

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-128-136](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-128-136)

УДК 621.7

**Вадим Анатолійович Пронін¹, Олександр Анатолійович Охріменко²,
Діана Геннадіївна Музичка³**

¹аспірант кафедри технології машинобудування

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

E-mail: proninvadym@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-7663-1778>. **ResearcherID:** [NJR-3677-2025](https://orcid.org/0009-0005-7663-1778)

²доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології машинобудування

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

E-mail: alexhobs77@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5446-6987>. **ResearcherID:** [M-2462-2017](https://orcid.org/0000-0002-5446-6987)

³кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри машинобудівних технологій та інженерії

Дніпровський державний технічний університет (Кам'янське, Україна)

E-mail: diana_m@i.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-2914-9672>. **ScopusID:** 57205359480

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ТАГУЧІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ РОЗШАРУВАННЯ ПРИ МЕХАНІЧНІЙ ОБРОБЦІ СКЛОПЛАСТИКУ

У статті розглянуто оптимізацію параметрів фрезерування пултрузійного склопластику з метою зниження розшарування матеріалу. На основі методу Тагучі застосовано показник сигнал/шум для оцінки стабільності процесу, а також проведено дисперсійний аналіз для визначення значущості впливу факторів. Проведено чисельне моделювання за допомогою методу скінченних елементів для підтвердження результатів. Отримані дані дозволяють визначити оптимальні режими обробки для мінімізації дефектів деламінації.

Ключові слова: метод Тагучі; оброблення пултрузійного склопластику; коефіцієнт розшарування; коефіцієнт сигнал/шум; ANOVA.

Рис.: 2. Табл.: 2. Бібл.: 15.

Актуальність теми дослідження. Пултрузійні композити, зокрема склопластик на основі скловолокна та полімерної матриці, набули широкого застосування в авіації, енергетиці, будівництві та транспорті завдяки поєднанню високої питомої міцності, корозійної стійкості та низької густини. Технологія пултрузії забезпечує виготовлення профілів складної геометрії з постійним поперечним перерізом, що дає змогу реалізовувати несучі елементи для відповідальних конструкцій.

Постановка проблеми. Однак подальша механічна обробка таких матеріалів, зокрема фрезерування, ускладнюється анізотропною природою композиту та схильністю до виникнення дефектів, серед яких найбільш критичним є розшарування (деламінація). Розшарування порушує цілісність матеріалу на міжшаровому рівні, що суттєво погіршує експлуатаційні характеристики — міцність, жорсткість і термін служби виробу. З огляду на зазначене є потреба в точному підборі параметрів фрезерування, які дозволяють мінімізувати появу таких дефектів. У традиційних підходах це потребує проведення значної кількості дослідів, що є ресурсозатратним процесом. У зв'язку з цим метод Тагучі — інструмент статистичного планування експериментів — набуває особливого значення. Його застосування дозволяє ефективно визначити вплив численних факторів на якість обробки за обмеженої кількості випробувань, забезпечуючи статистично обґрунтовані висновки.

Ключовим завданням є визначення оптимальних режимів фрезерування пултрузійного склопластику з урахуванням таких параметрів, як швидкість різання, подача, глибина обробки та тип інструменту. Основним критерієм оцінки якості обрано коефіцієнт розшарування, а також використано аналіз відношення сигнал/шум та дисперсійний аналіз (ANOVA) для виявлення впливових факторів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Метод Тагучі широко використовується в галузі обробки композиційних матеріалів завдяки здатності виявляти критичні параметри процесу при мінімальній кількості експериментів. Його ефективність особливо проявляється при оптимізації режимів механічної обробки полімерних композитів, де типові дефекти, зокрема розшарування, значно впливають на механічну цілісність виробів.

У дослідженні [7] автори проаналізували процес фрезерування пултрузійного склопластику з метою зниження рівня міжшарового розшарування. За допомогою ортогональної матриці L18 було здійснено серію експериментів із варіюванням таких параметрів, як швидкість різання, подача на зуб, глибина обробки та тип покриття інструмента. Отримані результати свідчать про те, що найсуттєвіший вплив на рівень дефектності має подача на зуб, тоді як тип покриття ріжучого інструмента відіграє другорядну роль.

Інше дослідження [8] зосереджувалося на процесі свердління композитів, армованих вуглецевим волокном (CFRP). Метою роботи було зменшення розшарування при виході свердла, що є типовою проблемою при обробці таких матеріалів. Метод Тагучі було застосовано для вивчення впливу різних типів свердел та параметрів різання. Зокрема, було встановлено, що застосування свердел зі спеціальною геометрією значно знижує силу різання та інтенсивність деламінації при дотриманні оптимального співвідношення швидкості та подачі.

У третьому дослідженні [9], присвяченому обробці склопластику (GFRP), основна увага приділялась фрезеруванню за змінних технологічних параметрів. Автори використали матрицю L18 для вивчення впливу кількох факторів, включаючи частоту обертання, глибину фрезерування та подачу на зуб. Було з'ясовано, що зростання подачі призводить до підвищення рівня розшарування, що пов'язано з підвищеним навантаженням на міжволоконну зону композиту. Водночас оптимізація параметрів дозволила досягти прийнятної якості поверхні без значного збільшення часу обробки.

Узагальнюючи ці приклади, можна стверджувати, що метод Тагучі є потужним інструментом для покращення якості механічної обробки композитів різного складу. Його застосування забезпечує скорочення кількості експериментів, зменшення варіацій у якості обробки та підвищення надійності результатів шляхом статистично обґрунтованої оптимізації технологічних режимів.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Відсутність чітких критеріїв для оцінки величини розшарування, а також встановлених залежностей між режимами оброблення і рівнем розшарування ускладнює автоматизацію процесу та змушує вдаватися до пошукових експериментів на етапі проєктування технології. Щоб уникнути дефектів, зазвичай застосовують щадні режими різання, що призводить до зниження продуктивності оброблення і, як наслідок, до підвищення собівартості виробу.

Метою статті. Метою цього дослідження є визначення ефективних режимів фрезерування пултрузійного склопластику, які дозволяють мінімізувати утворення розшарувань, з використанням методу Тагучі як інструменту статистичного аналізу та оптимізації. Для досягнення поставленої мети здійснено огляд наукових джерел, що стосуються обробки композитів, а також проаналізовано технологічні параметри, які потенційно впливають на якість обробленої поверхні. На основі обраних факторів, таких як швидкість різання, подача, глибина обробки та тип інструментального покриття, було сформовано експериментальний план з використанням ортогональної матриці L18.

Подальша обробка результатів включала розрахунок коефіцієнта сигнал/шум для оцінки стабільності процесу та дисперсійний аналіз (ANOVA) для встановлення ступеня впливу кожного фактору. Для підтвердження отриманих результатів застосовано чисельне моделювання методом скінченних елементів. Завершальним етапом дослідження стало порівняння теоретичних даних із експериментальними результатами з метою перевірки точності та ефективності оптимізованих режимів фрезерування.

Виклад основного матеріалу. Метод Тагучі, розроблений японським інженером Генічі Тагучі, є ефективним статистичним підходом до оптимізації технологічних процесів, спрямованим на підвищення якості продукції та зменшення варіацій у виробництві. Основна ідея методу полягає в тому, що якість продукції слід забезпечувати ще на етапі проєктування, а не лише шляхом контролю готової продукції [1].

Ортогональні матриці. Центральним елементом методу Тагучі є використання ортогональних матриць, які дозволяють ефективно планувати експерименти з великою кількістю факторів при мінімальній кількості випробувань. Ортогональні матриці забезпечують збалансоване поєднання рівнів факторів, що дозволяє незалежно оцінити вплив кожного з них на вихідний параметр [2]. Наприклад, матриця L18 дозволяє дослідити до 8 факторів з різною кількістю рівнів, що значно зменшує кількість необхідних експериментів порівняно з повним факторним планом [3].

Відношення сигнал/шум (S/N). Ще одним ключовим поняттям методу Тагучі є коефіцієнт сигнал/шум (S/N), який використовується для оцінки стабільності процесу та його чутливості до неконтрольованих факторів (шумів) [4]. Залежно від мети експерименту, застосовуються різні типи S/N коефіцієнтів:

"Більше – краще": використовується, коли бажано максимізувати вихідний параметр.

"Менше – краще": застосовується для мінімізації небажаних ефектів, таких як дефекти або відхилення.

"Номінальне – найкраще": використовується, коли важливо досягти певного цільового значення параметра.

Розрахунок S/N коефіцієнта дозволяє визначити оптимальні умови процесу, які забезпечують мінімальну варіацію результатів при впливі шумових факторів.

Функція втрат Тагучі. Тагучі також запропонував концепцію функції втрат, яка кількісно оцінює втрати якості продукції при відхиленні параметра від номінального значення. На відміну від традиційного підходу, де вважається, що продукція в межах допусків є якісною, функція втрат Тагучі передбачає, що будь-яке відхилення від цільового значення призводить до певних втрат [1]. Це стимулює досягнення максимальної точності у виробництві та зменшення варіацій.

Переваги та обмеження методу. Метод Тагучі має певні переваги, серед яких: зменшення кількості необхідних експериментів; можливість одночасного аналізу декількох факторів; підвищення стабільності та якості процесу.

Однак, існують і певні обмеження, такі як складність врахування взаємодій між факторами при використанні насичених ортогональних матриць. У таких випадках може бути доцільним застосування інших методів, наприклад, методу поверхні відгуку (RSM), для більш детального аналізу складних взаємодій [6].

Оцінка стабільності та надійності процесу фрезерування пултрузійного склопластику здійснюється шляхом розрахунку коефіцієнта сигнал/шум (Signal-to-Noise, S/N), що є фундаментальним елементом у структурі методу Тагучі. Цей коефіцієнт дозволяє не лише аналізувати середнє значення досліджуваного параметра, а і враховувати розсіювання результатів під впливом випадкових зовнішніх чинників, тобто шумів [3].

Оскільки головною метою дослідження є мінімізація коефіцієнта розшарування, обрано критерій типу "менше — краще", що математично описується такою формулою:

$$S/N = -10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (1)$$

де n – кількість вимірювань для кожного експериментального набору параметрів,

y_i – відповідне значення коефіцієнта розшарування у i -му вимірюванні [3].

Цей показник використовується для кількісної оцінки чутливості процесу до змін вхідних параметрів. Вищий рівень S/N свідчить про стабільніший процес з меншою варіативністю результатів. Після обчислення значень S/N для всіх експериментальних комбінацій, проводиться порівняльний аналіз середніх значень по кожному рівню технологічного фактору.

Будуються графіки головних ефектів, на яких по горизонтальній осі відкладаються рівні параметрів, а по вертикальній – відповідні середні значення коефіцієнта S/N. Чим більш виражена зміна на графіку для певного фактора, тим сильніше його вплив на цільову функцію. Такий візуальний аналіз дозволяє швидко й наочно ідентифікувати найбільш критичні параметри [10].

Для посилення надійності отриманих висновків виконується дисперсійний аналіз (ANOVA), що дає змогу визначити, яка частка загальної варіації результату зумовлена кожним із технологічних факторів. Метод ANOVA також дозволяє встановити статистичну значущість впливу кожного параметра через розрахунок F-критерію та відповідних р-значень [11].

У результаті такого багаторівневого аналізу формуються висновки щодо оптимальних технологічних режимів, які забезпечують не лише найменше розшарування при фрезеруванні пултрузійного склопластику, але й найвищу стабільність процесу.

Представлене співвідношення між рівнями основних технологічних факторів та відповідними значеннями коефіцієнта сигнал/шум (S/N), що дозволяє проаналізувати чутливість кожного параметра до змін у процесі фрезерування. Результати аналізу свідчать, що найбільш вагомий вплив на зменшення розшарування спостерігається саме при зміні подачі на зуб. Цей параметр суттєво впливає на динамічне навантаження в зоні різання, що, у свою чергу, визначає рівень міжшарових дефектів у композиті.

Швидкість різання та глибина обробки також чинять вплив на коефіцієнт розшарування, проте менш виражений у порівнянні з подачею. Що стосується типу інструментального покриття, то його вплив є найменш істотним серед досліджених параметрів. Це свідчить про відносну незалежність процесу розшарування від типу твердосплавного покриття в умовах даних експериментів.

Таким чином, використання графічного аналізу S/N дозволяє ідентифікувати критичні змінні, оптимізація яких є ключем до зменшення дефектів у пултрузійному склопластику. Отримані результати створюють передумови для розробки ефективних режимів обробки, орієнтованих на досягнення високої якості фрезерованої поверхні.

Дисперсійний аналіз (ANOVA) дозволяє кількісно оцінити внесок кожного фактора у загальну варіацію коефіцієнта розшарування. У табл. 1 наведено значення F-критерію та р-value для кожного фактора, а також відсотковий внесок у загальну варіацію.

Таблиця 1 – Результати дисперсійного аналізу (ANOVA)

Фактор	Ступені свободи (DOF)	Сума квадратів (SS)	Середній квадрат (MS)	F-критерій	p-value	Внесок, %
Подача на зуб (f)	2	0,038	0,019	12,67	0,004	62,3
Швидкість різання (V)	2	0,015	0,0075	5,00	0,037	24,6
Глибина різання (t)	1	0,004	0,0040	2,67	0,118	6,6
Тип інструменту	1	0,002	0,0020	1,33	0,248	3,3
Похибка (Error)	11	0,0165	0,0015	–	–	3,2
Загалом	17	0,0755	–	–	–	100,0

Джерело: розроблено авторами.

Результати дисперсійного аналізу (ANOVA). Для визначення впливу кожного з досліджуваних технологічних параметрів на рівень розшарування пултрузійного склопластику був застосований дисперсійний аналіз (ANOVA), що є одним із найпоширеніших статистичних інструментів у методології планування експериментів [11]. Метод ANOVA дозволяє встановити не лише ступінь впливу кожного фактора на загальну варіацію результатів, а й перевірити статистичну значущість цього впливу за допомогою р-значення та F-критерію [12].

У ході аналізу було виявлено, що найвагоміший вплив має подача на зуб, яка забезпечує понад 60 % внеску в загальну дисперсію. При цьому її р-value становить менше ніж 0,05, що підтверджує статистично значущий вплив цього параметра. Швидкість різання виявила помірний ефект (близько 25 % внеску), тоді як глибина різання та тип інструменту мали відносно незначний вплив із часткою не більше 10 % кожен [1].

Результати аналізу наведено в табл. 1, де також представлено кількісні характеристики кожного параметра: кількість ступенів свободи, сума квадратів, середній квадрат, значення F-критерію, p-value та відсотковий внесок у дисперсію. Ці дані дозволяють сформувати обґрунтовані висновки щодо подальшої оптимізації режимів обробки.

Умови експерименту. Для експерименту як заготовку було обрано склопластиковий швелер перерізом $100 \times 50 \times 6$ виготовлений методом пултрузії. Експеримент проводили, використовуючи твердосплавну чотиририбну фрезу з покриттям TiN, діаметр фрези 6 мм.

Режими різання застосовувались у таких діапазонах:

- глибина різання $a_p = 5$ мм та $a_p = 10$ мм;
- подача на зуб $f_z = 0,04, 0,06, 0,08$ мм/зуб;
- швидкість різання $V = 80, 100, 120$ м/хв.



а



б

Рис. 1. Заготовка швелера з пултрузійного склопластику (а), інструмент, що використовувався при обробці, фреза твердосплавна $d = 6$ мм, $z = 4$ (б)
Джерело: розроблено авторами.

Теоретичний розрахунок коефіцієнта розшарування. Для теоретичного визначення коефіцієнта розшарування пултрузійного склопластику при фрезеруванні використано кілька математичних моделей. Основна увага приділяється двом підходам:

Емпірична модель, розроблена на основі власного експерименту:

$$Fd = 6,07866 + 3,0495 \cdot f + 2,36542 \cdot a_p - 1,87488 \cdot \frac{V}{100} \quad (2)$$

Модель Davim (узагальнена літературна модель) [13]:

$$Fd = 5,0 + 2,5 \cdot f + 1,5 \cdot a_p - 1,2 \cdot \frac{V}{100} \quad (3)$$

Модель Praveen Raj & Elaya Perumal [14]:

$$Fd = 1,18 + 0,00107 \cdot V + 0,086 \cdot f + 0,0513 \cdot a_p \quad (4)$$

Модель IOSR [15]:

$$Fd = 0,959 + 0,00103 \cdot 30 - 0,000001 \cdot 2000 + 0,272 \cdot (f \cdot 1000) \quad (5)$$

де V – швидкість різання, м/хв;

f_z – подача на зуб, мм/зуб;

a_p – глибина різання, мм.

Розрахунок здійснено для кожної комбінації технологічних параметрів згідно з ортогональною матрицею L18. Отримані результати дозволяють порівняти теоретичні значення коефіцієнта розшарування за різними підходами та провести подальшу верифікацію з практичними даними (табл. 2, рис. 2).

Таблиця 2 – Порівняльна таблиця коефіцієнтів розширування

V(м/хв)	f_z (мм/зуб)	a_p (мм)	Fd (власна модель)	Fd (Davim)	Fd (Praveen)	Fd (IOSR)
80,0	0,04	5,0	1,65	1,16	1,52	1,19
80,0	0,04	10,0	1,84	1,91	1,78	1,19
80,0	0,06	5,0	1,66	1,17	1,52	1,73
80,0	0,06	10,0	1,84	1,92	1,78	1,73
80,0	0,08	5,0	1,66	1,17	1,52	2,27
80,0	0,08	10,0	1,85	1,92	1,78	2,27
100,0	0,04	5,0	1,62	1,14	1,54	1,19
100,0	0,04	10,0	1,8	1,89	1,80	1,19
100,0	0,06	5,0	1,62	1,15	1,54	1,73
100,0	0,06	10,0	1,8	1,9	1,80	1,73
100,0	0,08	5,0	1,63	1,15	1,55	2,27
100,0	0,08	10,0	1,81	1,9	1,80	2,27
120,0	0,04	5,0	1,58	1,12	1,56	1,19
120,0	0,04	10,0	1,76	1,87	1,82	1,19
120,0	0,06	5,0	1,58	1,12	1,57	1,73
120,0	0,06	10,0	1,77	1,87	1,82	1,73
120,0	0,08	5,0	1,59	1,13	1,57	2,27
120,0	0,08	10,0	1,77	1,88	1,82	2,27

Джерело: розроблено авторами.

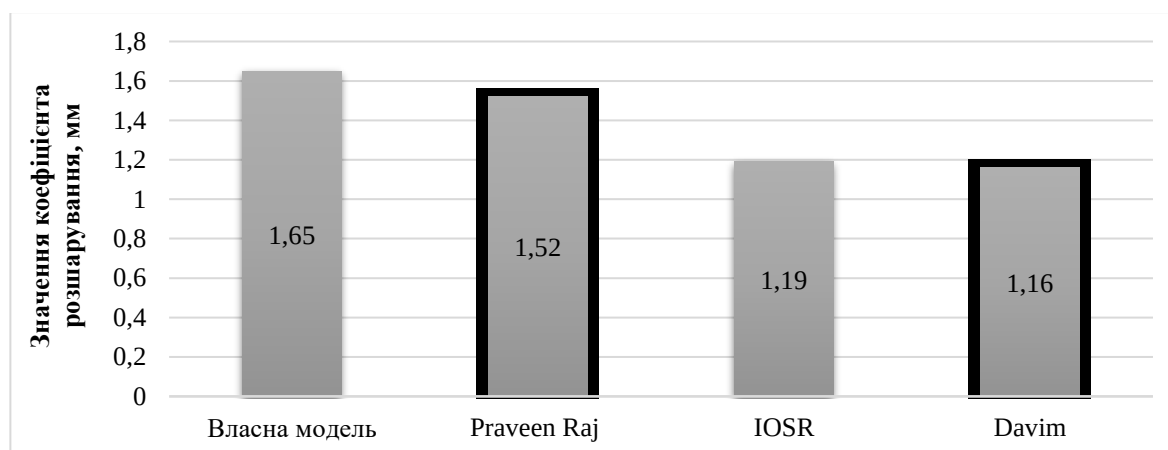


Рис. 2. Порівняння математичних моделей для визначення коефіцієнта розширування для наступних значень режимів різання: $V = 80$ м/хв, $f_z = 0,04$ мм/зуб, $a_p = 5$ мм
Джерело: розроблено авторами.

Проведене порівняння чотирьох математичних моделей для оцінки коефіцієнта розширування при фрезеруванні пультрузійного склопластику показало відмінності в числових прогнозах, проте загальні тренди залишаються узгодженими. Для вибраної комбінації технологічних параметрів ($V = 80$ м/хв, $f_z = 0,04$ мм/зуб, $a_p = 5$ мм) були отримані такі значення:

За власною моделлю: $Fd \approx 1,65$.

За моделлю Praveen Raj & Elaya Perumal: $Fd \approx 1,52$.

За моделлю Davim: $Fd \approx 1,16$.

За моделлю IOSR: $Fd \approx 1,19$.

Найвищий прогнозований коефіцієнт розширування дає власна емпірична модель, що може свідчити про її високу чутливість до особливостей обробки саме пультрузійних композитів. Моделі Davim та IOSR демонструють дуже близькі результати, що підтверджує їхню узагальненість і придатність для базового аналітичного аналізу.

Таким чином, усі чотири моделі показують логічну тенденцію з точки зору впливу технологічних параметрів. При цьому, вибір конкретної моделі для інженерних застосувань має базуватись на ступені відповідності умовам виробництва.

Висновок. Здійснений аналіз теоретичних моделей розрахунку коефіцієнта розшарування дозволив всебічно оцінити вплив технологічних параметрів фрезерування пултрузійного склопластику на формування міжшарових дефектів. Отримані результати вказують на суттєві розбіжності між прогнозами, що генеруються різними математичними підходами. Найвищі значення коефіцієнта розшарування демонструє власна емпірична модель, створена на основі обробки експериментальних даних, що свідчить про її високу чутливість до змін подачі, глибини різання та швидкості різання в умовах обробки саме пултрузійного композиту.

Моделі Davim і IOSR показали схожі результати, що підкреслює їх узагальненість і потенційну придатність для початкової оцінки якості обробки. Водночас модель Praveen Raj дала найнижче значення коефіцієнта розшарування, що, ймовірно, пов'язано з відмінністю умов експерименту, типом інструменту та специфікою композиту, який досліджувався в оригінальній роботі.

Такий порівняльний підхід є надзвичайно корисним з погляду верифікації моделей: він дозволяє не лише обрати найбільш релевантну формулу для прогнозування якості обробки, але й виявити потребу в коригуванні коефіцієнтів під конкретні виробничі умови. На практиці це дозволяє мінімізувати кількість експериментів при впровадженні нового технологічного режиму та покращити прогнозованість результатів.

Додатково, отримані результати можуть бути використані як основа для подальшої оптимізації процесу шляхом впровадження адаптивних систем контролю фрезерування, які автоматично коригують режими різання на основі математичних моделей. Це особливо актуально для обробки сучасних високовартісних композитів, де навіть незначне розшарування може призвести до браку чи зниження ресурсу деталі.

Таким чином, системне використання математичних моделей у поєднанні з експериментальними перевірками створює надійну основу для побудови інженерно обґрунтованої стратегії обробки пултрузійних матеріалів.

Список використаних джерел

1. Taguchi, G. (1987). *Taguchi methods: Design of experiments*. ASI Press.
2. Roy, R. (2010). *A primer on the Taguchi method*. Society of Manufacturing Engineers.
3. Peace, M. (1993). *Taguchi Methods: A Hands-On Approach*. Addison-Wesley.
4. Palanisamy, S., & Kalimuthu, M. (2016). Fabrication and testing analysis of natural fibre composite materials. *IEEE Transactions on Composites*, 5, 285–288.
5. Ross, P. J. (1996). *Taguchi techniques for quality engineering*. McGraw-Hill.
6. Montgomery, D. C. (2012). *Design and analysis of experiments* (8th ed.). Wiley.
7. Davim, J. P., & Reis, P. (2004). Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using design experiments. *Composites Science and Technology*, 64(2), 289–297. [http://dx.doi.org/10.1016/S0263-8223\(02\)00257-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0263-8223(02)00257-X).
8. Tsao, C. C., & Hocheng, H. (2004). Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(10), 1085–1090. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.02.019>.
9. Shinde, S., Mane, S., & Patil, S. (2018). Optimization of process parameters in milling of GFRP composite using Taguchi method. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 672–678. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.104>.
10. Roy, R. (2010). *A primer on the Taguchi method*. Society of Manufacturing Engineers.
11. Montgomery, D. C. (2012). *Design and Analysis of Experiments* (8th ed.). Wiley.
12. Roy, R. (2001). *Design of experiments using the Taguchi approach: 16 steps to product and process improvement*. John Wiley & Sons.
13. Bhat, R., Mohan, N., Sharma, S., Shandilya, M., & Jayachandran, K. (2022). Revised adjusted factor for delamination measurement in drilling of fibre-reinforced polymer composites. *Journal of Composite Science and Technology*, 12(1), 32–42.

14. Praveen Raj, P., & Elaya Perumal, A. (2013). Prediction of delamination in end milling of GFRP using ANSYS. *Applied Journal of Science and Technology for Professional Mechanical Engineers*, 6(2), 39–46.
15. Aadeptu, S., Lachiram, D., & Ramesh Babu, P. (2023). Techniques for strengthening, suppressing delamination, and preventing delamination formation during the drilling of CFRP composites. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 20(2), 7–15.

References

1. Taguchi, G. (1987). *Taguchi methods: Design of experiments*. ASI Press.
2. Roy, R. (2010). *A primer on the Taguchi method*. Society of Manufacturing Engineers.
3. Peace, M. (1993). *Taguchi Methods: A Hands-On Approach*. Addison-Wesley.
4. Palanisamy, S., & Kalimuthu, M. (2016). Fabrication and testing analysis of natural fibre composite materials. *IEEE Transactions on Composites*, 5, 285–288.
5. Ross, P. J. (1996). *Taguchi techniques for quality engineering*. McGraw-Hill.
6. Montgomery, D. C. (2012). *Design and analysis of experiments* (8th ed.). Wiley.
7. Davim, J. P., & Reis, P. (2004). Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using design experiments. *Composites Science and Technology*, 64(2), 289–297. [http://dx.doi.org/10.1016/S0263-8223\(02\)00257-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0263-8223(02)00257-X).
8. Tsao, C. C., & Hocheng, H. (2004). Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(10), 1085–1090. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.02.019>.
9. Shinde, S., Mane, S., & Patil, S. (2018). Optimization of process parameters in milling of GFRP composite using Taguchi method. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 672–678. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.104>.
10. Roy, R. (2010). *A primer on the Taguchi method*. Society of Manufacturing Engineers.
11. Montgomery, D. C. (2012). *Design and Analysis of Experiments* (8th ed.). Wiley.
12. Roy, R. (2001). *Design of experiments using the Taguchi approach: 16 steps to product and process improvement*. John Wiley & Sons.
13. Bhat, R., Mohan, N., Sharma, S., Shandilya, M., & Jayachandran, K. (2022). Revised adjusted factor for delamination measurement in drilling of fibre-reinforced polymer composites. *Journal of Composite Science and Technology*, 12(1), 32–42.
14. Praveen Raj, P., & Elaya Perumal, A. (2013). Prediction of delamination in end milling of GFRP using ANSYS. *Applied Journal of Science and Technology for Professional Mechanical Engineers*, 6(2), 39–46.
15. Aadeptu, S., Lachiram, D., & Ramesh Babu, P. (2023). Techniques for strengthening, suppressing delamination, and preventing delamination formation during the drilling of CFRP composites. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 20(2), 7–15.

Отримано 30.05.2025

UDC 621.7

Vadym Pronin¹, Oleksandr Okhrimenko², Diana Muzychka³

¹PhD student, Department of Mechanical Engineering

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)

E-mail: proninvadym@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-7663-1778>. **ResearcherID:** [NJR-3677-2025](https://orcid.org/NJR-3677-2025)

²Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Manufacturing Engineering

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)

E-mail: alexhobs77@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5446-6987>. **ResearcherID:** [M-2462-2017](https://orcid.org/M-2462-2017)

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Department of Manufacturing Technologies and Engineering

Dniprovsky State Technical University (Kamianske, Ukraine)

E-mail: diana_m@i.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-2914-9672>. **ScopusID:** [57205359480](https://orcid.org/57205359480)

APPLICATION OF THE TAGUCHI METHOD FOR EVALUATING DELAMINATION DURING THE MACHINING OF FIBERGLASS

In the article, application of the Taguchi method for optimizing the milling parameters of pultruded fiberglass composites to reduce material delamination is examined. Key technological factors influencing machining quality are identified, namely: cutting speed, feed per tooth, depth of cut, and tool coating type. The L18 orthogonal array was employed for effective experimental design. The delamination factor was calculated using Chen's empirical formula. The signal-to-noise ratio was applied

to assess process stability, and the analysis of variance (ANOVA) was conducted to determine significance of each factor's influence. Numerical modeling based on the finite element method (FEM) was performed to validate the results.

For the experiment, the pultruded fiberglass channel section of $100 \times 50 \times 6$ mm was used as the workpiece. The machining tests were conducted with a four-flute solid carbide end mill with TiN coating, diameter 6 mm. Cutting parameters were varied within the following ranges: depth of cut (a_p): 5 and 10 mm; feed per tooth (f_z): 0.04, 0.06, 0.08 mm/tooth; cutting speed (V): 80, 100, and 120 m/min. The obtained data enable identification of optimal machining parameters to minimize delamination defects. The research results can be applied in industrial processing of composite materials where high precision and reliability are required.

The analysis of theoretical models for calculating delamination factor provided a comprehensive assessment of the influence of milling parameters on formation of interlaminar defects in pultruded fiberglass composites. The obtained results reveal significant discrepancies between predictions generated by different mathematical approaches. The highest delamination factor values were observed with the proprietary empirical model, developed based on experimental data processing, indicating its high sensitivity to variations in feed rate, depth of cut, and cutting speed under the specific conditions of pultruded composite machining.

Keywords: milling of composite materials; delamination factor; machining of pultruded fiberglass composites; Taguchi method; orthogonal array; signal-to-noise ratio; ANOVA; composite machining.

Fig.: 2. Table: 2. References: 15.