

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕХАНІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ ВОЛОКНИСТИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ВІБРАЦІЙНОГО РІЗАННЯ

Сичов Ю. І.¹, Вародов К. С.²

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

² Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія» Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна

Анотація. Оброблення волокнистих полімерних композиційних матеріалів (ВПКМ) супроводжується низкою технологічних труднощів, зумовлених їх анізотропною структурою, низькою теплопровідністю, різною жорсткістю матриці й армувальних волокон. Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності механічного оброблення композитів є застосування вібраційного (ультразвукового) різання.

Ключові слова: склопластик, органопластик, композитні матеріали, вібраційне різання, амплітуда коливання, напрямок армування.

Вступ

У сучасному машинобудуванні дедалі ширше використовують волокнисті полімерні та металеві композити, які поєднують високу міцність і низьку густину. Однак їх структура суттєво ускладнює традиційні процеси механічного оброблення. Під час різання таких матеріалів виникають високі сили різання, підвищується зношування інструменту й пошкодження волокон. Одним з ефективних способів покращення якості оброблення є застосування вібраційного або ультразвукового різання.

Аналіз публікацій

Згідно з роботою [1], вібраційне різання передбачає накладення коливань інструмента з частотою до 20–40 кГц і амплітудою кілька мікрометрів у напрямку різання або перпендикулярно до нього. Це призводить до періодичного розриву контакту між інструментом і заготовкою, що знижує сили різання, температуру в зоні оброблення та зношування різальної кромки. Випробування, описані в роботі [2], продемонстрували, що в процесі ультразвукового фрезерування вуглепластику (полімерний композитний матеріал, що містить полімерну матрицю та високоміцні вуглецеві волокна) зі збільшенням коефіцієнта заповнення зменшуються сили різання до 30–40 %, що знижує ризик деламінації. Досліджуючи вібраційне різання, автори праці [3] встановили, що вібраційний вплив змінює механізм руйнування волокон: замість зрізування відбувається мікроударне розділення, яке знижує термічне навантаження на інструмент. Для металевих композитів

SiCp/Al (зміцнені керамічними частинками алюмоматричні композити) вібраційне різання також має суттєві переваги. Згідно зі студіями [4, 5], ультразвукове коливання знижує контактну температуру та інтенсивність зношування інструмента на 20–40 %. Автори роботи [6] виявили, що оптимізація параметрів SCCO₂-MQL, поєднуючись з ультразвуковими коливаннями, дає мінімальну шорсткість $R_a \approx 0.35 \text{ }\mu\text{m}$ за умови зменшення сили різання на 25 %.

Мета й постановка завдання

Метою дослідження є підвищення ефективності процесу різання волокнистих полімерних композиційних матеріалів способом застосування вібраційного (ультразвукового) подання інструмента, що забезпечує зменшення сил різання, поліпшення якості обробленої поверхні й зниження зношування інструмента.

Для досягнення поставленої мети необхідно провести експериментальні дослідження різання волокнистих полімерних композитних матеріалів у вібраційному режимі та визначити закономірності зміни сил різання й шорсткості поверхні.

Виклад основного матеріалу

Для того, щоб забезпечити ефективність процесу вібраційного різання, важливо правильно й обґрунтовано обрати всі складники й параметри процесу. Необхідно зауважити, що досягти ефективності вібраційного різання складніше, ніж високошвидкісного через значну кількість зовнішніх чинників, які впливають на цей процес.

Дуже суворі вимоги висуваються до конструкції елементів коливальної системи, співвідношення параметрів процесу. Сформулюємо основні вимоги до складників процесу вібраційного оброблення.

Вектор спрямування коливань. Вектор спрямування коливань різального інструмента можна уявити трьома варіантами (рис. 1) або їх комбінацією.

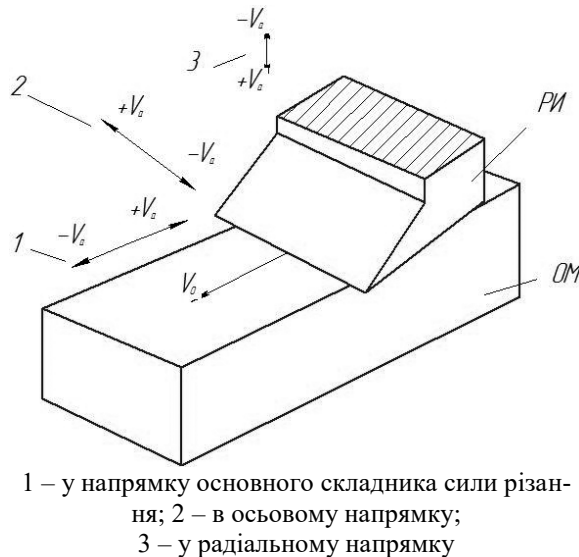


Рис. 1. Схеми напрямків коливання різального інструмента

До основних параметрів, що визначають ефективність вібраційного різання, належать: f – частота коливань різального інструмента; a – амплітуда коливань різального інструмента; V_a – змінна швидкість основного коливального інструмента; V_o – складова швидкість основного руху різання, яке визначається прямолінійним поступальним або обертним рухом заготовки або різального інструмента; V – миттєва швидкість основного руху різання; V_k – критична швидкість – швидкість V_o , за якої та вище якої різальний інструмент перебуває в безперервному контакті із заготовкою, нижче якої відбувається переривчасте різання; τ_c – час (тривалість) різання в одному циклі коливань різального інструмента; l_m – довжина шляху різання в напрямку V_o в одному циклі коливань різального інструмента.

У виборі параметрів вібраційного різання необхідно насамперед забезпечити реалізацію факторів оброблення волокнистих полімерних композитів. Усі наведені вище параметри взаємопов'язані між собою, і їх вибір здебільшого має здійснюватися з огляду на взаємний вплив (рис. 2).

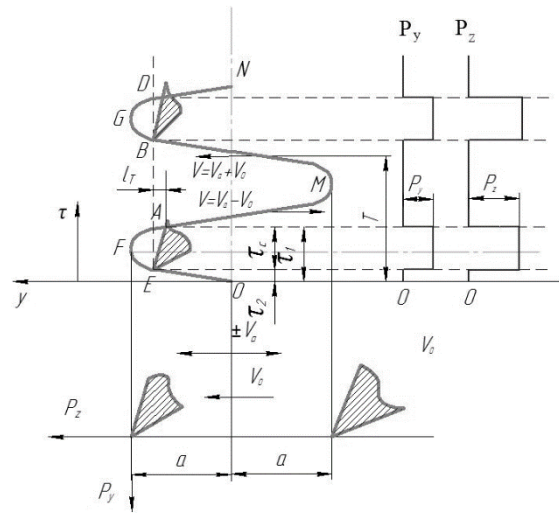


Рис. 2. Графічна інтерпретація механізму вібраційного різання

Рис. 2 містить такі позначки:

V – миттєва швидкість основного руху різання, м / с;

V_o – значення швидкості основного руху різання, яке визначається прямолінійним поступальним або обертним рухом заготовки або різального інструмента, м/с;

V_a – змінна швидкість коливального руху інструмента, м/с;

P_x – тангенціальний складник сили різання, Н;

P_y – радіальний складник сили різання, Н;

a – амплітуда коливань різального інструмента, мкм;

f – частота коливань різального інструмента, с⁻¹;

$T=1/f$ – період коливань різального інструмента, с;

y – переміщення різального інструмента, мм;

τ_1 – час, за який різальний інструмент проходить від початкової точки 0 до відділення його від поверхні різання, тобто моменту, коли швидкість коливань зрівняється зі швидкістю різання (коливання різального інструмента починається від точки 0 і напрямки різання збігається з напрямком коливань), с;

τ_2 – час, який починається з того моменту, коли різець перебував у початковій точці 0, до моменту, коли він вступає в контакт з оброблюваною деталлю (напрямок коливань збігається з напрямком різання), с;

τ_c – час (тривалість) різання в одному циклі коливань різального інструмента, с;

l_t – довжина шляху різання в напрямку основного руху в одному циклі коливань різального інструмента, мм;

V_k – критична швидкість – швидкість різання, за якої та вище якої різальний інструмент перебуває в безперервному контакті з заготовкою, нижче якої відбувається переривчасте різання, м/с.

Для успішної реалізації коливань в ультразвуковому діапазоні використовуються магнітострикційні або електрострикційні приводи. Спрощена схема таких віброприводів зображена на рис. 3.

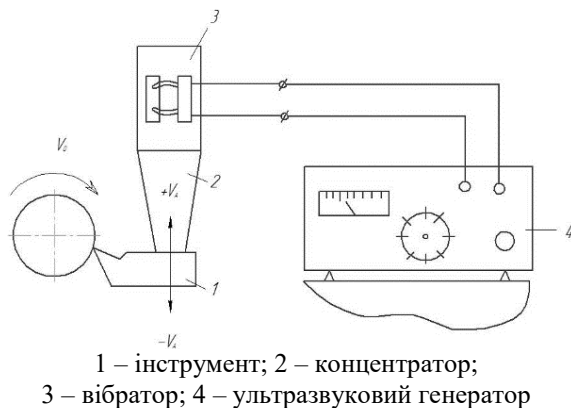


Рис. 3. Вібраційний привод з магнітострикційним або електрострикційним вібраторами

Іноді під час оброблення волокнистих полімерних композитів, особливо на тканинній основі, не вдається досягти необхідної ефективності процесу вібраційного різання. Зміна технологічного навантаження на ультразвукову систему з боку неоднорідної структури композиту часто призводить до відхилення частоти й фази резонансних коливань, що, ймовірно, спричинить зрив амплітуди коливань.

Уникнути цього можна, якщо перейти до автоколивальної схеми збудження способом впровадження контуру позитивного зворотного зв'язку, який формує авторезонанс способом нелінійного перетворення сигналу, пропорційного руху інструмента. На рис. 4 подано схему авторезонансного пристрою для ультразвукового різання.

Нижче запропоновано параметри процесу вібраційного різання, отримані за результатами

теоретичних і експериментальних досліджень для точіння волокнистих полімерних композитів. У табл. 1–6 подано: рекомендовані режими різання, параметри вібрацій, геометричні параметри різальної частини інструментів і інструментальний матеріал. Наведені таблиці не претендують на повноту рекомендацій щодо застосування вібраційного різання для всіх видів оброблення й оброблюваних волокнистих полімерних композиційних матеріалів, а слугують здебільшого практичним підтвердженням вищевикладених принципів застосування ультразвукового різання.



Рис. 4. Авторезонансний пристрій для ультразвукового різання

Надано практичні рекомендації для використання на виробництві під час виготовлення виробів із волокнистих полімерних композиційних матеріалів. Запропоновані рекомендації поширюються на роботу прохідними, підрізними, відрізними й розточними різцями.

Швидкість різання для точіння можна визначити за формулою

$$V = \frac{C_v}{60 \cdot T^m \cdot t^{X_v} \cdot S^{E/Y_v}} \cdot K_{TV} \cdot K_{NV} \cdot K_{OV}, \text{ м/с} \quad (1)$$

Таблиця 1 – Геометричні параметри різальної частини різців

Оброблюваний матеріал	Інструментальний матеріал	γ	α	ϕ	ϕ_1
		град			
Склопластик	ВКЗ, ВКЗМ, ВК8, ВК8М	0–21	15–20	45	20
Вуглепластик	ВК8, ВК8М	0–5	20	45	20
Органопластик	ВК6М, ВК60М, ВК8М	8–10	25	45	45
Склоорганопластик	ВК6М, ВК8М, ВК8	5–7	20–22	45	45
Вуглеорганопластик	ВК8, ВК6М, ВК8М	0–5	22–25	45	45

Таблиця 2 – Значення подання залежно від необхідного нахилу оброблюваної поверхні

Оброблюваний матеріал	Інструментальний матеріал	Шорсткість R_z мкм	Подання S , мм/об
Склопластик	BK3, BK8	5	до 0,1
		5–15	0,1–0,2
		15–20	0,2–0,3
		20–25	0,3–0,4
Вуглепластик	BK8, BK8M	5	до 0,1
		5–15	0,1–0,2
		15–20	0,2–0,3
		20–25	0,3–0,4
Органопластик	BK6M, BK60M	10	до 0,05
		10–15	0,05–0,1
		15–20	0,1–0,15
		20–30	0,15–0,2
Склоорганопластик	BK6M, BK8	5	0,05–0,1
		5–15	0,1–0,15
		15–20	0,15–0,2
		20–25	0,2–0,25
Вуглеорганопластик	BK6M, BK8	5	0,05–0,1
		5–15	0,1–0,15
		15–20	0,15–0,2

Таблиця 3 – Поправкові коефіцієнти залежно від оброблюваного матеріалу

Оброблюваний матеріал	C_v	m	X_v	Y_v
Склопластик	357	0,49	0,08	0,37
Вуглепластик	282	0,34	0,06	0,24
Органопластик	174	0,31	0,05	0,18
Склоорганопластик	208	0,42	0,07	0,3
Вуглеорганопластик	196	0,36	0,06	0,28

Таблиця 4 – Поправкові коефіцієнти залежно від виду оброблення

Коефіцієнт	Оброблення різанням				
	Прохідним		Підрізним	Відрізним	Розточним
	$\gamma = 45^\circ$	$\gamma = 45^\circ$			
K_{OV}	1.0	0.9	0.8	0.7	0.9

Таблиця 5 – Поправкові коефіцієнти на швидкість різання залежно від періоду стійкості, K_{TV}

Оброблюваний матеріал	Період стійкості T			
	Поправковий коефіцієнт, K_{TV}			
	15	30	60	90
Склопластик	$\frac{15}{1,97}$	$\frac{30}{1,4}$	$\frac{60}{1,0}$	$\frac{90}{0,82}$
Вуглепластик	$\frac{15}{1,69}$	$\frac{30}{1,3}$	$\frac{60}{1,0}$	$\frac{90}{0,86}$
Органопластик	$\frac{15}{1,53}$	$\frac{20}{1,24}$	$\frac{60}{1,0}$	$\frac{90}{0,88}$
Склоорганопластик	$\frac{15}{1,84}$	$\frac{15}{1,38}$	$\frac{60}{1,0}$	$\frac{90}{0,84}$
Вуглеорганопластик	$\frac{15}{1,6}$	$\frac{30}{1,98}$	$\frac{60}{1,0}$	$\frac{90}{0,8}$

Таблиця 6 – Поправкові коефіцієнти на швидкість різання залежно від марки інструментального матеріалу

Оброблюваний матеріал	Інструментальний матеріал				
	ВК3	ВК3М	ВК6М	ВК60М	ВК8
Склопластик	1,68	1,76	1,3	1,52	1,0
Вуглепластик	1,3	1,38	1,25	1,4	1,0
Орґанопластик	1,31	1,42	1,74	1,8	1,0
Склоорґанопластик	1,42	1,48	1,55	1,62	1,0
Вуглеорґанопластик	1,36	1,56	1,68	1,74	1,0

Значення коефіцієнтів наведені для подання в діапазоні 0,1–0,4 мм/об різання завглибшки 0,5–5 мм.

Значення коефіцієнтів K_{TV} наведені для інструментального матеріалу ВК8, інші враховуються коефіцієнтом K_{NV} (див. вище).

Висновки

У роботі запропоновано загальні рекомендації щодо вибору режимів різання, геометричних параметрів різальної частини й матеріалу інструментів.

Рекомендації, наведені в статті, охоплюють оброблення тільки волокнистих полімерних композиційних матеріалів на тканинній основі, що містять скляні, органічні та вуглецеві волокна як найбільш поширені серед полімерних композитів.

Література

- Chen, W., Huo, D., Shi, Y., & Hale, J. M. State-of-the-art review on vibration-assisted milling: principle, system design, and application. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 97(7–8), 2033–2049. DOI: [10.1007/s00170-018-2073-z] <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2073-z>
- Zhang, Y., Ren, J., & Zhou, J. Effect of duty cycle on cutting force for ultrasonic vibration-assisted milling carbon fiber-reinforced polymer laminates. *Materials*, 2023, 16(23), 7457. DOI: [10.3390/ma16237457] <https://doi.org/10.3390/ma16237457>
- Xu, W., Ding, Y., & Liu, Q. Effect of tool vibration on chip formation and cutting forces in vibration-assisted cutting of fiber-reinforced composites. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 87(9–12), 3337–3348. DOI: [10.1007/s00170-016-8675-4] <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8675-4>
- Yuan, Z., Zhang, Q., & Wang, S. A comprehensive review of ultrasonic vibration machining on SiCp/Al composites. *Micromachines*, 2023, 14 (3), 656. DOI: [10.3390/mi14030656] <https://doi.org/10.3390/mi14030656>
- Li, J., Chen, W., & Zhu, Y. Effect of vibration direction on two-dimensional ultrasonic assisted grinding-electrolysis-discharge generating machining mechanism of SiCp/Al composites. *Materials*, 2023, 16 (7), 2703. DOI: [10.3390/ma16072703] <https://doi.org/10.3390/ma16072703>

ding-electrolysis-discharge generating machining mechanism of SiCp/Al composites. *Materials*, 2023, 16 (7), 2703. DOI: [10.3390/ma16072703] <https://doi.org/10.3390/ma16072703>

- Zhang, H., Wang, B., Qu, L., & Wang, X. Optimization of tool wear and cutting parameters in SCC-MQL ultrasonic vibration milling of SiCp/Al composites. *Machines*, 2024, 12(9), 646. DOI: [10.3390/machines12090646] <https://doi.org/10.3390/machines12090646>

References

- Chen, W., Huo, D., Shi, Y., & Hale, J. M. State-of-the-art review on vibration-assisted milling: principle, system design, and application. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 97(7–8), 2033–2049. DOI: [10.1007/s00170-018-2073-z] <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2073-z>
- Zhang, Y., Ren, J., & Zhou, J. Effect of duty cycle on cutting force for ultrasonic vibration-assisted milling carbon fiber-reinforced polymer laminates. *Materials*, 2023, 16(23), 7457. DOI: [10.3390/ma16237457] <https://doi.org/10.3390/ma16237457>
- Xu, W., Ding, Y., & Liu, Q. Effect of tool vibration on chip formation and cutting forces in vibration-assisted cutting of fiber-reinforced composites. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 87(9–12), 3337–3348. DOI: [10.1007/s00170-016-8675-4] <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8675-4>
- Yuan, Z., Zhang, Q., & Wang, S. A comprehensive review of ultrasonic vibration machining on SiCp/Al composites. *Micromachines*, 2023, 14 (3), 656. DOI: [10.3390/mi14030656] <https://doi.org/10.3390/mi14030656>
- Li, J., Chen, W., & Zhu, Y. Effect of vibration direction on two-dimensional ultrasonic assisted grinding-electrolysis-discharge generating machining mechanism of SiCp/Al composites. *Materials*, 2023, 16 (7), 2703. DOI: [10.3390/ma16072703] <https://doi.org/10.3390/ma16072703>
- Zhang, H., Wang, B., Qu, L., & Wang, X. Optimization of tool wear and cutting parameters in SCC-MQL ultrasonic vibration milling of SiCp/Al composites. *Machines*, 2024, 12(9), 646. DOI: [10.3390/machines12090646] <https://doi.org/10.3390/machines12090646>

Сичов Юрій Іванович¹, канд. техн. наук, доцент кафедри технології металів та матеріалознавства ім. О. М. Петриченка, тел. +380502410937, shanhaj.2007@gmail.com,

Вародов Кирило Сергійович², аспірант кафедри машинобудування, транспорту і зварювання тел. +380999320893, kyrylo.varodov@karazin.ua.

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

²Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія» Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, майдан Свободи 4, м. Харків, Україна, 61022.

Improvement of the mechanical processing of fibrous polymer composites using vibration cutting

Abstract. Problem. Fibrous polymer composite materials (FPCM) have found wide application in modern mechanical engineering, aviation, shipbuilding, and energy due to their high specific strength, stiffness, and corrosion resistance. However, the processing of such materials is accompanied by a number of technological difficulties due to their anisotropic structure, low thermal conductivity, different stiffness of the matrix and reinforcing fibers. This leads to intensive tool wear, an increase in temperature in the cutting zone, and a deterioration in the quality of the processed surface. In order to ensure the efficiency of the vibration cutting process, it is necessary to correctly and reasonably select all constituent elements and process parameters. **Purpose.** The purpose of the study is to increase the efficiency of the cutting process of fibrous polymer composite materials by using a vibration (ultrasonic) tool feed, which provides a reduction in cutting forces, improvement in

the quality of the processed surface, and reduction in tool wear. **Methodology.** It is necessary to conduct experimental studies of cutting fibrous polymer composite materials in the vibration mode and determine the patterns of changes in cutting forces and surface roughness. **Results.** General recommendations are given for the selection of cutting modes, geometric parameters of the cutting part, and tool material. **Originality.** The recommendations given in the article cover the processing only of fibrous polymer composite materials on a fabric basis, including glass, organic, and carbon fibers, as the most common at the moment among polymer composites. **Practical value.** This article presents studies that fill this gap and provide physical justification for the use of vibration cutting in processing fibrous polymer composites. Based on this, it develops practical recommendations for its application in the turning process.

Keywords: fiberglass, organoplastic, composite materials, vibration cutting, vibration amplitude, reinforcement direction.

Sychov Yriij¹, PhD, Associate Professor, Department of Metal Technology and Materials Science named after O. M. Petrychenko, ORCID: [0000-0002-6576-8083](https://orcid.org/0000-0002-6576-8083), shanhaj.2007@gmail.com,

Varodov Kyrylo², Graduate student, Department of Mechanical Engineering, Transport and Welding, ORCID: [0009-0007-8621-6337](https://orcid.org/0009-0007-8621-6337), kyrylo.varodov@karazin.ua.

¹Kharkiv National Automobile and Highway University, 25 Yaroslav Mudryi Street, Kharkiv, 61002, Ukraine.

²V. N. Karazin Kharkiv National University Educational and Scientific Institute Ukrainian Engineering Pedagogics Academy Address University: Svobody sq., 4, Kharkiv, 61022, Ukraine.