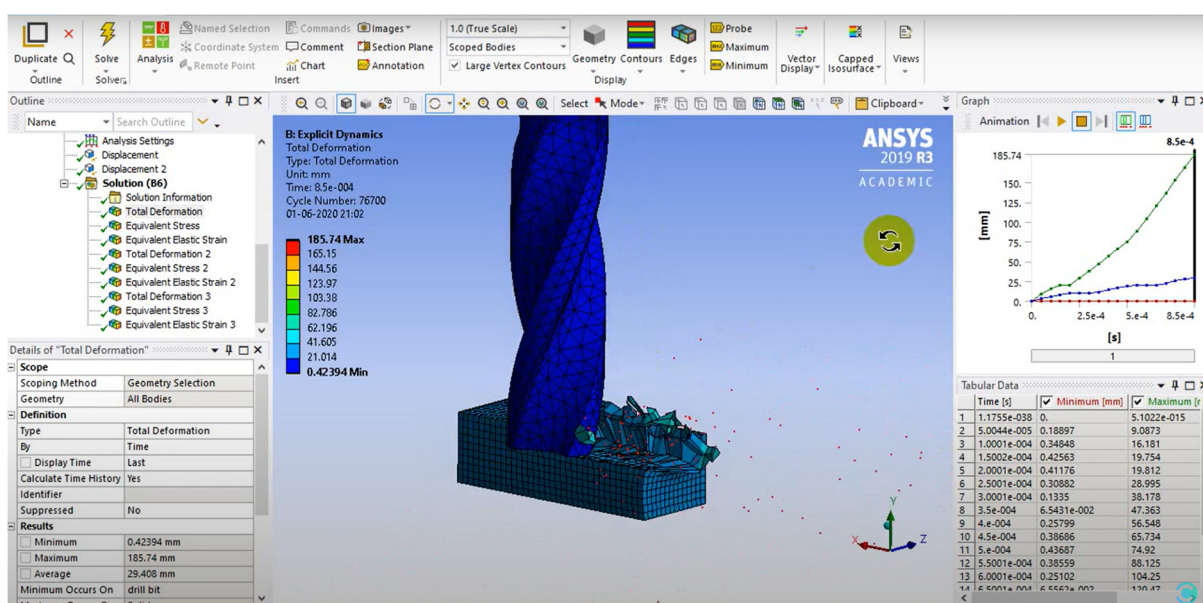


Рис. 2. Результати моделювання в системі Ansys

Мета цих досліджень полягає у визначенні емпіричних залежностей коефіцієнта розшарування від режимів фрезерування, а також у знаходженні функціональної залежності відносного коефіцієнта розшарування від подачі на зуб, швидкості різання та глибини обробки. Досліджувані композиційні матеріали були обрані склопластиковий швелер.

Результати дослідження

Для ефективного застосування статистичних методів визначаємо необхідне планування експерименту та попереднє формування вибірки для визначення коефіцієнту розшарування згідно (рис. 3) [13]. Це обумовлено тим, що при розробці статистичних методів це є основним способом для перевірки висунутих гіпотез і припущень, без чого вони можуть бути некоректними. На сьогодні більшість методів має лише рекомендації та перевірки [13].

Як приклад, модель γ подається у вигляді алгебраїчної суми довільних функцій, загальний вираз якої є лінійним відносно шуканих невідомих параметрів b_i .

$$\gamma = \sum_{i=1}^{k'} b_i f_i(x_1, x_2, \dots, x_k), \quad (1)$$

k' – загальна кількість ефектів (головних і взаємодій), введених в математичну модель.

Коефіцієнт розшарування композитних матеріалів залежить від таких факторів як: V – швидкість різання інструменту, м/хв; f – подача на зуб, мм/зуб; t – глибина різання, мм; δ – коефіцієнт розшарування, який визначається за формулою:

$$\delta = \frac{B_{\max} - B}{B} \cdot 100\%. \quad (2)$$

При дослідженні коефіцієнту розшарування, створено робастний план на основі випадкових ЛП-тау чисел [16], враховуючи проведені дослідження було

обрано діапазон для значень $V(x_1) - 400-80$ м/хв з кроком 20 м/хв, для значень $f(x_2) - 0.01-0.15$ з кроком 0,01, для значень $t(x_3) - 0,4-4$ з кроком 0,2 [13], створена матриця експерименту показана в таблиці 1.

Таблиця 1. Матриця плану експерименту [13]

№ експ.	X 1	X 2	X 3
1	0,5	0,5	0,5
2	0,25	0,75	0,25
3	0,75	0,25	0,75
4	0,125	0,625	0,875
5	0,625	0,125	0,375
6	0,375	0,375	0,625
7	0,875	0,875	0,125
8	0,0625	0,9375	0,6875
9	0,5625	0,4375	0,1875
10	0,3125	0,1875	0,9375
11	0,8125	0,6875	0,4375
12	0,1875	0,3125	0,3125
13	0,6875	0,8125	0,8125
14	0,4375	0,5625	0,0625
15	0,9375	0,0625	0,5625
16	0,03125	0,53125	0,40625

На основі матриці плану отримуємо матрицю експерименту [13], що показана в таблиці 2.

Таблиця 2. Робоча матриця експерименту [13]

№ експ.	X 1	X 2	X 3
1	240	0,07	2,2
2	160	0,11	1,2
3	320	0,04	3,2
4	120	0,09	3,6
5	280	0,02	1,8
6	200	0,06	2,6
7	360	0,13	0,8
8	100	0,14	3
9	260	0,07	1
10	180	0,03	3,8
11	340	0,1	2
12	140	0,05	1,4
13	300	0,12	3,4
14	220	0,08	0,6
15	380	0,01	2,4
16	80	0,08	1,8

Виконаємо обчислювальні експерименти за допомогою програмного забезпечення ПРИАМ [17].

Кількість головних ефектів – 6;

Кількість взаємодій, що генеруються – 20;

Кількість визначених взаємодій – 0;

Усього взаємодій та ефектів – 26;

Типи взаємодій, що генеруються: 2; 3;

Обмеження головного ефекту за ступенем: Ні;

Обмеження взаємодії за рівнем: Ні.

В результаті моделювання отримали [Таблиця 3. Список ефектів кандидатів[13]]. Залежність коефіцієнтів кореляції від змінних факторів.

Таблиця 3. Список ефектів кандидатів [13]

Ім'я/ номер коефіцієнта	Коефіцієнт кореляції	Ім'я/ номер коефіцієнта	Коефіцієнт кореляції
1 – x_2	0.664342	2 – x_3	0.498485
3 – x_1	0.620152	4 – z_3	0.0168752
5 – z_1x_3	0.00154996	6 – $x_1x_2x_3$	0.135673
7 – $z_1z_2z_3$	0.0115836	8 – z_1	0.244384
9 – $x_1z_2x_3$	0.184948	10 – x_2x_3	0.4881

Отримана модель:

$$Y = 6.07866 + 3.0495x_2 + 2.36542x_3 - 1.87488x_1,$$

де:

$$x_1 = 0.00666667 \times (x_1 - 230);$$

$$z_1 = 1.60714 \times (x_1^2 - 0.377778);$$

$$x_2 = 15.3846 \times (x_2 - 0.075); \quad (3)$$

$$z_2 = 1.50893 \times (x_2^2 + 1.88527e - 008x_2 - 0.337278);$$

$$x_3 = 0.615385 \times (x_3 - 2.175);$$

$$z_3 = 1.64218 \times (x_3^2 - 0.043663x_3 - 0.372781).$$

Для перевірки адекватності розрахованої моделі було проведено експеримент з обробки даного матеріалу фрезеруванням. Дослід проводився з використанням фрезерувального верстату з ЧПК HAAS Desktop Mill (рис. 4 а), інструмент фреза кінцева тризуба зі швидкорізальної сталі Р6М5 діаметром 5 мм [13] (рис. 4 б). Зразком деталі слугує швелер розміром $100 \times 50 \times 6$ мм з пултрузійного склопластику. При проведенні експериментів вісь кінцевої фрези розташовувалась перпендикулярно шарам скловолокна. Режими обробки варіювалися в наступних діапазонах:

– глибина різання t від 0,4 до 4 мм;

– подача на зуб Sz від 0,01 до 0,14 мм/зуб;

– швидкість різання V від 240 до 400 м/хв.

Отримана математична модель:

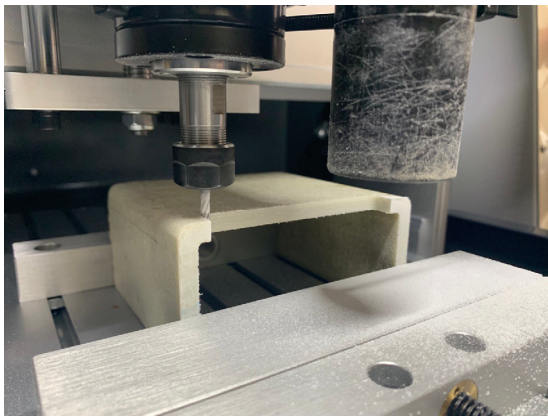
$$Y = 6.07866 + 3.0495x_2 + 2.36542x_3 - 1.87488x_1,$$

де:

x_1 – швидкість різання м/хв;

x_2 – подача на зуб мм/зуб;

x_3 – глибина різання мм.



a



b

Рис. 4. а) Обробка пазу швелера із пултрузійного склопластику, б) інструмент що використовувався при експерименті, фреза кінцева $d = 5 \text{ mm}$, $z = 3$ [18]

Результат аналізу отриманих моделей обробки фрезеруванням пултрузійного склопластику представлений у вигляді графіків на рис. 5, залежність коефіцієнта розшарування від зміни швидкості різання при постійній подачі та рис. 6 залежності коефіцієнта розшарування від зміни значення швидкості різання при постійній глибині різання.

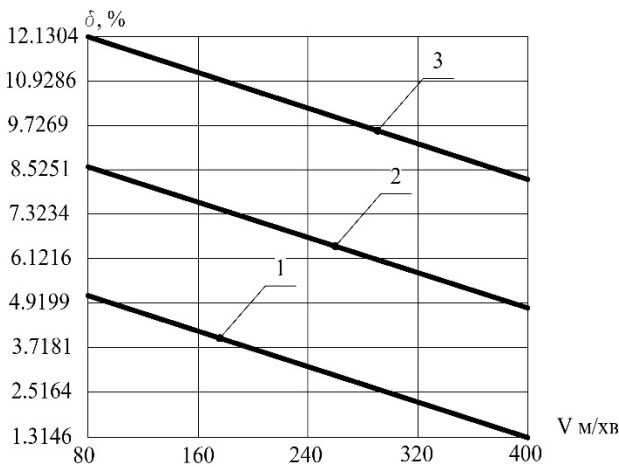


Рис. 5. Графік залежності коефіцієнта розшарування від зміни швидкості різання (V) та при постійному значенні подачі на зуб (f_z): 1–0,01 мм/зуб, 2–0,08 мм/зуб, 3–0,15 мм/зуб

За результатами моделювання (рис. 5) отримали, що на коефіцієнт розшарування при фрезеруванні в межах зміни швидкості різання від 80 м/хв до 400 м/хв зміна подачі впливає лінійно і при збільшенні швидкості різання значення коефіцієнту зменшується і таким чином цей матеріал веде себе при обробці, як звичайні склопластики і вибір швидкості різання буде обмежуватись допустимою рекомендованою швидкістю для таких інструментів і необхідним коефіцієнтом розшарування. Відповідно до отриманих результатів рис. 6

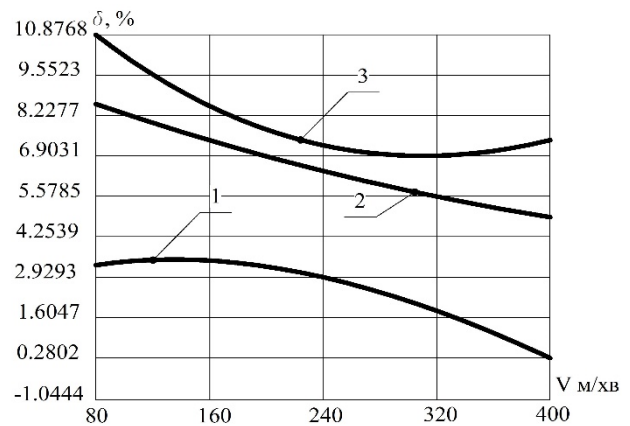


Рис. 6. Графік залежності коефіцієнта розшарування від зміни значення швидкості різання (V) та при постійному значенні глибини різання (t): 1–0,4 мм, 2–2,2 мм, 3–4 мм

вплив зміни значення глибини різання на коефіцієнт розшарування в залежності від швидкості різання носить нелінійний характер, для малих товщин різання, крива 1 (рис. 6) має випуклу форму і значення коефіцієнту розшарування на певних швидкостях в межах робочої ділянки може досягати свого максимуму відповідно треба уникати використання таких значень при обробці. Для товщини різання 2,2 мм, крива 2 (рис. 6) залежність має лінійний характер, тому відповідно вибір швидкості різання буде обмежуватись допустимою рекомендованою швидкістю для таких інструментів і необхідним коефіцієнтом розшарування. Для більших значень товщини різання, що відповідає більшій продуктивності обробки, крива 3 (рис. 6) має ввігнуту форму – екстремальний характер і для отримання мінімального коефіцієнта розшарування необхідно вибирати потрібне значення швидкості різання. Таким чином встановлено, що на коефіцієнт розшарування в значній мірі впливає товщина різання матеріалу, при чому цей вплив нелінійний ніж величина пода-

чі і в залежності від виду обробки чистовий чи чорновий прохід необхідно вибирати потрібну швидкість різання, що буде забезпечувати необхідну якість отриманої поверхні.

В результаті досліджень, було розроблено методику визначення параметрів різання при кінцевому фрезеруванні для шаруватих скловолоконних композитів типу пултрузійний склопластик, що враховує обмеження величини розшарування обробленої поверхні. Адекватність розробленої методики підтверджена порівнянням результатів аналітичного моделювання та практичним експериментом з обробки деталей з пултрузійного склопластику, визначено залежності між режимами різання.

Висновки

За результатами досліджень розроблено математичну модель (3) обробки кінцевим фрезеруванням пултрузійного склопластику за допомогою програмного забезпечення ПРІАМ [17], розрахунками встановлено що вона адекватна і корелюється з результатами проведених експериментів, і може бути використана для визначення коефіцієнта розшарування.

Також встановлено, що в залежності від товщини різання, що впливає на вид обробки фрезеруванням, а саме, це чистова чи чорнова обробка криві залежності коефіцієнта розшарування мають екстремальний характер в межах досліджуваних швидкостей, при чому для чистових проходів треба уникати ці швидкості (крива 1, рис. 6) так як вони за результатами досліджень дають максимальне значення коефіцієнту розшарування, а для чорнових проходів, щоб збільшити продуктивність обробки і підвищити якість обробленої поверхні треба обирати ці значення швидкості (крива 3, рис. 6), тому що вони дають мінімальне значення коефіцієнт розшарування.

За числовими значеннями отримано наступне:

1. При постійній швидкості різання та глибині різання, при збільшенні подачі коефіцієнт розшарування зростає, зміна подачі в межах від 0,01 до 0,14 мм/зуб, приводить до зміни коефіцієнта розшарування від 1.31 до 8.2 %.

2. При постійній подачі та глибині різання, при збільшенні швидкості різання коефіцієнт розшарування зменшується, зміна швидкості в межах від 80 до 400 м/хв, приводить до зміни коефіцієнта розшарування від 0.2 до 2.9 %.

References

- [1] A. Kaw, *Mechanics of composite materials*, New York, 2006, doi: 10.1201/9781420058291.
- [2] E. Uflyand, I. Dzhardimalieva, *Nanomaterials preparation by thermolysis of metal chelates*, 1st ed. Reading, Cham, 2018, doi: 10.1007/978-3-319-93405-1_1.
- [3] G. Sih, E. Chen, *Cracks in composite materials: a compilation of stress solutions for composite systems with cracks*, Boston, 1981, doi: 10.1007/978-94-009-8340-3.
- [4] S. Palanisamy, M. Kalimuthu, "Fabrication and testing analysis of natural fibre composite materials", *IEEE Trans. Comp.*, Vol. 5, pp: 285–288, April 2016, doi: 10.17950/ijer/v5s4/414.
- [5] S. Sukumar, S. Mahendran, M. Kannan, Experimental Investigation of Aluminium Based Composite, *World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences*, 2022, 07(02), pp:189–194.
- [6] S. Arulvel, K. Jayakrishn, Composite and Composite Coatings, *Mechanical and Tribology Aspect*, Boca Raton, 2022, doi: 10.1201/9781003109723.
- [7] L. Maio, *Computational Modeling of Damage and Fracture in Composite Materials*, Dallas, 2022., doi: 10.3390/s22145182.
- [8] P. Camanho, R. Hallett, "Numerical Modelling of Failure in Advanced Composite Materials", Sawston, 2015. Available: https://www.researchgate.net/publication/285430460_Numerical_Modelling_of_Failure_in_Advanced_Composite_Materials.
- [9] Vijay Kumar Thakur, Manju Kumari Thakur, Raju Kumar Gupta, "Hybrid Polymer Composite Materials", 2017. Available: https://www.perlego.com/book/1827452/hybrid-polymer-composite-materials-processing-pdf?utm_source=google&utm_medium=cpc&campaignid=20933451054&adgroupid=162926082892&gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwo8S3BhDeARIsAF-RmkOOxvCvpwq2i5PV0112dF6rgDNDVltTN87h0kDoil4edsq1XUZhb3fMAaAqpHEALw_wcB.
- [10] R. Somashekar, G. Thejas, *Emergent Research on Polymeric and Composite Materials*, Pennsylvania, 2017, doi: 10.4018/978-1-5225-3023-7.
- [11] L. McManus, C. Chamis, *Stress and Damage in Polymer Matrix Composite Materials Due to Material Degradation at High Temperatures*, Cleveland, 1996. Available: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19960015894/downloads/19960015894.pdf>.
- [12] Y. Charles, *Damage and Repair of Aerospace Composite Materials*, SAE International, 2019, doi: 10.4271/9780768001181.
- [13] V. Pronin, "Optimization of cutting modes for processing parts made of composite materials", master's thesis in Applied Mechanics, Kyiv, 2023.
- [14] Modular house by Haus.me. Available: <https://haus.me>.

- [15] ProtEX Vortex A/C – 8130. Available: <https://www.vortec.com/en-us/protex-vortex-ac/8170>.
- [16] S. Lapach and S. Radchenko, “Mathematical modeling of high-strength steel processing”, *Mech. Adv. Technol.*, No. 1(85), pp. 101–110, Apr. 2019, doi: 10.20535/2521-1943.2019.85.160358.
- [17] S. Lapach, S. Radchenko, P. Babich, “Planning, regression and analysis of PRIAM models (PRIAM)”, Kyiv, 1993.
- [18] Cutting tooth cutter with high-speed steel R6M5. Available: <https://kvrc.in.ua/ua/p727809828-freza-kontsevaya-r6m5.html>.

Technological support for processing pultruded glass fiber reinforced plastics

V. Pronin¹ • O. Okhrimenko¹ • D. Shuplietsov¹ • V. Nochvaj²

¹ Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

² Zhytomyr Polytechnic University, Zhytomyr, Ukraine

Abstract. The issues arising in production facilities engaged in processing composite materials are considered. Specifically, the solutions to problems encountered in the mechanical processing of composites are analyzed based on foreign scientific research and proprietary solutions employed in the enterprise. The main issues addressed include delamination of pultruded glass fiber reinforced plastics and the selection of proper cutting fluid for processing. A mathematical model for calculating cutting regimes has been developed. The mathematical model has been validated through experiments to determine the delamination coefficient with the calculated cutting regimes. The machining process of the workpiece has been simulated in the Ansys system using the Lagrangian approach with the finite element method. A computational experiment has been conducted using the PRLAM software. A methodology for designing final milling operations based on the criterion of limiting delamination and ensuring the specified surface roughness of laminated glass fiber reinforced composites has been developed. It has been established that with a constant cutting speed and depth of cut, and varying only the feed rate, delamination increases with increased feed rate. It has been found that with the same depth of cut and feed rate, and varying cutting speed, the surface quality is satisfactory, indicating a lower delamination coefficient. The mathematical model based on the conducted experiments has proven to be practical and effective for determining an approximate delamination coefficient. The obtained results have proven to be practical and are used in enterprises engaged in the mechanical processing of glass fiber reinforced plastics.

Keywords: milling of composite materials, delamination coefficient, pultruded glass fiber reinforced plastics processing, cutting fluid for composite materials.