

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

СЮЕ СЯНЬДІН

УДК 621.9

**ДИСЕРТАЦІЯ
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ
ГІДРОАБРАЗИВНОГО ОБЛАДНАННЯ
НА ОСНОВІ НОВИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ**

Спеціальність 131 – Прикладна механіка
Галузь знань 13 – Механічна інженерія за спеціальністю

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

СЮЕ СЯНЬДІН

Науковий керівник Саленко Олександр Федорович, професор, доктор технічних наук, професор кафедри конструювання машин

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Сюе Сяньдін. Підвищення ефективності використання гідроабразивного обладнання на основі нових технічних рішень. – Кваліфікаційна праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 13 Механічна інженерія 131 Прикладна механіка. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2026.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної задачі – підвищення ефективності використання гідроабразивного обладнання при обробці вуглепластиків (CFRP) шляхом оптимізації технологічних параметрів та розробки нової опорної конструкції для пригнічення відбитих пошкоджень. Вуглепластики завдяки своїй високій питомій міцності, низькій щільності та корозійній стійкості широко застосовуються в аерокосмічній, автомобільній та суднобудівній промисловості. Гідроабразивне різання (AWJ) є одним із найбільш перспективних методів обробки цих матеріалів завдяки відсутності термічного впливу та високій адаптивності до складних геометричних форм. Однак наявність типових дефектів, таких як розшарування, висмикування волокон, ерозія матриці та впровадження абразиву, а також проблема відбитих пошкоджень від проникного струменя суттєво обмежують застосування AWJ для виготовлення відповідальних деталей.

У роботі виконано ґрунтовний аналіз сучасного стану досліджень у галузі гідроабразивного різання композиційних матеріалів. Розглянуто механізми видалення матеріалу, енергетичні аспекти процесу, закономірності формування поверхні різку, а також стратегії оптимізації технологічних параметрів. Показано, що існуючі дослідження зосереджені переважно на макромасштабному моделюванні та параметричних експериментах, тоді як питання кількісного опису критичного стану «якраз наскрізь» та механізми вторинних пошкоджень від відбитого стру-

меня залишаються недостатньо вивченими. На основі виконаного аналізу сформульовано основну гіпотезу дослідження: ефективність використання гідроабразивного обладнання при обробці CFRP можна суттєво підвищити шляхом точного регулювання енергетичного балансу в зоні різання та розробки конструктивних заходів для усунення впливу відбитого струменя.

Розкрито механізми енергетичної дисипації при гідроабразивному різанні CFRP. На основі закону збереження енергії введено поняття коефіцієнта дисипації енергії, який характеризує частку енергії, витраченої на руйнування матеріалу на різній глибині різання. Встановлено, що швидкість подачі є ключовим фактором, що визначає ефективність використання енергії: зменшення швидкості подачі призводить до збільшення питомої енергії, що вноситься в матеріал, і, відповідно, до зростання глибини різання та покращення якості поверхні. Запропоновано модель оцінки критичної енергії, необхідної для наскрізного різання матеріалу, яка враховує товщину заготовки, об'ємну частку волокон, енергоємність руйнування волокон і матриці, а також енергію розкриття міжфазної поверхні.

Досліджено механізм поширення хвиль напружень при гідроабразивному різанні CFRP. На основі теорії пружних хвиль визначено швидкості поширення поздовжніх і поперечних хвиль у матеріалі з урахуванням його анізотропії. Розраховано коефіцієнти відбиття та проходження хвиль на міжшарових межах, що дозволило встановити умови виникнення розтягуючих напружень, які є першопричиною розшарування. Показано, що інтенсивність розшарування залежить від амплітуди падаючої хвилі, яка визначається тиском струменя, та міцності міжшарового зв'язку.

Встановлено закономірності поведінки відбитого струменя після проникнення через матеріал. На основі аналізу залишкової енергії проникного струменя та її розподілу при відбитті від опорної конструкції показано, що традиційні плоскі опори мають коефіцієнт ефективності відбиття 0,3–0,5, що призводить до значного вторинного ураження вже обробленої поверхні. Розроблено нову направляючу опорну конструкцію, що реалізує принцип «адсорбція-направлення-дисипація».

Конструкція складається з трьох функціональних зон: верхньої чашоподібної поверхні з кільцевими дренажними отворами, яка забезпечує пристінне течію рідини; середньої буферної камери для попереднього розсіювання енергії; нижнього ежекційного механізму Вентурі, який створює розрідження та відводить залишкову рідину в систему збору.

Проведено чисельне моделювання гідродинамічних характеристик запропонованої опорної конструкції з використанням програмного комплексу ANSYS Fluent. Моделювання базувалося на методі об'єму рідини (VOF) для відстеження руху вільних поверхонь та обліку взаємодії фаз. Встановлено, що запропонована конструкція забезпечує зниження пікової швидкості відбитого струменя на 35%, висоти підйому крапель на 40% та радіусу радіального поширення на 30% порівняно з традиційною опорною конструкцією. Виконано розрахунки на міцність основних елементів конструкції, які підтвердили її працездатність при багаторазовому запасі міцності.

Розроблено методику експериментальних досліджень, що включала виготовлення зразків з CFRP на основі волокна T300 та епоксидної матриці, проведення ортогонального експерименту за схемою $L_9(3^4)$ з варіюванням тиску струменя, швидкості подачі, відстані до зразка та витрати абразиву, а також вимірювання глибини різання, шорсткості поверхні та конусності різу. Експериментальні дослідження підтвердили, що швидкість подачі є найбільш впливовим фактором для всіх досліджуваних показників якості.

На основі експериментальних даних побудовано регресійні моделі для прогнозування глибини різання та шорсткості поверхні, які мають вигляд статечних функцій. Коефіцієнти детермінації моделей становлять 0,933 та 0,941 відповідно, що свідчить про високу точність прогнозування. За допомогою багатокритеріальної оптимізації визначено оптимальні технологічні параметри, що забезпечують умову «якраз наскрізь» для заготовки товщиною 3 мм: тиск струменя 285 МПа, швидкість подачі 105 мм/хв, відстань до зразка 3,2 мм, витрата абразиву 95 г/хв.

При цих параметрах прогнозована шорсткість поверхні становить 3,76 мкм, а конусність різку – 0,28°.

Проведено експериментальну верифікацію запропонованої направляючої опорної конструкції. Результати порівняльних випробувань показали, що при використанні традиційної опори на тильній поверхні зразка спостерігаються значні відбиті пошкодження у вигляді глибокої вирви, тоді як із застосуванням розробленої конструкції візуально відсутні будь-які сліди вторинного ураження. Це підтверджує ефективність запропонованого технічного рішення та його придатність для практичного застосування.

Виконано частотний аналіз морфології поверхні різку з використанням перетворення Фур'є. Встановлено, що низькочастотна складова (0–10 мм⁻¹) відповідає вібраціям різальної системи, середньочастотна (10–40 мм⁻¹) – осциляціям струменя, пов'язаним з відбитим потоком, а високочастотна (понад 50 мм⁻¹) – мікрорізанню абразивними частинками. Для оптимальних технологічних параметрів спрогнозовано зниження домінантної частоти профілю різку, що відповідає підвищенню якості обробленої поверхні.

Розроблено комплексну методику оцінки якості різання CFRP, яка охоплює геометричну точність (ширина різку, конусність, прямолінійність), якість поверхні (шорсткість Ra, Rz, Rq) та ступінь пошкодження (коефіцієнт розшарування, довжина висмикування волокон, глибина ерозії матриці, щільність впровадження абразиву). На основі методу аналізу ієрархій побудовано модель комплексного оцінювання, що дозволяє отримувати узагальнений показник якості для порівняння різних режимів обробки.

У роботі використано комплекс сучасних методів дослідження: теоретичні – аналітичне моделювання процесів енергетичної дисипації, поширення хвиль напружень та гідродинаміки двофазних потоків; чисельні – моделювання з використанням ANSYS Fluent для дослідження характеристик направляючої опорної конструкції; експериментальні – ортогональне планування експерименту, механічні випробування, профілометрія поверхонь, спектральний аналіз.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у встановленні кількісних закономірностей енергетичної дисипації при гідроабразивному різанні CFRP, розробці моделі критичної енергії для умови «якраз наскрізь», виявленні механізму відбитих пошкоджень та обґрунтуванні принципів їх пригнічення за допомогою направляючої опорної конструкції, а також у створенні комплексної методики оцінки якості обробки.

Практичне значення одержаних результатів полягає в розробці інженерної методики вибору оптимальних технологічних параметрів гідроабразивного різання CFRP, створенні конструкції направляючої опори для пригнічення відбитих пошкоджень, а також у формуванні системи показників для оцінки якості обробки композиційних матеріалів. Результати роботи можуть бути впроваджені на підприємствах аерокосмічної та автомобільної промисловості, що використовують гідроабразивне різання для обробки деталей з вуглепластиків.

Ключові слова: вуглепластик, CFRP, гідроабразивне різання, AWJ, енергетична дисипація, відбиті пошкодження, направляюча опорна конструкція, оптимізація технологічних параметрів.

ABSTRACT

Xue Xiangding. Improving the efficiency of abrasive waterjet equipment based on new technical solutions. – Qualifying scientific manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the field of knowledge 13 Mechanical Engineering, specialty 131 Applied Mechanics. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2026.

The dissertation is devoted to solving a relevant scientific-applied problem – improving the efficiency of abrasive waterjet equipment in the processing of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) by optimizing technological parameters and developing a new support structure for suppressing reflected damage. Due to their high specific strength, low density, and corrosion resistance, CFRPs are widely used in aerospace, automotive, and shipbuilding industries. Abrasive waterjet (AWJ) cutting is one of the most promising methods for processing these materials due to the absence of thermal effects and high adaptability to complex geometric shapes. However, the presence of typical defects such as delamination, fiber pull-out, matrix erosion, and abrasive embedment, as well as the problem of reflected damage from the penetrating jet, significantly limit the application of AWJ for manufacturing critical components.

A thorough analysis of the current state of research in the field of abrasive waterjet cutting of composite materials is performed. The mechanisms of material removal, energy aspects of the process, regularities of cut surface formation, as well as strategies for optimizing technological parameters are considered. It is shown that existing research is focused mainly on macroscale modeling and parametric experiments, while the issues of quantitative description of the "just-through" critical state and the mechanisms of secondary damage from the reflected jet remain insufficiently studied. Based on the analysis, the main hypothesis of the research is formulated: the efficiency of using abrasive waterjet equipment in CFRP processing can be significantly increased by precise regulation of the energy balance in the cutting zone and the development of structural measures to eliminate the influence of the reflected jet.

The mechanisms of energy dissipation in abrasive waterjet cutting of CFRP are revealed. Based on the law of energy conservation, the concept of the energy dissipation coefficient is introduced, which characterizes the fraction of energy expended on material destruction at different cutting depths. It is established that the feed rate is a key factor determining energy efficiency: reducing the feed rate leads to an increase in the specific energy introduced into the material and, consequently, to an increase in cutting depth and improvement in surface quality. A model for estimating the critical energy required for through-cutting of the material is proposed, which takes into account the thickness of the workpiece, the volume fraction of fibers, the energy intensity of fiber and matrix destruction, as well as the energy of interfacial surface opening.

The mechanism of stress wave propagation in abrasive waterjet cutting of CFRP is investigated. Based on the theory of elastic waves, the propagation velocities of longitudinal and transverse waves in the material are determined, taking into account its anisotropy. The coefficients of reflection and transmission of waves at interlaminar boundaries are calculated, which allows establishing the conditions for the occurrence of tensile stresses that are the root cause of delamination. It is shown that the intensity of delamination depends on the amplitude of the incident wave, which is determined by the jet pressure, and the strength of the interlaminar bond.

The regularities of the behavior of the reflected jet after penetrating through the material are established. Based on the analysis of the residual energy of the penetrating jet and its distribution upon reflection from the support structure, it is shown that traditional flat supports have a reflection efficiency coefficient of 0.3–0.5, which leads to significant secondary damage to the already machined surface. A new guiding support structure is developed that implements the "adsorption-guiding-dissipation" principle. The structure consists of three functional zones: an upper cup-shaped surface with annular drainage holes, which ensures wall-adjacent fluid flow; a middle buffer chamber for preliminary energy dissipation; a lower Venturi ejection mechanism that creates a vacuum and removes residual fluid into a collection system.

Numerical simulation of the hydrodynamic characteristics of the proposed support structure is performed using the ANSYS Fluent software package. The simulation is based on the Volume of Fluid (VOF) method for tracking free surface motion and accounting for phase interaction. It is established that the proposed structure provides a reduction in the peak velocity of the reflected jet by 35%, droplet rise height by 40%, and radial spread radius by 30% compared to the traditional support structure. Strength calculations of the main structural elements are performed, which confirm its operability with a multiple safety margin.

An experimental research methodology is developed, which includes the manufacturing of CFRP specimens based on T300 fiber and epoxy matrix, conducting an orthogonal experiment according to the $L_9(3^4)$ scheme with variation of jet pressure, feed rate, standoff distance, and abrasive flow rate, as well as measuring cutting depth, surface roughness, and cut taper. Experimental studies confirm that the feed rate is the most influential factor for all investigated quality indicators.

Based on experimental data, regression models for predicting cutting depth and surface roughness are constructed in the form of power functions. The coefficients of determination of the models are 0.933 and 0.941, respectively, indicating high prediction accuracy. Using multi-criteria optimization, the optimal technological parameters ensuring the "just-through" condition for a 3 mm thick workpiece are determined: jet pressure 285 MPa, feed rate 105 mm/min, standoff distance 3.2 mm, abrasive flow rate 95 g/min. Under these parameters, the predicted surface roughness is 3.76 μm , and the cut taper is 0.28°.

Experimental verification of the proposed guiding support structure is performed. The results of comparative tests show that when using a traditional support, significant reflected damage in the form of a deep crater is observed on the back surface of the specimen, whereas when using the developed structure, there are no visible traces of secondary damage. This confirms the effectiveness of the proposed technical solution and its suitability for practical application.

A frequency analysis of the cut surface morphology is performed using the Fourier transform. It is established that the low-frequency component ($0\text{--}10\text{ mm}^{-1}$) corresponds to vibrations of the cutting system, the mid-frequency component ($10\text{--}40\text{ mm}^{-1}$) corresponds to jet oscillations associated with the reflected flow, and the high-frequency component (above 50 mm^{-1}) corresponds to micro-cutting by abrasive particles. For optimal technological parameters, a reduction in the dominant frequency of the cut profile is predicted, which corresponds to an increase in the quality of the machined surface.

A comprehensive methodology for assessing the quality of CFRP cutting is developed, which covers geometric accuracy (cut width, taper, straightness), surface quality (roughness R_a , R_z , R_q), and degree of damage (delamination coefficient, fiber pull-out length, matrix erosion depth, abrasive embedment density). Based on the analytic hierarchy process, a comprehensive assessment model is constructed that allows obtaining a generalized quality indicator for comparing different processing modes.

The work employs a set of modern research methods: theoretical – analytical modeling of energy dissipation processes, stress wave propagation, and two-phase flow hydrodynamics; numerical – simulation using ANSYS Fluent to study the characteristics of the guiding support structure; experimental – orthogonal experiment design, mechanical testing, surface profilometry, spectral analysis.

The scientific novelty of the obtained results lies in establishing quantitative regularities of energy dissipation in abrasive waterjet cutting of CFRP, developing a model of critical energy for the "just-through" condition, identifying the mechanism of reflected damage and substantiating the principles of its suppression using a guiding support structure, as well as in creating a comprehensive methodology for assessing processing quality.

The practical significance of the obtained results lies in the development of an engineering methodology for selecting optimal technological parameters for abrasive waterjet cutting of CFRP, creating a guiding support structure for suppressing reflected

damage, and forming a system of indicators for assessing the processing quality of composite materials. The results of the work can be implemented at enterprises in the aerospace and automotive industries that use abrasive waterjet cutting for processing CFRP components.

Keywords: carbon fiber reinforced plastic, CFRP, abrasive waterjet cutting, AWJ, energy dissipation, reflected damage, guiding support structure, optimization of technological parameters.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Статті у періодичних наукових виданнях, проіндексовані у базі даних Scopus:

1. **Xue Xianding**, Xu S., Wu S. Design of a smart wearable power supply scheme for abrasive water jet equipment in troubleshooting condition. *Lecture notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*. 2025. P. 275–285. DOI:[10.1007/978-3-032-00221-1_27](https://doi.org/10.1007/978-3-032-00221-1_27). (Стаття, іноземне видання індексується Scopus, WoS, Q4). Здобувач розробив концепцію носимого джерела живлення для гідроабразивного обладнання, обґрунтував вибір елементної бази та виконав імітаційне моделювання роботи пристрою в аварійних режимах; Xu S. забезпечив програмну реалізацію алгоритмів керування; Wu S. провів експериментальну верифікацію розробленого прототипу.

Статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України:

2. **Сюе Сяньдін**, Саленко О., Габрузян Г., Гаврушкевич А. A Review of Abrasive Water Jet Cutting Technology for Composite Materials. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2025. Т. 9, № 3(106). С. 372–385. DOI:10.20535/2521-1943.2025.9.3(106).315941. (Стаття, вітчизняне видання, категорія «Б»). Здобувач виконав аналітичний огляд літератури, систематизував сучасні підходи до гідроабразивного різання композитів та узагальнив основні закономірності процесу; Саленко О. визначив напрямки дослідження; Габрузян Г. та Гаврушкевич А. здійснили пошук та первинну обробку літературних джерел.
3. **Сюе Сяньдін**, Саленко О. Integrated Geometric Confinement and Ejection-Driven Drainage Flow for Splash Suppression in High-Speed Abrasive Waterjet Machining. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2025. Т. 9, № 4(107). С. 483–494. DOI:10.20535/2521-1943.2025.9.4(107).345010. (Стаття, вітчизняне видання, категорія «Б»). Здобувач розробив схему геометричного обмеження для пригнічення розбризкування, провів експериментальні дослідження та CFD-моделювання гідродинамічних процесів; Саленко О. виконав теоретичний аналіз механізму ежекційного дренажу.
4. Xue, X. (2026). Critical Traverse Velocity Threshold for Through-Cut of 3mm CFRP by Abrasive Waterjet: A Binary Logistic Model Based on Post-Cut

Images.Mechanics and Advanced Technologies,10(1),36-43. DOI.10.20535/2521-1943.2026.10.1.343235. (Стаття, вітчизняне видання, категорія «Б»). Здобувач самостійно спланував та провів експерименти, виконав статистичний аналіз методом бінарної логістичної регресії та встановив критичне значення швидкості подачі для наскрізного різання CFRP.

Публікації у матеріалах наукових конференцій:

5. **Сює Сяньдін**, Саленко О. Improving the quality of reverse surfaces obtained by waterjet processing. *XIII Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю*. м. Житмир, 2025. С.25. URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2025/12/25-1.pdf>. (тези доповідей). Здобувач виконав чисельне моделювання методом скінченних елементів для оптимізації якості зворотних поверхонь та здійснив обробку експериментальних даних; Саленко О. розробив методику проведення досліджень.
6. Саленко О., **Сює Сяньдін**, Коваленко С., Габузян, Г., Орел, В., Лашко, Є., & Ханн, С. До питання точності визначення механічних характеристик карбон-карбонових композитів за зразками, отриманими гідрорізанням. *Матеріали науково-технічної конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта»*. 2023. Т. XXIII. С. 161-164. (тези доповідей). Здобувач підготував зразки методом гідроабразивного різання, провів експерименти та виконав скінченно-елементне моделювання для оцінки механічних характеристик; Саленко О. визначив загальну концепцію дослідження; Коваленко С. та Габузян Г. виконали статистичну обробку даних; Орел В., Лашко Є. та Ханн С. провели аналіз та узагальнення результатів.
7. Колочко О. М., **Сяньдін С.**, Саленко О. Ф., Гаврушкевич, А. Ю., & Габузян, Г. В. Адаптивна система керування процесом струминно-абразивного різання різнотовщинних заготовок//*Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем -2024*. С.188–190. URL: <https://ir.stu.cn.ua/server/api/core/bitstreams/23347f5bccc5460ba4018f5c7ff980c/content>. (тези доповідей). Здобувач брав участь у розробці адаптивної системи керування, проведенні експериментів та обробці результатів; Колочко О. М. забезпечив технічну реалізацію; Саленко О. Ф. розробив теоретичну основу; Гаврушкевич А. Ю. та Габузян Г. В. виконали аналіз літературних джерел.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	16
ВСТУП.....	17
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ.....	24
1.1 Характеристики вуглепластиків та механізм гідроабразивного різання	24
1.2 Огляд методів дослідження та оптимізації процесу	26
1.3 Визначення напрямків дослідження	29
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	35
2.1 Механізм різання гідроабразивним струменем	35
2.1.1 Основи динаміки струменя.....	35
2.1.2 Силовий аналіз абразивних частинок.....	41
2.1.3 Енергетична дисипація в процесі наскрізного різання	45
2.1.4 Поширення хвиль напружень у зоні наскрізного різання	49
2.1.5 Поведінка відбитого струменя після прорізання CFRP	51
2.2 Пошкодження при гідроабразивному різанні.....	55
2.2.1 Закономірності еволюції внутрішніх пошкоджень	56
2.2.2 Механізм утворення та характеристика відбитого пошкодження.....	58
2.2.3 Типові типи пошкоджень при різанні та їх суперпозиція	62
2.3 Моделювання процесу різання матеріалу CFRP	66
2.3.1 Механізм ерозії одиничною та множинними частинками	66
2.3.2 Чисельне моделювання багатофазного потоку на основі Fluent.....	69
2.3.3 Зв'язок між дисипацією енергії та глибиною різання	72
2.3.4 Аналіз обмежень традиційних способів підтримки	73
2.3.5 Принцип проектування направляючої опори для захисту від відбитого струменя	75
2.4 Розрахунок	78
2.4.1 Експериментальний дизайн та оцінка якості.....	78
2.4.2 Точний розрахунок геометричних параметрів різу	79
2.4.3 Обладнання для спостереження.....	83
2.4.4 Реконструкція та інтерполяція контуру різу.....	86
2.4.5 Частотний аналіз характеристик морфології поверхні	88
2.4.6 щодо впливу витрати абразиву на розподіл енергії.	94
2.4.7 Пошук джерел похибок морфології та їх компенсація	94
РОЗДІЛ 3 РЕЗУЛЬТАТИ.....	98
3.1 Результати моделювання	98
3.2 Експериментальні результати	103

3.2.1 Побудова системи оцінки якості різання	103
3.2.2 Взаємодія параметрів та закономірності їх впливу	106
3.2.3 Експериментальна верифікація направляючої опорної конструкції	111
РОЗДІЛ 4 ОБГОВОРЕННЯ	113
4.1 Обговорення результатів моделювання	113
4.2 Обговорення експериментальних результатів	116
ВИСНОВКИ	118
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	120

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

AWJ - Abrasive Waterjet (гідроабразивне різання)

CFD – Computational Fluid Dynamics (обчислювальна гідродинаміка)

CFRP – Carbon Fiber Reinforced Polymer (вуглепластик)

DEM – Discrete Element Method (метод дискретних елементів)

DPM – Discrete Phase Model (дискретна фазова модель)

FEM – Finite Element Method (метод скінченних елементів)

FSI – Fluid-Structure Interaction (взаємодія рідини та структури)

PSD – Power Spectral Density (спектральна густина потужності)

RSM – Response Surface Methodology (методологія поверхні відгуку)

SEM – Scanning Electron Microscope (скануючий електронний мікроскоп)

SPH – Smooth Particle Hydrodynamics (метод гідродинаміки згладжених частинок)

SOD – Stand-off Distance (відстань від сопла до зразка)

VOF – Volume of Fluid (метод об'єму рідини)

F_d – коефіцієнт розшарування

h_m – глибина ерозії матриці

L_p – довжина висмикування волокон

P – тиск струменя

Ra – середнє арифметичне відхилення профілю шорсткості

Rq – середньоквадратичне відхилення профілю шорсткості

Rz – максимальна висота профілю шорсткості

v_f – швидкість подачі

W_{in} – ширина входу різу

W_{out} – ширина виходу різу

ρ_e – щільність впровадження абразиву

θ – кут конусності різу

ВСТУП

Карбонпластики (Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP) завдяки високій питомій міцності, низькій щільності та чудовій корозійній стійкості стали ключовим конструкційним матеріалом у аерокосмічній, автомобільній та суднобудівній промисловості [1]. В авіаційній галузі CFRP широко застосовується для виготовлення фюзеляжів, крил, лопаток вентиляторів двигунів та інших несучих конструкцій; в автомобілебудуванні використання CFRP дозволяє суттєво зменшити масу кузова, підвищуючи паливну ефективність та запас ходу; у вітроенергетиці великогабаритні лопаті турбін пред'являють високі вимоги до легкості та міцності матеріалів, що робить CFRP незамінним вибором [2]. Зі стрімким розвитком світової промисловості у напрямку легкості та високої ефективності сфера застосування CFRP постійно розширюється, а його стратегічне значення стає дедалі очевиднішим.

Широке застосування CFRP ставить серйозні виклики перед технологією його обробки. Як типовий анізотропний матеріал, CFRP складається з високоміцних вуглецевих волокон та в'язкої полімерної матриці. Його низька міжшарова міцність, низька теплопровідність та чутливість до теплового впливу призводять до того, що традиційні методи механічної обробки (фрезерування, свердління) стикаються з такими труднощами, як інтенсивне зношування інструменту, розшарування матеріалу та утворення задирок [3,4]. Ці дефекти не лише впливають на точність складання виробів, але й можуть стати джерелом втомного руйнування в процесі експлуатації, що серйозно загрожує безпеці конструкцій [5,6].

Гідроабразивне різання (Abrasive Waterjet, AWJ) відкрило нові можливості для високоякісної обробки CFRP. Як технологія холодного різання, AWJ використовує високошвидкісний струмінь, утворений змішуванням води високого тиску з абразивними частинками, для ерозійного видалення матеріалу. Цей метод має низку унікальних переваг: відсутність термічного впливу, мале зусилля різання, відсутність зношування інструменту та висока адаптивність до складних геометричних форм [7,8]. У порівнянні з традиційними методами обробки, AWJ дозво-

ляє уникнути найбільш проблемних термічних пошкоджень при обробці CFRP, тому вважається однією з найбільш перспективних технологій для обробки цього класу матеріалів [9,10].

Однак застосування AWJ для обробки CFRP не позбавлене проблем. У міру поглиблення досліджень вчені виявили, що, незважаючи на відсутність термічних дефектів, при гідроабразивному різанні CFRP виникає низка специфічних проблем, пов'язаних з якістю обробки [11,12]. По-перше, існує складна нелінійна залежність між технологічними параметрами (тиск струменя, швидкість подачі, відстань до зразка, витрата абразиву) та показниками якості обробки (глибина різання, шорсткість поверхні, конусність різу). Відсутність кількісних моделей, заснованих на енергетичних механізмах, ускладнює науково обґрунтований вибір оптимальних режимів різання [13,14]. По-друге, і, що особливо важливо, після проникнення струменя через товщу матеріалу його залишкова енергія, взаємодіючи з опорною конструкцією, утворює відбитий струмінь, який завдає вторинного удару по вже обробленій поверхні. Це явище призводить до серйозних пошкоджень: розшарування, висмикування волокон, ерозії матриці та впровадження абразиву, що суттєво знижує експлуатаційну надійність виготовлених деталей [1,16,17,18].

Аналіз сучасного стану досліджень свідчить, що, незважаючи на значний прогрес у вивченні впливу окремих технологічних параметрів на макроскопічні характеристики різання, існує низка важливих питань, які залишаються недостатньо дослідженими [19,20]. З одного боку, бракує глибокого розуміння енергетичної дисипації в процесі різання, що унеможливорює точне прогнозування умов наскрізного різання. З іншого боку, механізми формування та еволюції відбитого струменя, а також його вплив на якість обробленої поверхні залишаються поза увагою більшості дослідників [21,22]. Існуючі способи підтримки заготовки (плоскі опори, опорні ножі, сітчасті опори) не забезпечують ефективного пригнічення відбитого струменя, а в багатьох випадках навіть сприяють посиленню вторинних пошкоджень [23,24].

Таким чином, актуальним науково-прикладним завданням є підвищення ефективності використання гідроабразивного обладнання при обробці CFRP шляхом розкриття механізмів енергетичної дисипації та розробки ефективних способів пригнічення відбитих пошкоджень. Вирішення цього завдання має важливе значення для розширення технологічних можливостей AWJ та забезпечення високої якості виготовлення відповідальних деталей з композиційних матеріалів.

Дисертаційна робота складається з чотирьох розділів. У першому розділі проведено системний аналіз сучасного стану досліджень у галузі гідроабразивного різання CFRP, розглянуто фізико-механічні особливості матеріалу, основи процесу різання, методи моделювання та оптимізації, а також визначено напрямки подальших досліджень. У другому розділі розкрито механізми енергетичної дисипації при гідроабразивному різанні CFRP, розроблено модель критичної енергії для умови «якраз наскрізь», досліджено поширення хвиль напружень та поведінку відбитого струменя, запропоновано принципи проектування направляючої опорної конструкції. У третьому розділі наведено результати чисельного моделювання гідродинамічних характеристик запропонованої опорної конструкції, представлено експериментальні дослідження з оптимізації технологічних параметрів та верифікації ефективності розробленої конструкції. У четвертому розділі проведено обговорення отриманих результатів та їх узгодження з теоретичними положеннями.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційну роботу виконано відповідно до наукового напрямку кафедри конструювання машин Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» в рамках ініціативної тематики, спрямованої на підвищення ефективності гідроабразивного різання композиційних матеріалів. Дослідження, представлені в дисертації, є складовою частиною науково-дослідних робіт, що виконуються на кафедрі, та відповідають пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки України, зокрема у сфері нових матеріалів та технологій їх обробки.

Мета і задачі дослідження

Мета роботи – підвищення ефективності використання гідроабразивного обладнання при обробці вуглепластиків (CFRP) шляхом оптимізації технологічних параметрів та розробки нової опорної конструкції для пригнічення відбитих пошкоджень.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **задачі дослідження**:

1. Виконати системний аналіз сучасного стану досліджень у галузі гідроабразивного різання CFRP, виявити основні проблеми та визначити напрямки підвищення якості обробки.
2. Розробити математичну модель енергетичної дисипації при гідроабразивному різанні CFRP, яка встановлює кількісний зв'язок між технологічними параметрами та глибиною різання.
3. Дослідити механізм поширення хвиль напружень при гідроабразивному різанні CFRP та встановити закономірності поведінки відбитого струменя після проникнення через матеріал.
4. Провести експериментальні дослідження впливу технологічних параметрів (тиск струменя, швидкість подачі, відстань до зразка, витрата абразиву) на показники якості різання (глибина різання, шорсткість поверхні, конусність різу).
5. Побудувати регресійні моделі для прогнозування глибини різання та шорсткості поверхні, виконати багатокритеріальну оптимізацію для досягнення стану «якраз наскрізь».
6. Розробити нову направляючу опорну конструкцію для пригнічення відбитих пошкоджень, що реалізує принцип «адсорбція-направлення-дисипація».
7. Провести чисельне моделювання гідродинамічних характеристик запропонованої опорної конструкції та експериментально підтвердити її ефективність.

Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження є процес гідроабразивного різання вуглепластиків (CFRP).

Предмет дослідження

Предметом дослідження є енергетична дисипація в зоні різання, механізми утворення відбитих пошкоджень, вплив технологічних параметрів на показники якості обробки, а також конструктивні засоби пригнічення відбитого струменя.

Методи дослідження

У роботі використано комплекс сучасних методів дослідження:

- **теоретичні методи** – аналітичне моделювання процесів енергетичної дисипації на основі закону збереження енергії, теорія поширення хвиль напружень, гідродинаміка двофазних потоків;
- **чисельні методи** – моделювання гідродинамічних характеристик направляючої опорної конструкції з використанням програмного комплексу ANSYS Fluent (метод об'єму рідини VOF), розрахунки на міцність методом скінченних елементів;
- **експериментальні методи** – ортогональне планування експерименту за схемою $L_9(3^4)$, механічні випробування, оптична профілометрія поверхонь, спектральний аналіз морфології різку з використанням перетворення Фур'є.

Наукова новизна одержаних результатів

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в наступному:

1. Вперше запропоновано модель оцінки критичної енергії, необхідної для наскрізного різання CFRP, яка враховує товщину заготовки, об'ємну частку волокон, енергоємність руйнування волокон і матриці, а також енергію розкриття міжфазної поверхні.
2. Встановлено кількісні закономірності енергетичної дисипації при гідроабразивному різанні CFRP, що дозволило визначити умови досягнення стану «якраз наскрізь» з мінімальними пошкодженнями.
3. Розкрито механізм формування відбитих пошкоджень при гідроабразивному різанні CFRP, який полягає у взаємодії залишкової енергії проникного струменя з опорною конструкцією.
4. Розроблено нову направляючу опорну конструкцію, що реалізує принцип «адсорбція-направлення-дисипація», яка забезпечує зниження пікової шви-

дкості відбитого струменя на 35%, висоти підйому крапель на 40% та радіусу розльоту на 30%.

5. Вперше проведено частотний аналіз морфології поверхні різку CFRP з використанням перетворення Фур'є, що дозволило ідентифікувати частотні складові, які відповідають різним механізмам формування поверхні.

Практичне значення одержаних результатів

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

1. Розроблено інженерну методику вибору оптимальних технологічних параметрів гідроабразивного різання CFRP, що забезпечує умову «якраз наскрізь»: тиск струменя 285 МПа, швидкість подачі 105 мм/хв, відстань до зразка 3,2 мм, витрата абразиву 95 г/хв.
2. Створено конструкцію направляючої опорної системи для пригнічення відбитих пошкоджень, яка може бути інтегрована в існуюче гідроабразивне обладнання без його суттєвої модернізації.
3. Сформовано систему показників для комплексної оцінки якості обробки CFRP, що охоплює геометричну точність (ширина різку, конусність, прямолінійність), якість поверхні (шорсткість R_a , R_z , R_q) та ступінь пошкодження (коефіцієнт розшарування, довжина висмикування волокон, глибина ерозії матриці, щільність впровадження абразиву).
4. Результати роботи можуть бути впроваджені на підприємствах аерокосмічної та автомобільної промисловості, що використовують гідроабразивне різання для обробки деталей з вуглепластиків.

Особистий внесок здобувача

Дисертаційну роботу виконано під науковим керівництвом доктора технічних наук, професора Саленка Олександра Федоровича, в.о. завідувача кафедри конструювання машин. Основні результати, що становлять суть дисертаційної роботи, отримано здобувачем самостійно. У публікаціях, підготовлених у співавторстві, внесок здобувача полягає в наступному:

- у статті, проіндексованій у Scopus, – проведенні експериментальних досліджень та виконанні імітаційного моделювання методом скінченних елементів;
- у статтях у фахових виданнях України – проведенні експериментів, виконанні чисельного моделювання процесів різання та розрахунків із застосуванням програмного забезпечення для скінченно-елементного аналізу;
- у публікаціях за матеріалами конференцій – підготовці та проведенні експериментів, виконанні чисельного моделювання та обробці отриманих результатів.

Апробація результатів дисертації

Основні результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на наступних наукових конференціях:

- XIII Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю (м. Житомир, 2025);
- Науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» (м. Київ, 2023).

Публікації

За темою дисертації опубліковано 7 наукових праць, у тому числі:

- 1 стаття у періодичному науковому виданні, проіндексованому у базі даних Scopus;
- 3 статті у наукових фахових виданнях України;
- 3 публікації у матеріалах наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків та списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації становить 133 сторінки, у тому числі основного тексту 120 сторінок, 23 рисунків, 26 таблиць. Список використаних джерел містить 93 найменування.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ

ГІДРОАБРАЗИВНОГО РІЗАННЯ ВУГЛЕПЛАСТИКІВ

1.1 Характеристики вуглепластиків та механізм гідроабразивного різання

Вуглепластики (CFRP) являють собою композиційні матеріали, що складаються з вуглецевих волокон, полімерної матриці та міжфазної поверхні. Вуглецеві волокна забезпечують високу міцність та жорсткість, полімерна матриця (зазвичай епоксидна смола) виконує функцію зв'язування волокон та передачі навантаження, а міжфазна поверхня відіграє ключову роль у передачі напружень між волокнами та матрицею [25,26]. Завдяки такій структурі CFRP мають унікальний комплекс властивостей: високу питому міцність (відношення міцності до густини), низьку густину, високу втомну міцність та відмінну корозійну стійкість [27].

Однією з найважливіших особливостей CFRP є його анізотропія – властивості матеріалу суттєво залежать від напрямку. Уздовж волокон міцність та модуль пружності є максимальними, тоді як у поперечному напрямку ці показники значно нижчі. Крім того, CFRP має шарувату структуру, сформовану в процесі укладання шарів з різною орієнтацією волокон. Міжшарова міцність, яка визначається міцністю зв'язку між окремими шарами, є відносно низькою, що робить матеріал чутливим до розшарування при дії міжшарових напружень [28].

Широке застосування CFRP в аерокосмічній, автомобільній, суднобудівній промисловості та вітроенергетиці зумовлене саме цією комбінацією високої міцності та малої ваги. В авіабудуванні частка композиційних матеріалів у конструкції сучасних літаків сягає 50% і більше; в автомобілебудуванні використання CFRP дозволяє знизити масу кузова на 30-50%; у виробництві лопатей вітрових турбін CFRP забезпечує необхідну жорсткість при мінімальній масі [3,4].

Гідроабразивне різання є одним з найбільш ефективних методів обробки CFRP. Принцип дії AWJ полягає в наступному: вода під високим тиском (зазвичай 200-400 МПа) проходить через сапфірове сопло, формуючи надзвуковий

струмінь. У змішувальній камері до цього струменя подаються абразивні частинки (найчастіше гранат), які отримують прискорення від високошвидкісної води. Сформований гідроабразивний струмінь вилітає з фокусуючої трубки зі швидкістю, що може досягати 600-800 м/с [29,30].

Взаємодія гідроабразивного струменя з матеріалом CFRP має складний характер. Видалення матеріалу відбувається за рахунок трьох основних механізмів: мікрорізання при малих кутах удару абразивних частинок, крихкого руйнування при великих кутах удару, а також ерозійного впливу високошвидкісної води. Для CFRP, який є крихко-в'язким композитом, всі три механізми відіграють важливу роль, причому їх співвідношення залежить від технологічних параметрів різання та орієнтації волокон [7,8].

Важливою перевагою AWJ при обробці CFRP є відсутність термічного впливу. На відміну від лазерного або плазмового різання, де в зоні обробки виникають високі температури, що призводять до деградації полімерної матриці, AWJ є «холодним» процесом. Температура в зоні різання не перевищує 50-100°C, що виключає термічні пошкодження матеріалу. Крім того, зусилля різання є незначними, відсутнє зношування інструменту, а висока гнучкість процесу дозволяє обробляти деталі складної геометрії [9,10].

Незважаючи на ці переваги, процес гідроабразивного різання CFRP має низку особливостей, які ускладнюють досягнення високої якості обробки. Зокрема, анізотропія матеріалу призводить до того, що якість різання суттєво залежить від напрямку руху струменя відносно волокон. Різання впоперек волокон потребує більшої енергії та супроводжується більшою шорсткістю поверхні порівняно з різанням уздовж волокон [11]. Шарувата структура робить матеріал чутливим до розшарування, особливо при вході та виході струменя [12]. Полімерна матриця має нижчу твердість порівняно з волокнами, що призводить до її пріоритетної ерозії та оголення волокон [31]. Ці особливості обумовлюють необхідність глибокого розуміння механізмів взаємодії струменя з матеріалом та розробки науково обґрунтованих методів управління процесом різання.



Рисунок 1.1 – Схематична будова вуглепластику: волокна, матриця, міжфазна поверхня та шарувата структура



Рисунок 1.2 – Загальний вигляд реальної установки гідроабразивного різання в процесі обробки CFRP

1.2 Огляд методів дослідження та оптимізації процесу

Для глибокого розуміння процесу гідроабразивного різання CFRP та пошуку шляхів підвищення його ефективності дослідниками використовується широкий спектр методів, які можна розділити на три основні групи: методи чисельного моделювання, методи експериментального планування та методи оцінки якості обробки.

Чисельне моделювання процесу AWJ дозволяє дослідити структуру поля потоку, траєкторії руху абразивних частинок та їх взаємодію з матеріалом заготовки. Найбільш поширеними підходами є методи обчислювальної гідродинаміки

(CFD), які використовуються для аналізу двофазних потоків рідини-тверді частинки. У роботі [23] представлено моделювання гідроабразивного струменя з використанням моделі Ейлера-Ейлера, що дозволило встановити розподіл швидкостей та концентрації абразиву в різних перерізах струменя. Для моделювання взаємодії струменя з матеріалом застосовуються методи SPH (Smooth Particle Hydrodynamics) та FEM (Finite Element Method). У роботі [32] запропоновано комбінований SPH-DEM-FEM підхід, який дозволяє одночасно моделювати поведінку рідини, рух абразивних частинок та руйнування матеріалу. Важливим напрямком є моделювання взаємодії рідини та структури (FSI), яке дозволяє врахувати деформації матеріалу під дією струменя [33]. Однак існуючі моделі мають певні обмеження: вони часто не враховують дроблення абразивних частинок в процесі прискорення, не повністю описують анізотропні властивості CFRP, а також не дозволяють моделювати процес наскрізного різання з урахуванням відбитого струменя [5].

Таблиця 1.1 – Порівняння методів чисельного моделювання, що застосовуються для дослідження гідроабразивного різання

Метод	Застосування	Переваги	Обмеження
CFD (Euler-Euler)	Поле швидкостей, розподіл абразиву	Висока ефективність для суцільних середовищ	Не враховує дискретність частинок
CFD-DPM	Траєкторії окремих частинок	Враховує дискретність	Великі обчислювальні витрати
SPH	Взаємодія струменя з матеріалом	Природне моделювання руйнування	Низька точність для пружних деформацій
FEM	Напружено-деформований стан	Висока точність для суцільних середовищ	Складність моделювання руйнування
SPH-DEM-FEM	Комбінований підхід	Враховує всі аспекти	Найвищі обчислювальні витрати

Експериментальне планування є ключовим інструментом для вивчення впливу технологічних параметрів на показники якості різання. Найпростішим підходом є однофакторний експеримент, коли змінюється один параметр при фіксованих інших. Однак цей метод не дозволяє виявити взаємодію між параметрами та потребує великої кількості дослідів. Більш ефективним є використання методів багатофакторного планування, зокрема ортогональних планів. У роботі

[34] застосовано метод Тагуті для оптимізації параметрів AWJ при обробці CFRP, що дозволило визначити внесок кожного фактора у формування шорсткості поверхні. Методологія поверхні відгуку (RSM) дозволяє побудувати неперервні моделі залежності показників якості від технологічних параметрів. У дослідженні [35] на основі RSM отримано регресійні моделі для прогнозування глибини різання та шорсткості при обробці CFRP. Комбіноване застосування ортогонального планування та RSM дозволяє суттєво скоротити кількість експериментів при збереженні високої точності прогнозування [36,37]. Для багатокритеріальної оптимізації, коли необхідно одночасно покращити декілька показників якості, застосовуються методи сірих систем (Grey Relational Analysis) та нечіткої логіки [38,39]. У роботі [40] запропоновано гібридний підхід ANFIS-Salp Swarm Algorithm для багатокритеріальної оптимізації процесу AWJ, який поєднує можливості штучного інтелекту з еволюційними алгоритмами.

Таблиця 1.2 – Характеристика методів експериментального планування та оптимізації

Метод	Суть	Переваги	Недоліки
Однофакторний експеримент	Зміна одного параметра при фіксованих інших	Простота реалізації	Не враховує взаємодію параметрів, велика кількість дослідів
Ортогональне планування	Використання ортогональних матриць для скорочення кількості дослідів	Ефективне оцінювання впливу факторів	Не дає неперервної моделі
Методологія поверхні відгуку (RSM)	Побудова неперервних регресійних моделей	Висока точність прогнозування	Потребує попереднього визначення області факторів
Метод Тагуті	Використання ортогональних планів з аналізом співвідношення сигнал/шум	Враховує стійкість процесу	Обмежені можливості для складних моделей
Багатокритеріальна оптимізація (GRA, ANFIS, тощо)	Одночасна оптимізація декількох показників	Компромісне рішення	Складність вибору вагових коефіцієнтів

Оцінка якості обробки CFRP вимагає комплексного підходу, оскільки традиційні показники (шорсткість, конусність) не повністю відображають специфічні види пошкоджень, характерні для композиційних матеріалів. До основних показ-

ників геометричної точності відносяться ширина різку на вході та виході, конусність різку, прямолінійність крайки. Для їх визначення використовуються методи оптичної мікроскопії та профілометрії [15]. Якість поверхні оцінюється за параметрами шорсткості R_a , R_z , R_q , які визначаються за стандартом ISO 4287 [24]. Однак для CFRP вирішальне значення мають показники пошкодження: коефіцієнт розшарування, довжина висмикнутих волокон, глибина ерозії матриці, щільність впровадження абразиву [16,17]. У роботі [30] запропоновано використовувати метод нечіткої комплексної оцінки для інтегральної характеристики якості різання CFRP. У дослідженні [41] розроблено метод оцінки поверхневих пошкоджень на основі аналізу SEM-зображень.

Особливу увагу в останні роки приділяється дослідженню впливу відбитого струменя на якість обробленої поверхні. У роботах [42,43,44] показано, що відбитий струмінь може спричиняти суттєві пошкодження тильної поверхні заготовки, включаючи розшарування та впровадження абразиву. Однак системні дослідження механізмів формування відбитого струменя та його впливу на якість обробки поки що відсутні, а існуючі способи підтримки заготовки не забезпечують ефективного захисту від цього явища.

1.3 Визначення напрямків дослідження

Проведений аналіз сучасного стану досліджень у галузі гідроабразивного різання CFRP дозволяє виявити низку системних проблем, які потребують вирішення для підвищення ефективності використання цього обладнання та забезпечення високої якості обробки.

Проблема перша: відсутність кількісних моделей енергетичної дисипації для оптимізації технологічних параметрів. Незважаючи на значну кількість експериментальних досліджень, присвячених впливу окремих технологічних параметрів на показники якості різання, існуючі моделі мають переважно емпіричний характер і не ґрунтуються на фундаментальних фізичних механізмах. Як зазначається в роботі [45], процес видалення матеріалу при гідроабразивному рі-

занні визначається балансом енергії, що вноситься струменем, та енергії, необхідної для руйнування компонентів композиту. Однак існуючі моделі не враховують нерівномірність дисипації енергії по глибині різання, що призводить до значних похибок при прогнозуванні умов наскрізного різання. Особливо це стосується товстих заготовок, де енергія струменя суттєво загасає при проходженні через матеріал. Крім того, відсутні методи кількісної оцінки критичного стану «якраз наскрізь», який є оптимальним з точки зору мінімізації пошкоджень при забезпеченні повного прорізання. Як показано в дослідженні [8], існує нелінійний зв'язок між технологічними параметрами та глибиною різання, який не може бути описаний лінійними моделями. Багатофакторний характер впливу параметрів, їх взаємодія та суперечливі вимоги до різних показників якості (глибина різання, шорсткість, конусність) створюють складну багатокритеріальну задачу оптимізації, яка потребує розробки нових підходів. Таким чином, актуальним є створення фізично обґрунтованої моделі енергетичної дисипації, яка дозволить встановити кількісний зв'язок між технологічними параметрами та глибиною різання, а також розробити методику багатокритеріальної оптимізації для досягнення стану «якраз наскрізь» з мінімальними пошкодженнями.

Проблема друга: недостатнє вивчення механізмів відбитого струменя та відсутність ефективних способів захисту обробленої поверхні. Як зазначається в роботах [46,47], особливістю наскрізного різання CFRP є те, що після проникнення струменя через матеріал його залишкова енергія, взаємодіючи з опорною конструкцією, утворює відбитий струмінь. Цей відбитий струмінь завдає вторинного удару по вже обробленій поверхні, спричиняючи додаткові пошкодження: розшарування, висмикування волокон, ерозію матриці та впровадження абразиву. У дослідженні [48] показано, що інтенсивність цих пошкоджень може перевищувати пошкодження, утворені на вході струменя. Особливо гостро ця проблема стоїть при обробці тонких заготовок, де частка залишкової енергії є значною. Існуючі способи підтримки заготовки (плоскі опори, опорні ножі, сітчасті опори) не забезпечують ефективного пригнічення відбитого струменя. Як зазначається в роботі [49], традиційні опори мають коефіцієнт ефективності відбиття 0,3-0,5, що

означає, що значна частина енергії відбивається назад на оброблену поверхню. Крім того, ці конструкції не забезпечують направленої відведення залишкової рідини, що призводить до її розбризкування та забруднення зони обробки. Відсутність системних досліджень гідродинамічних характеристик відбитого струменя та його взаємодії з опорною конструкцією унеможливорює створення науково обґрунтованих рекомендацій щодо проектування захисних пристроїв. Таким чином, важливим науково-прикладним завданням є розкриття механізмів формування та еволюції відбитого струменя, а також розробка нових конструктивних рішень для його ефективного пригнічення.



Рисунок 1.3 – Схематичне зображення традиційних способів підтримки заготовки та їх обмежень: сітчаста опора



Рисунок 1.4 – Типова морфологія відбитих пошкоджень на тильній поверхні заготовки CFRP

Таблиця 1.3 – Основні проблеми гідроабразивного різання CFRP та напрямки їх вирішення

Проблема	Прояв	Напрямок вирішення
Недостатня точність прогнозування глибини різання	Відсутність фізично обґрунтованих моделей	Розробка моделі енергетичної дисипації на основі закону збереження енергії
Складність вибору оптимальних параметрів	Багатофакторність, нелінійність, взаємодія параметрів	Застосування методів багатокритеріальної оптимізації з використанням регресійних моделей
Відбиті пошкодження тильної поверхні	Вторинний удар залишкового струменя	Розробка направляючої опорної конструкції з ежекційним механізмом
Розбризкування рідини	Відсутність направлено-го відведення	Інтеграція системи збору та відведення залишкової рідини

На основі проведеного аналізу можна сформулювати два основних напрямки досліджень, які є необхідними для підвищення ефективності використання гідроабразивного обладнання при обробці CFRP.

Перший напрямок – розробка методів параметричної оптимізації на основі енергетичного підходу. Цей напрямок передбачає: встановлення кількісних закономірностей енергетичної дисипації при гідроабразивному різанні CFRP; створення моделі критичної енергії, необхідної для наскрізного різання матеріалу заданої товщини; проведення систематичних експериментальних досліджень для визначення впливу технологічних параметрів на показники якості; побудову регресійних моделей для прогнозування глибини різання та шорсткості поверхні; багатокритеріальну оптимізацію для досягнення стану «якраз наскрізь» з мінімальними пошкодженнями.

Другий напрямок – розробка та обґрунтування конструкції направляючої опори для пригнічення відбитих пошкоджень. Цей напрямок передбачає: аналіз обмежень існуючих способів підтримки заготовки; розкриття механізмів формування та еволюції відбитого струменя; розробку нової опорної конструкції, що реалізує принцип «адсорбція-направлення-дисипація»; проведення чисельного моделювання гідродинамічних характеристик запропонованої конструкції; експериментальну верифікацію її ефективності в умовах реального різання CFRP.

Виконання цих досліджень дозволить створити науково обґрунтовану методику вибору технологічних параметрів, яка забезпечує високу якість обробки CFRP, а також розробити інженерне рішення для захисту обробленої поверхні від вторинних пошкоджень, спричинених відбитим струменем. Це, в свою чергу, сприятиме розширенню технологічних можливостей гідроабразивного обладнання та підвищенню ефективності його використання для виготовлення відповідальних деталей з композиційних матеріалів.

Підсумки. У першому розділі дисертаційної роботи проведено системний аналіз сучасного стану досліджень у галузі гідроабразивного різання вуглепластиків. Розглянуто фізико-механічні особливості CFRP як об'єкта обробки, включаючи його анізотропію, шарувату структуру та низьку міжшарову міцність, які обумовлюють специфічні вимоги до технології різання. Проаналізовано сутність процесу гідроабразивного різання, його енергетичні основи та переваги при обробці композиційних матеріалів.

Проведено огляд методів дослідження та оптимізації процесу AWJ, включаючи чисельне моделювання (CFD, SPH, FEM), експериментальне планування (ортогональні плани, методологія поверхні відгуку) та методи оцінки якості обробки. Встановлено, що існуючі дослідження зосереджені переважно на макромасштабному моделюванні та параметричних експериментах, тоді як питання кількісного опису критичного стану «якраз наскрізь» та механізми вторинних пошкоджень від відбитого струменя залишаються недостатньо вивченими.

На основі виконаного аналізу визначено два основних напрямки подальших досліджень. Перший напрямок передбачає розробку методів параметричної оптимізації на основі енергетичного підходу, що включає створення моделі енергетичної дисипації, проведення систематичних експериментальних досліджень та багатокритеріальну оптимізацію для досягнення стану «якраз наскрізь». Другий напрямок спрямований на розробку та обґрунтування конструкції направляючої опори для пригнічення відбитих пошкоджень, що включає аналіз обмежень існуючих способів підтримки, розкриття механізмів формування відбитого струменя

та експериментальну верифікацію запропонованих рішень. Ці напрямки визначають структуру та зміст подальших розділів дисертаційної роботи.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Механізм різання гідроабразивним струменем

Процес видалення вуглепластику (CFRP) гідроабразивним струменем є складною багатофізичною задачею, що включає гідродинаміку високого тиску, динаміку частинок та механіку пошкоджень матеріалу. Для глибокого розкриття механізму різання та побудови надійних прогностичних моделей необхідно перш за все сформулювати чітку та кількісну фізичну картину динамічної поведінки самого струменя, особливо розподілу його швидкості, тиску та просторового розташування абразивних частинок. Цей розділ, виходячи з фундаментальних принципів динаміки струменя, систематично викладає структуру потоку чисто водяного та гідроабразивного струменів, механізми перетворення енергії та їх еволюційні характеристики вздовж осі, аналізує механізм взаємодії абразивних частинок з матеріалом CFRP. На цій основі будуються чисельні моделі для опису процесу різання та прогнозування якості обробки, що закладає міцний теоретичний фундамент для подальших досліджень оптимізації процесу та забезпечення якості в наступних розділах.

2.1.1 Основи динаміки струменя

Різальна здатність гідроабразивного струменя по суті походить від величезної кінетичної енергії, яку несе високошвидкісна рідина та тверді частинки. Після виходу з сопла це високоенергетичне струминне поле зазнає складної еволюції в часі та просторі своїх полів швидкості, тиску та концентрації абразиву. Цей еволюційний процес не тільки безпосередньо визначає густину енергії, що діє на поверхню матеріалу, але й глибоко впливає на спосіб видалення матеріалу та кінцеву якість обробки. Тому точний опис динамічних характеристик гідроабразивного струменя є передумовою для розуміння механізму різання, оптимізації технологічних параметрів та побудови прогностичних моделей. Цей підрозділ зосе-

реджується на ядрі динаміки струменя – полі швидкості, і, виходячи з класичної теорії гідродинаміки та враховуючи реальні умови роботи AWJ, проводить систематичний та глибокий аналіз формування швидкості чисто водяного струменя, механізму прискорення абразивних частинок та закономірностей загасання швидкості струменя вздовж осі [50].

(1) Поле швидкості струменя

Поле швидкості струменя є найбільш фундаментальною фізичною величиною, що характеризує енергетичні властивості AWJ. Воно не тільки визначає максимальну кінетичну енергію, яку можуть отримати абразивні частинки, але й безпосередньо впливає на ударний тиск та час дії струменя на матеріал.

Теоретична швидкість на виході з сопла для чисто водяного струмен

В ідеальному випадку, нехтуючи стисливістю, в'язкістю та впливом сили тяжіння, течію води високого тиску через сопло можна розглядати як одновимірну, ізоентропійну стаціонарну течію. Згідно з рівнянням Бернуллі, теоретична швидкість чисто водяного струменя на виході з сопла визначається як [51]:

$$v_j = \sqrt{\frac{2P}{\rho_w}} \quad (2.1)$$

де P – тиск струменя,

ρ_w – густина води.

Це рівняння показує, що швидкість на виході з сопла пропорційна квадратному кореню з тиску.

У реальних процесах через тертя об стінки сопла, відрив потоку та в'язкість рідини виникають втрати енергії [52]. Вводиться коефіцієнт швидкості C_v (зазвичай 0.96–0.98) для корекції теоретичної швидкості [53]:

$$v_{j,actual} = C_v \sqrt{\frac{2P}{\rho_w}} \quad (2.2)$$

Прискорення абразивних частинок та їх кінцева швидкість

Ключова відмінність AWJ від чисто водяного струменя полягає в додаванні абразивних частинок. Ці тверді мікроскопічні частинки отримують імпульс від

водяного струменя і стають справжніми "різальними інструментами" [54,55]. Виходячи з принципу збереження імпульсу та вводячи коефіцієнт ефективності змішування η (<1) та коефіцієнт навантаження абразиву $R = \dot{m}_a/\dot{m}_w$, можна визначити середню швидкість абразивних частинок на виході з фокусуючої трубки [56,57]:

$$v_a = \eta \cdot \frac{1}{1+R} \cdot \sqrt{\frac{2P}{\rho_w}} \quad (2.3)$$

Рівняння (2.3) розкриває ключове співвідношення в технології AWJ: швидкість абразиву обернено пропорційна коефіцієнту навантаження R . Це означає, що збільшення витрати абразиву для підвищення кількості різальних частинок в одиницю часу неминуче призводить до зменшення кінетичної енергії окремої частинки. Оскільки видалення матеріалу є результатом накопичення ударів незліченної кількості частинок, існує оптимальне значення R , при якому загальна швидкість видалення матеріалу є максимальною [58].

Осьове загасання швидкості струменя та структура струменя

Швидкість v_a , розглянута вище, є початковою швидкістю частинок на виході з фокусуючої трубки. Як тільки струмінь залишає сопло і потрапляє в повітря, він більше не обмежений стінками і починає інтенсивно взаємодіяти з нерухомим навколишнім повітрям, утворюючи типовий вільний турбулентний струмінь [59]. Ця взаємодія проявляється насамперед у захопленні повітря на межі струменя, що призводить до збільшення масової витрати струменя вздовж осі, розширення примежового шару та поступового зниження швидкості на осі. Розуміння цього процесу загасання є критично важливим для вибору оптимальної відстані від сопла до зразка.

Згідно з теорією турбулентних струменів [60], структура потоку струменя може бути розділена на три характерні зони: початкова ділянка, перехідна ділянка та основна ділянка. В основній ділянці закон загасання швидкості на осі може бути виражений як [61]:

$$\frac{v_m(x)}{v_0} = \frac{B \cdot d_n}{x - x_0} \quad (2.4)$$

де v_0 – швидкість на виході з сопла,

d_n – діаметр сопла,

B – експериментальна константа (для круглого струменя $B \approx 5.0 - 6.0$),

x_0 – віртуальний полюс.

Це рівняння показує, що в зоні, віддаленій від сопла, осьова швидкість обернено пропорційна безрозмірній відстані x/d_n .

Для гідроабразивного струменя, що містить тверді частинки, через значно більшу густину абразиву порівняно з водою, його інерція є більшою, тому загасання швидкості відбувається повільніше, ніж у води, спостерігається явище ковзання швидкостей [62].

Визначальний вплив поля швидкості на морфологію різь

Осьове загасання та радіальний розподіл швидкості струменя безпосередньо визначають густину енергії, що діє на різній глибині оброблюваної деталі, і, таким чином, формують типові макроскопічні характеристики різь при AWJ. Ця морфологія зазвичай проявляється у вигляді трьох характерних зон уздовж глибини різання [63]:

Зона гладкого різання: розташована у верхній частині різь, де енергія струменя сконцентрована, абразив вдаряє під малими кутами, відбувається зсув та мікрорізання, формується гладка поверхня. **Зона грубого різання:** розташована в нижній частині різь, де енергія струменя загасає, абразив вдаряє під великими кутами, спричиняючи крихке руйнування та відшарування матеріалу, формуючи грубу штрихувату поверхню. **Зона виходу струменя:** розташована на самому дні різь, де енергія струменя майже вичерпана, відбувається лише ерозійний вплив на крайку різь.

Отже, поле швидкості струменя є не лише мірою різальної здатності, але й фізичною основою для розуміння, прогнозування та контролю якості різання AWJ, надаючи ключову фізичну картину для подальшого обговорення того, як за допомогою оптимізації параметрів регулювати глибину зони гладкого різання та пригнічувати пошкодження.

(2) Ефект гідравлічного удару та еволюція ударного тиску

Коли високошвидкісний струмінь зі швидкістю u вдаряється об поверхню матеріалу, швидкість рідини різко змінюється за дуже короткий проміжок часу, викликаючи стрімке зростання тиску рідини. Це явище називається ефектом гідравлічного удару [64]. На основі теореми про імпульс, тиск гідравлічного удару можна виразити як [65]:

$$\Delta P_{\text{гидр.удар}} = \rho c u \quad (2.5)$$

де ρ – густина рідини,

c – швидкість звуку у воді (приблизно 1500 м/с),

u – швидкість струменя.

На прикладі типових технологічних параметрів ($u \approx 600$ м/с, що відповідає тиску близько 180 МПа), розрахунковий тиск гідравлічного удару становить близько 900 МПа, що в 5 разів перевищує стаціонарний тиск гальмування струменя (180 МПа) [66]. При вищих швидкостях струменя тиск гідравлічного удару може досягати гігапаскалів, значно перевищуючи межу текучості більшості конструкційних матеріалів, що має вирішальне значення для початкового пошкодження матеріалу [67].

Ефект гідравлічного удару є перехідним явищем, час його дії дуже короткий, приблизно $\Delta t = d/c$ (де d – діаметр струменя). Для струменя діаметром $d = 1$ мм, час дії становить лише близько 0.67 мкс.

(3) Формули для витрати, кінетичної енергії та потужності

Витрата, кінетична енергія та потужність струменя є трьома фундаментальними фізичними величинами, що описують енергетичні характеристики гідроабразивного струменя. Вони разом визначають різальну здатність струменя та ефективність обробки.

Витрата водяного струменя

Відповідно до рівняння нерозривності в гідродинаміці та з використанням інженерних одиниць вимірювання, теоретичну витрату струменя можна отримати як [68]:

$$q_t = 2.1d^2\sqrt{P} \quad (2.6)$$

де q_t – теоретична витрата (л/хв), d – діаметр сопла (мм), P – тиск струменя (МПа).

На практиці, через тертя об стінки сопла та в'язкість рідини, фактична витрата менша за теоретичну. Вводиться коефіцієнт витрати μ (зазвичай 0.6–0.95) для корекції:

$$q = 2.1\mu d^2\sqrt{P} \quad (2.7)$$

Кінетична енергія водяного струменя

Кінетична енергія, яку має струмінь за одиницю часу, після перерахунку одиниць вимірювання може бути виражена як [69]:

$$W = 2098\mu\rho d^2 P^{3/2} \quad (2.8)$$

Це рівняння показує, що кінетична енергія струменя пропорційна коефіцієнту витрати μ , густині рідини ρ , квадрату діаметра сопла d^2 та залежить від тиску в степені 3/2. Підвищення тиску струменя є одним з найефективніших способів збільшення кінетичної енергії струменя.

Потужність водяного струменя

Потужність струменя відображає здатність системи до безперервного виконання роботи і може бути виражена як добуток тиску та об'ємної витрати [70]:

$$P_w = 16.67\rho q P \quad (2.9)$$

В інженерній практиці часто використовують спрощену форму: $P_w = pQ/60$, де P_w – потужність (кВт), p – тиск (МПа), Q – витрата (л/хв).

Фізичні зв'язки між параметрами та їх інженерне значення

Наведені вище формули разом утворюють базову фізичну структуру для опису енергетичних характеристик гідроабразивного струменя. Внутрішні зв'язки між ними можна узагальнити наступним чином:

Тиск як рушійна сила: Тиск струменя P є вихідним параметром, який визначає швидкість струменя v , а отже, впливає на витрату q , кінетичну енергію W та потужність P_w . **Геометричні обмеження:** Діаметр сопла d та коефіцієнт витрати μ відображають вплив геометричних характеристик системи на ефективність передачі енергії. **Розподіл енергії:** Кінетична енергія W підкреслює миттєвий ударний потенціал струменя, тоді як потужність P_w відображає здатність до безперервного виконання роботи; обидві величини є критично важливими для процесу різання.

У практичному застосуванні ці параметричні співвідношення забезпечують теоретичну основу для вибору технологічних параметрів. Наприклад, для різання матеріалів високої твердості можна збільшити кінетичну енергію струменя шляхом підвищення тиску P ; для підвищення ефективності різання можна збільшити діаметр сопла d для збільшення витрати та потужності; при прецизійній обробці необхідно знаходити компроміс між параметрами для контролю ширини різку та якості поверхні.

2.1.2 Силевий аналіз абразивних частинок

Різальна здатність гідроабразивного струменя по суті походить від ударної та мікрорізальної дії високошвидкісних абразивних частинок на поверхню матеріалу. Поглиблений аналіз напруженого стану абразивних частинок є теоретичною основою для розуміння механізму їх прискорення, ефективності передачі енергії та кінцевого результату різання.

(1) Аналіз сил, що діють на абразивні частинки

Рух абразивних частинок у рідині є складним динамічним процесом. Згідно з теорією двофазних потоків, сили, що діють на частинки в рідині, можна розділити

на три основні категорії: сили взаємодії між рідиною та частинками, об'ємні сили, а також сили взаємодії між частинками та між частинками і стінкою [71].

З урахуванням різних сил можна скласти повне рівняння динаміки руху абразивної частинки всередині сопла [72]:

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = F_d + F_p + F_m + F_B + F_l + F_c + F_w + F_g + F_t \quad (2.10)$$

Фізичний зміст кожного члена сили наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Типи сил, що діють на абразивні частинки, та їх фізичний зміст

Тип сили	Позначення	Фізичний зміст
Сила опору (Драг-сила)	F_d	Тиск рідини та ефекти в'язкості на поверхні частинки, основна рушійна сила прискорення частинки
Сила градієнта тиску	F_p	Додаткова сила, що виникає через нерівномірний просторовий розподіл тиску в полі потоку
Інерційна сила	F_i	Основна механічна величина, що описує зміну стану руху самої частинки
Сила приєднаної маси	F_m	Додатковий інерційний ефект, що виникає при прискоренні частинки, яка захоплює за собою навколишню рідину
Сила Бассі	F_B	Миттєвий опір, пов'язаний з історією прискорення при змінному русі частинки, що відображає "пам'ять" рідини
Підіймальна сила	F_l	Поперечна сила, що виникає через градієнт швидкості поля потоку або обертання частинки
Сила міжчастинкових зіткнень	F_c	Сила, що виникає при взаємних зіткненнях частинок у зонах високої концентрації
Сила зіткнення зі стінкою	F_w	Сила реакції при зіткненні частинки зі стінкою сопла
Сила тяжіння	F_g	Сила, спрямована вниз, зумовлена масою частинки
Сила турбулентності	F_t	Випадкова флуктуаційна сила, створювана турбулентними пульсаціями рідини

У практичних застосуваннях, залежно від конкретних умов потоку та характеристик частинок, різні сили можна обґрунтовано спростити. Наприклад, у розріджених потоках можна знехтувати силою міжчастинкових зіткнень, а в однорідних полях потоку без значних градієнтів швидкості можна знехтувати підіймальною силою [72].

(2) Механізм прискорення абразиву та його руйнування (дроблення)

Процес прискорення абразивних частинок є ключовим етапом, що дозволяє гідроабразивному струменю набути різальної здатності. У системах гідроабразив-

ного різання з подачею абразиву до змішувальної камери (перед соплом) процес прискорення абразиву можна розділити на три етапи [73]: **Перший етап** відбувається у гнучкому рукаві високого тиску, де абразив набуває початкової швидкості. **Другий етап** відбувається всередині сопла, де через різку зміну поперечного перерізу каналу абразив отримує значне прискорення. **Третій етап** відбувається в ядрі зовнішнього поля потоку після виходу з сопла, де абразив отримує короткочасне, але значне додаткове прискорення.

Основний процес прискорення відбувається саме в соплі. У конічних конфузних соплах прискорення абразиву відбувається головним чином у збіжній ділянці. Внаслідок поступового зменшення площі поперечного перерізу каналу швидкість води різко зростає, утворюючи значний градієнт кінетичної енергії. Абразивні частинки прискорюються під спільною дією сили опору та сили градієнта тиску. Наприкінці збіжної ділянки швидкість абразиву вже дуже близька до швидкості водяної фази [73].

Під час високошвидкісного руху відбуваються часті зіткнення між самими абразивними частинками, а також між частинками та стінкою сопла, що призводить до їх дроблення. Дослідження показують, що ступінь дроблення абразивних частинок при проходженні через трубку-пісконос може сягати близько 80%, що означає, що значна частина енергії витрачається на зіткнення в процесі прискорення [74].

Дроблення абразиву має подвійний вплив на процес різання: З одного боку, дроблення частинок створює нові гострі кромки, що певною мірою сприяє мікрорізанню. З іншого боку, надмірне дроблення призводить до зменшення розміру абразивних частинок, втрати їх кінетичної енергії та зниження ефективності різання.

Зі збільшенням витрати абразиву зіткнення між частинками посилюються. Коли витрата абразиву перевищує певне критичне значення, загальна різальна здатність струменя починає знижуватися [74].

(3) Модель перетворення кінетичної енергії та дисипація енергії

Різальна здатність гідроабразивного струменя по суті походить від передачі та перетворення енергії, яку несе вода високого тиску, на кінетичну енергію абразивних частинок. У системах гідроабразивного різання з подачею абразиву до змішувальної камери енергія тиску води в процесі прискорення перетворюється на кінетичну енергію [75].

На ефективність передачі енергії від водяного струменя до абразивних частинок впливає багато факторів, ключовим параметром є коефіцієнт навантаження абразиву $R = \dot{m}_a / \dot{m}_w$. Дослідження показують, що при низькій витраті абразиву збільшення витрати може підвищити ефективність використання енергії. Однак після досягнення певного значення подальше збільшення витрати призводить до посилення взаємних перешкод між частинками, середня кінетична енергія, отримана окремою частинкою, знижується, а ефективність передачі енергії падає [76].

У процесі гідроабразивного різання дисипація енергії відбувається наступними основними шляхами [76]:

1. Обмін імпульсом та захоплення маси між струменем і навколишнім повітрям, що призводить до розширення примежового шару струменя та зниження швидкості в ядрі.
2. Взаємні зіткнення абразивних частинок у процесі прискорення, частина енергії розсіюється у вигляді тепла, частина витрачається на дроблення частинок.
3. Відбиття та тертя струменя в розрізі, що призводить до значного загасання енергії струменя, яка діє на дні різку.
4. Поглинання енергії пластичною деформацією та руйнуванням у процесі видалення матеріалу.

Просторово-часова характеристика дисипації енергії безпосередньо впливає на якість та ефективність різання. Зі збільшенням глибини різання енергія струменя поступово загасає, що призводить до формування чітких зон на зрізі: верхньої зони гладкого різання та нижньої зони грубого різання. Крім того, дисипація енергії впливає на конусність різку. В міру загасання енергії струменя вздовж гли-

бини, ефективна енергія, що діє на дні, зменшується, що призводить до поступового зменшення ширини різку та утворення типового V-подібного профілю [74].

2.1.3 Енергетична дисипація в процесі наскрізного різання

(1) Що таке енерговитрати і навіщо їх міряти

Процес різання є перетворенням енергії струменя на руйнування матеріалу. Частина енергії пішла на руйнування, частина – полетіла далі. За законом збереження енергії [88]:

$$E_{\text{дис}} = E_{\text{вх}} - E_{\text{вих}} \quad (2.11)$$

Тут $E_{\text{вх}}$ – скільки енергії принесло струмінь у деталь, $E_{\text{вих}}$ – скільки енергії вишло з іншого боку (якщо прорізало). Якщо початкової енергії менше, ніж треба, щоб зруйнувати матеріал – деталь не проріжеться.

Для кількісної оцінки введено коефіцієнт дисипації енергії χ . Цей коефіцієнт характеризує частку енергії, витраченої на руйнування матеріалу на глибині h [88]:

$$\chi(h) = \frac{A(h)}{A_2} \quad (2.12)$$

Тут $A(h)$ – площа, яку ще не прорізало через нестачу енергії на глибині h , а A_2 – площа, яка була б прорізана в ідеалі. Коефіцієнт цей змінюється від 0 на поверхні до 1 на максимальній глибині, де енергія зовсім скінчилася.

Енергія витрачається на різне [88]: на руйнування матеріалу і розгін уламків; на гасіння струменя водою на поверхні різку; на тертя об стінки; незначна частина – на тепло (хоча тут воно не головне).

(2) Вплив технологічних параметрів на коефіцієнт дисипації енергії

В основу аналізу покладено результати дослідження [88], в якому визначено вплив технологічних параметрів на дисипацію енергії при різанні вуглепластику. Ці результати є основою для встановлення зв'язку між теоретичними положеннями та практичним вибором режимів різання.

Швидкість подачі

На Рис. 2.1 показано, як змінюється коефіцієнт дисипації χ залежно від глибини (по вертикалі – безрозмірна глибина $H = h/h_{\max}$) для різних швидкостей подачі [88].

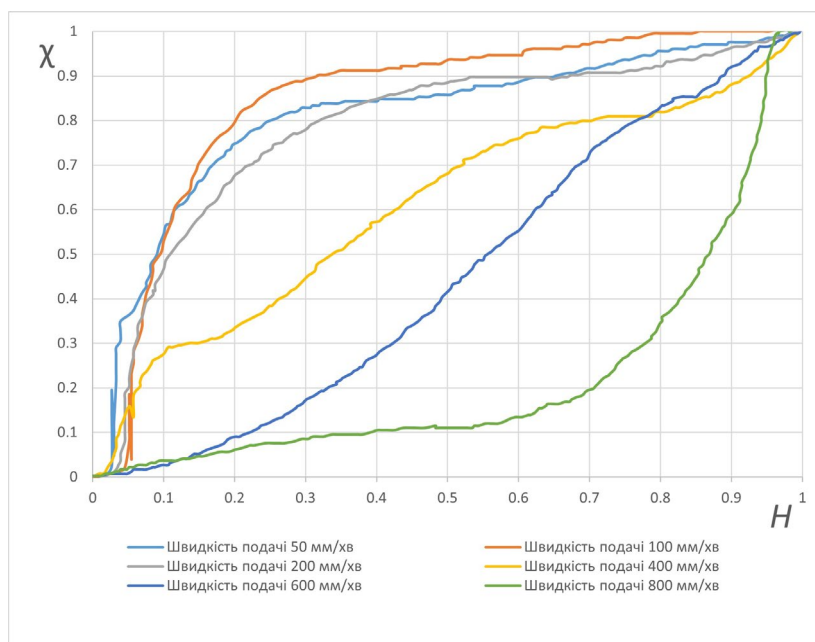


Рисунок 2.1 - Коефіцієнт дисипації енергії при різних швидкостях різання

Аналіз наведених залежностей (рис. 2.1) дозволяє виявити наступні закономірності:

Коли $H < 0.1$, коефіцієнт дисипації енергії для всіх режимів залишається низьким. Це пояснюється тим, що при початковому контакті струменя з поверхнею частина його відбивається, і ця енергія потрапляє в $E_{\text{вих}}$, не впливаючи безпосередньо на коефіцієнт дисипації.

У діапазоні $0.1 < H < 0.4$ найкрутіший нахил кривої – у повільного різання (50 мм/хв). Це свідчить про те, що найбільша енергія витрачається на одиницю глибини різання, а матеріал видаляється з максимальною ефективністю.

Зі збільшенням глибини крива для повільного різання стає пологішою ($H > 0.4$). Енергія, запасена спочатку, вже значною мірою вичерпалася.

При швидкому різанні (800 мм/хв) енергія на малих глибинах витрачається повільно, зате на великих ($H > 0.7$) нахил кривої зростає – енергія ніби "вистрілює" в кінці.

Отримані результати узгоджуються з положеннями, викладеними в підрозділі 2.1.1 чим менша швидкість подачі, тим більше енергії встигає "влетіти" в кожний міліметр шляху, і тим краще вона використовується.

(3) Вплив тиску струменя на коефіцієнт дисипації енергії

На рис. 2.2 показано, як змінюється коефіцієнт дисипації енергії залежно від тиску струменя.

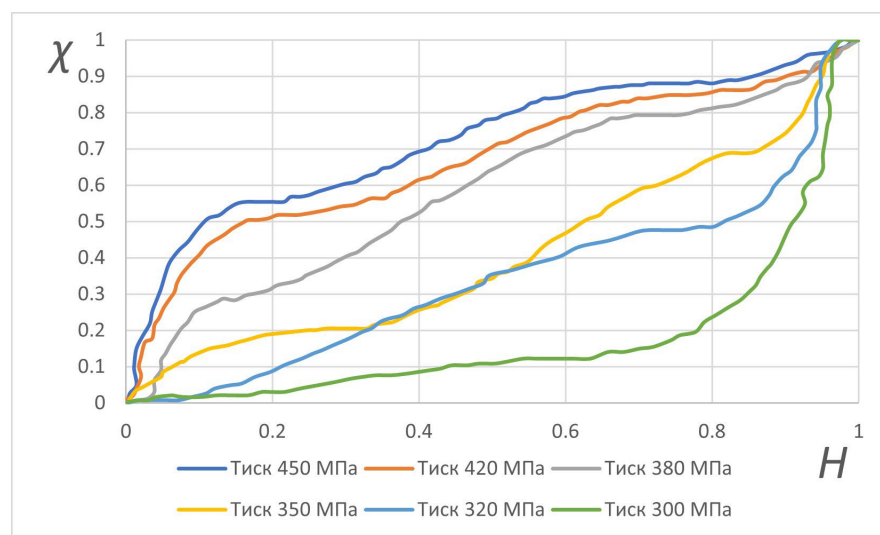


Рисунок 2.2 - Коефіцієнт дисипації енергії при різному тиску струменя

Коли тиск перевищує поріг руйнування матеріалу (450, 420, 380 МПа), коефіцієнт дисипації енергії стрімко зростає вже на малих глибинах ($H < 0.2$). Це означає, що потужний струмінь здатний ефективно руйнувати матеріал із самого початку.

При тиску, нижчому за порогове значення (350, 320, 300 МПа), енергія витрачається повільно та рівномірно. Руйнування матеріалу потребує поступового накопичення ефекту від багатьох ударів частинок. Лише на великих глибинах поблизу виходу струменя крива різко зростає, що зумовлено додаванням енергії відбитого струменя.

Це явище узгоджується з викладеними вище теоретичними положеннями. Коли тиск нижчий за поріг, струмінь не пробиває матеріал одразу, а його залишкова енергія перетворюється на відбитий струмінь, який потім псує вже готову поверхню.

Вплив відстані від сопла до зразка (Stand-off Distance) на коефіцієнт дисипації енергії

На рис. 2.3 наведено залежність коефіцієнта дисипації енергії від відстані між соплом і поверхнею.

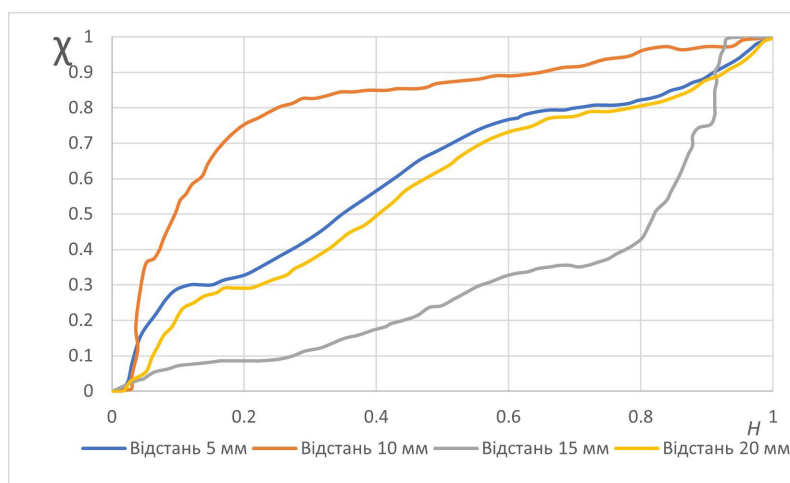


Рисунок 2.3 - Коефіцієнт дисипації енергії при різній відстані від сопла до зразка (SOD)

Коли відстань $L = 10$ мм, у діапазоні $0.1 < H < 0.3$ коефіцієнт дисипації енергії зростає помітно швидше, ніж за інших відстаней. Це свідчить про існування оптимальної відстані, при якій енергія використовується найефективніше. Цей висновок чудово узгоджується з тим, що ми обговорювали в розділі 2 (формула 2.4): якщо відстань занадто мала, абразив не встигає розігнатися як слід; якщо занадто велика – струмінь починає розсіюватися ще до того, як дійде до деталі.

(4) Критичний енергетичний поріг

Коли енергії струменя рівно стільки, скільки треба для повного прорізання матеріалу, досягається стан "якраз наскрізь". Ця критична енергія залежить від

товщини матеріалу, кількості волокон, їх напрямку тощо[91,92]. Для вуглепластику її можна оцінити так:

$$E_{\text{пор}} = H \cdot (\rho_f V_f e_f + \rho_m (1 - V_f) e_m + \gamma_{\text{інт}}) \cdot W_{\text{сер}} \quad (2.13)$$

де H – товщина матеріалу,

ρ_f, ρ_m – густина волокна й матриці,

V_f – об'ємна частка волокна,

e_f, e_m – енергія руйнування одиниці маси волокна й матриці,

$\gamma_{\text{інт}}$ – енергія, щоб розклеїти одиницю площі межі між шарами,

$W_{\text{сер}}$ – середня ширина різну.

Енергію руйнування волокна можна порахувати через його міцність і пружність:

$$e_f = \frac{\sigma_f^2}{2E_f} \quad (2.14)$$

де σ_f – міцність волокна на розтяг,

E_f – модуль пружності волокна.

А енергію руйнування матриці – через її в'язкість руйнування:

$$e_m = \frac{K_{Ic}^2}{E_m} \quad (2.15)$$

де K_{Ic} – в'язкість руйнування матриці (як добре вона тримає тріщину),

E_m – модуль пружності матриці.

Для нашого випадку – плити CFRP завтовшки 3 мм, зробленої з волокна T300 та епоксидної смоли – підставляння чисел у формулу (2.13) дає критичний поріг приблизно $E_{\text{пор}} \approx 450$ Дж/м. Це значення використано як критерій у розділі 3 для досягнення стану «якраз наскрізь» без надлишкової або недостатньої енергії.

2.1.4 Поширення хвиль напружень у зоні наскрізного різання

(1) Теорія хвиль напружень при ударному навантаженні

Коли швидкісний струмінь влучає в поверхню, він створює всередині матеріалу хвилі напружень. Як швидко вони біжать, залежить від пружності матеріалу та його густини [85]. Є два типи хвиль:

Поздовжні (вони ж швидкі):

$$c_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2.16)$$

Поперечні (повільніші):

$$c_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.17)$$

де E – модуль пружності,

G – модуль зсуву,

ν – коефіцієнт Пуассона,

ρ – густина.

У зв'язку з анізотропією вуглепластику швидкості поширення хвиль є різними в різних напрямках: найбільші — вздовж волокон, менші — поперек волокон, найменші — в напрямку товщини матеріалу [93].

(2) Відбиття та проходження хвиль напружень на міжшарових межах

Коли хвиля доходить до межі між шарами, частина її відбивається назад, а частина проходить далі. Скільки чого – залежить від так званого **акустичного імпедансу** $Z = \rho c$ матеріалів по різні боки межі [85].

Коефіцієнт відбиття (скільки відбилося):

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2.18)$$

Коефіцієнт проходження (скільки пройшло далі):

$$T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (2.19)$$

У вуглепластику сусідні шари часто повернуті під різними кутами, тому їхній імпеданс трохи відрізняється. Через це хвиля частково відбивається. Відбита хвиля накладається на ту, що йде далі, і в деяких місцях (особливо біля межі) вини-

кають розтягуючі напруження. Якщо вони більші за те, що може витримати зв'язок між шарами, шари починають розходитися. Саме так і виникає розшарування, що демонструє взаємозв'язок між поширенням хвиль напружень та утворенням дефектів.

(3) Механізм розшарування, індукованого хвилями напружень

Процес можна розбити на три етапи [85]:

1. **Зародження мікротріщин.** Розтягуючі напруження від відбитих хвиль найлегше розкривають маленькі дефекти, які завжди є на межі шарів, або "виривають" тріщину в місцях, де накопичилося багато смоли.

2. **Ріст тріщини.** Хвилі продовжують довбати, тріщина повзе вздовж межі. До того ж, якщо туди затекла вода під тиском, вона діє як клин і розкриває тріщину ще сильніше.

3. **Розшарування.** Коли тріщина виростає до критичного розміру, далі вона росте вже сама, без додаткової допомоги, – і ми отримуємо велику зону, де шари відклеїлися.

Інтенсивність розшарування залежить від амплітуди початкової хвилі (тобто тиску струменя), міцності міжшарового зв'язку та товщини матеріалу. Контроль тиску є основним засобом обмеження розшарування, що враховано при виборі оптимальних режимів у розділі 3.

2.1.5 Поведінка відбитого струменя після прорізання CFRP

(1) Реконструкція поля швидкостей прорізного струменя та аналіз залишкової енергії

Коли гідроабразивний струмінь повністю прорізає плиту CFRP, струмінь із залишковою енергією продовжує рух вниз і, зустрічаючи опорну конструкцію, відбивається. Відповідно до принципу збереження енергії, швидкість залишкового струменя після прорізання може бути виражена як:

$$v_r = v_0 - \Delta v_{\text{різ}} - \Delta v_{\text{тер}} \quad (2.20)$$

де v_0 – початкова швидкість на виході з сопла,

$\Delta v_{\text{різ}}$ – складова швидкості, витрачена в процесі різання,

$\Delta v_{\text{тер}}$ – втрата швидкості, спричинена тертям струменя об стінки різу.

Складова швидкості, витрачена в процесі різання, тісно пов'язана з енергією, необхідною для видалення матеріалу. Згідно з моделлю різання Хешиша [84], енергія, необхідна для видалення матеріалу, залежить від товщини матеріалу, об'ємної частки волокон, властивостей матриці та інших факторів. Для матеріалу CFRP енергія, витрачена на різання за одиницю часу, може бути виражена як:

$$E_{\text{різ}} = H^{1.02} \cdot (\rho_f V_f e_f + \rho_m (1 - V_f) e_m + \gamma_{\text{інт}}) \cdot v \cdot W_{\text{сер}} \quad (2.21)$$

де H – товщина матеріалу,

ρ_f та ρ_m – густина волокна та матриці відповідно,

V_f – об'ємна частка волокна, e_f та e_m – питома енергія руйнування волокна та енергія дроблення матриці на одиницю маси,

$\gamma_{\text{інт}}$ – питома енергія розкриття міжфазної поверхні на одиницю площі,

v – швидкість подачі,

$W_{\text{сер}}$ – середня ширина різу.

З закону збереження енергії складова швидкості, витрачена на різання, може бути виведена як:

$$\Delta v_{\text{різ}} = \sqrt{v_0^2 - \frac{2E_{\text{різ}}}{\dot{m}}} \quad (2.22)$$

де $\dot{m}$ – масова витрата струменя.

Втрати на тертя між струменем та стінками різу залежать від довжини різу, шорсткості стінок та інших факторів і можуть бути наближено виражені як:

$$\Delta v_{\text{тер}} = \lambda \frac{H}{d} \frac{v_0^2}{2v_r} \quad (2.23)$$

де λ – коефіцієнт тертя,

d – ширина різу.

Струмінь після проникнення через матеріал все ще має досить високу залишкову швидкість. Ця залишкова енергія є джерелом відбитих пошкоджень. Величина цієї залишкової енергії безпосередньо залежить від закону загасання швидкості струменя, розкритого в розділі 2 (формула 2.23): чим більша відстань від сопла до зразка, тим сильніше розсіювання струменя і тим нижча залишкова енергія.

(2) Розподіл енергії та закономірності загасання відбитого струменя

Коли залишковий струмінь вдаряється об опорну конструкцію, відбувається його відбиття. Розподіл енергії відбитого струменя суттєво відрізняється від падаючого струменя. Згідно з принципами гідродинаміки, густина енергії відбитого струменя може бути виражена як:

$$E_r(x, y, z) = \eta \cdot E_0 \cdot f(\theta) \cdot g(r) \quad (2.24)$$

де E_0 – густина енергії падаючого струменя,

η – коефіцієнт ефективності відбиття,

$f(\theta)$ – функція кутового розподілу,

$g(r)$ – функція радіального загасання.

На коефіцієнт ефективності відбиття η впливають різноманітні фактори, включаючи геометрію опорної конструкції, властивості матеріалу та кут падіння. Для традиційних плоских опорних конструкцій коефіцієнт ефективності відбиття є відносно високим і може досягати 0.3–0.5. Для оптимізованих направляючих опорних конструкцій, завдяки геометричним обмеженням та регулюванню поля потоку, коефіцієнт ефективності відбиття можна суттєво знизити. Загасання енергії відбитого струменя в повітрі підпорядковується експоненційному закону:

$$E(x) = E_r \cdot e^{-\alpha x} \quad (2.25)$$

де α – коефіцієнт загасання енергії,

x – відстань поширення.

Для двофазного потоку вода-повітря діапазон значень α становить приблизно 0.1–0.3 мм⁻¹.

На рис. 2.4 наведено порівняння розподілу енергії відбитого струменя для різних опорних конструкцій. Чисельне моделювання показує, що традиційна опорна конструкція призводить до великоплощинного розсіювання відбитого струменя, тоді як направляюча опорна конструкція може обмежити відбитий струмінь у межах спеціального каналу, ефективно зменшуючи його вторинний удар по вже обробленій поверхні.

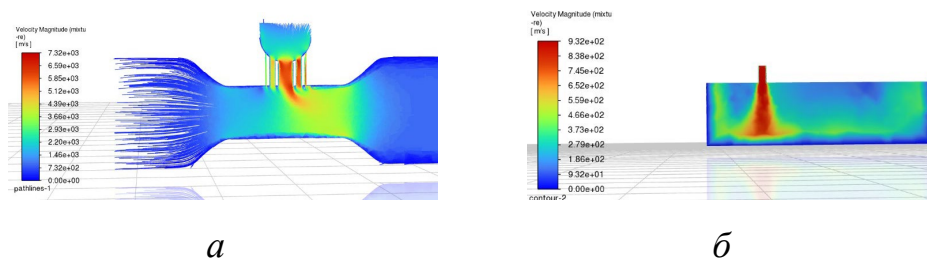


Рисунок 2.4 - Відбитий струмінь для направляючої опорної конструкції (змішана фаза) (а) та для традиційної опорної конструкції (змішана фаза) (б)

Таблиця 2.2 - Порівняння коефіцієнтів ефективності відбиття для різних опорних конструкцій

Тип опорної конструкції	Коефіцієнт ефективності відбиття η	Характеристика розподілу енергії
Плоска опора	0.3–0.5	Великоплощинне розсіювання, випадковий напрямок
Опорні ножі	0.25–0.4	Лінійне відбиття, зосереджене вздовж напрямку ножа
Сітчаста опора	0.2–0.35	Багатоточкове відбиття, утворення розсіювання

(3) Просторово-часова еволюція характеристик зворотного удару

Удар відбитого струменя по вже обробленій поверхні має значні просторово-часові характеристики еволюції. За допомогою високошвидкісної відеозйомки та аналізу чисельного моделювання процес зворотного удару можна розділити на три етапи:

Етап початкового удару: Відбитий струмінь вперше контактує з обробленою поверхнею, створюючи миттєвий ударний тиск. Згідно з теорією гідравлічного удару, піковий тиск на цьому етапі може бути виражений як:

$$P_{\text{пик}} = \rho c v_r \cdot \cos \theta \quad (2.26)$$

де ρ – густина рідини,

c – швидкість звуку,

v_r – швидкість відбитого струменя,

θ – кут падіння.

Для вертикального відбиття піковий тиск може в кілька разів перевищувати стаціонарний тиск. Це явище узгоджується з механізмом ефекту гідравлічного удару (підрозділ 2.1.2), однак у даному випадку він діє на вже оброблену поверхню, а не на первинну поверхню різання.

Етап стабільного відбиття: Відбитий струмінь формує стабільний стан течії, створюючи безперервний змивний вплив на оброблену поверхню. На цьому етапі тиск, що діє на поверхню, приблизно дорівнює:

$$P_s = C_p \cdot \frac{1}{2} \rho v_r^2 \quad (2.27)$$

де C_p – коефіцієнт тиску, який залежить від геометричної форми поверхні відбиття та стану течії.

Етап дисипації та згасання: Енергія відбитого струменя поступово загасає, утворюючи розсіяні краплі та зону туманоутворення. Тривалість цього етапу залежить від розміру простору відбиття та початкової енергії струменя і зазвичай становить порядку мілісекунд. Проведений аналіз свідчить, що залишкова енергія проникного струменя є першопричиною виникнення вторинних пошкоджень на вже обробленій поверхні. Отже, існує необхідність у розробці опорної конструкції, здатної ефективно пригнічувати ударний вплив відбитого струменя. З цією метою в роботі запропоновано направляючу опорну конструкцію для захисту від відбитого струменя, принцип дії та характеристики поля потоку якої детально викладено в підрозділі 2.3.5, а її ефективність підтверджено шляхом поєднання чисельного моделювання та експериментальних досліджень.

2.2 Пошкодження при гідроабразивному різанні

2.2.1 Закономірності еволюції внутрішніх пошкоджень

(1) Як виглядає розшарування і як його міряти

Розшарування є одним із найбільш критичних видів пошкодження композиційних матеріалів. У роботі [85] проведено мікроскопічний аналіз його морфології.

Розшарування найчастіше виникає у двох місцях: там, де струмінь тільки входить у матеріал, і там, де він виходить з іншого боку. На вході струменя розшарування спричинене дією ударного тиску (ефект гідравлічного удару, підрозділ 2.1.2). На виході струменя розшарування зумовлене раптовим вивільненням енергії при прориванні струменя через матеріал, що безпосередньо пов'язане з явищем відбитого струменя (розділ 2).

Ступінь розшарування зазвичай міряють так званим **коефіцієнтом розшарування** F_d [85]:

$$F_d = \frac{A_d}{A_0} \quad (2.28)$$

де A_d – площа, на якій шари розійшлися,

A_0 – номінальна площа самого різну.

Менші значення цього коефіцієнта відповідають вищій якості обробки.

(2) Висмикування волокон і відшарування від матриці

Висмикування волокон є іншим типовим видом пошкодження, при якому волокна не перерізаються, а висмикуються з матриці. Коли енергії струменя обмаль, волокна ламаються не від зрізу, а гнуться і висмикуються. Якщо зв'язок між волокном і матрицею слабкий, то руйнується саме він, а волокно залишається цілим, але стирчить. Коли ріжемо впоперек волокон, на їхнє перерізання треба більше енергії, і ймовірність висмикування зростає.

Ступінь висмикування волокон кількісно оцінюється за довжиною висмикнутих волокон L_p та їх поверхневою густиною ρ_p . Довжина волокон, що стирчать, залежить від режимів різання приблизно так:

$$L_p = k \cdot P^a \cdot v^b \cdot L^c \quad (2.29)$$

Тут k – якась константа, що залежить від матеріалу,

a, b, c – показники, які треба підбирати під конкретні умови.

(3) Характеристики ерозії матриці

Матриця (епоксидна смола) – річ м'яка, тому абразив її дряпає, вода змиває, і в результаті вона виїдається швидше, ніж ріжуться волокна. Волокна залишаються без підтримки, стирчать, ламаються. Усе це називають **ерозією матриці** [85].

До чого це призводить До того ж, до чого й інші біди: волокна стирчать, верхня стає шорсткою, міцність падає.

Глибина ерозії матриці h_m апроксимується емпіричною залежністю від технологічних параметрів:

$$h_m = k_m \cdot \left(\frac{P}{v}\right)^a \cdot d_p^c \quad (2.30)$$

Тут d_p – розмір абразивних частинок.

(4) Усі біди водночас: конкуренція та взаємодопомога

Різні типи пошкоджень при гідроабразивному різанні CFRP є взаємопов'язаними та взаємопідсилюючими [85]. Характер цих зв'язків наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 - Конкуренція та синергія багаторежимних пошкоджень

Вид пошкодження	Через що виникає	З ким дружить
Розшарування	Удар на вході, вода під тиском лізе в щілини	Послаблює зв'язок між шарами, волокнам тепер легше висмикуватися
Висмикування волокон	Мало енергії, поганий зв'язок між волокном і смолою	Матриця втрачає опору, її легше виїдає
Виїдання матриці	Абразив дряпає, вода змиває	Волокна стирчать без захисту – їх тепер теж висмикнути легше
Абразив застряг	Мало енергії, відбитий струмінь добиває	Псує все, до чого доторкнеться

Через цю зграйку при підборі режимів різання необхідно одночасно враховувати всі ці показники, досягаючи компромісного рішення.

2.2.2 Механізм утворення та характеристика відбитого пошкодження

(1) Геометричні особливості вторинного пошкодження обробленої поверхні

Вторинне пошкодження, спричинене відбитим струменем на вже обробленій поверхні, має типові геометричні особливості. За допомогою SEM-спостережень можна виявити, що відбиті пошкодження проявляються переважно у таких формах:

Поверхневі подряпини: Залишкові абразивні частинки у відбитому струмені спричиняють дряпання обробленої поверхні, утворюючи направлені видовжені подряпини. Глибина подряпин зазвичай становить 5–20 мкм, а довжина може сягати сотень мікрометрів.

Відшарування матеріалу: Ударна дія відбитого струменя призводить до локального відшарування матеріалу на межі волокно/матриця, утворюючи нерегулярні ямки відшарування. Діаметр ямок відшарування зазвичай становить 50–200 мкм, а глибина може сягати 30–50 мкм.

Поширення мікротріщин: Ударний тиск відбитого струменя спричиняє подальше поширення вже існуючих мікротріщин або зародження нових. Ці тріщини поширюються переважно вздовж напрямку волокон або міжшарових меж, суттєво впливаючи на механічні властивості матеріалу.

Впровадження абразиву: Залишкові абразивні частинки у відбитому струмені під дією удару впроваджуються у м'якшу полімерну матрицю, утворюючи точки впровадження абразиву. Глибина впровадження може сягати 10–30 мкм, що серйозно впливає на подальші експлуатаційні властивості матеріалу.

На рис. 2.5 показано типову морфологію відбитих пошкоджень на зворотній стороні заготовки CFRP. З рис. 2.5а видно, що в процесі різання без захисту на зворотній стороні заготовки вздовж крайки різу з'явилися великі зони відшарування та подряпин; рис. 2.5б демонструє характер пошкоджень, спричинених потоком відбитого струменя вздовж торцевої поверхні.

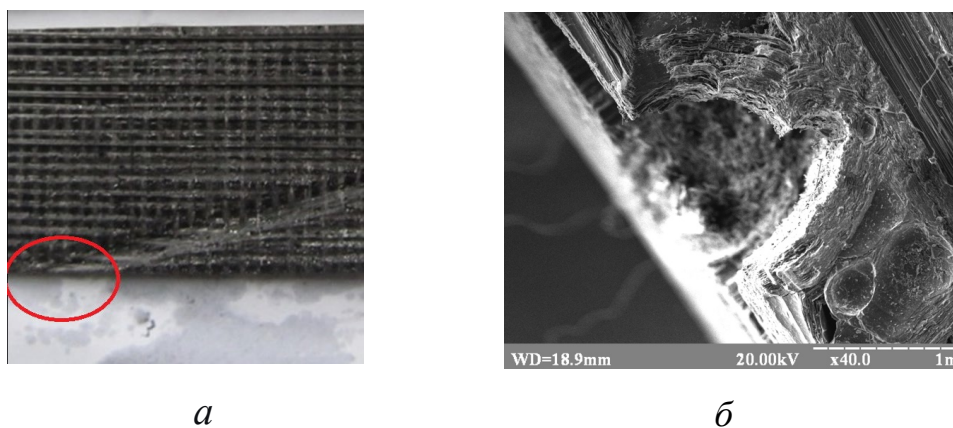


Рисунок 2.5 - Пошкоджена зворотна поверхня (а) та вплив дренажного потоку рідини вздовж торцевої поверхні (б)

Для кількісної характеристики ступеня відбитого пошкодження визначено наступні параметри пошкодження:

Глибина пошкодження d_a : максимальна глибина зони відбитого пошкодження, виміряна за допомогою конфокального мікроскопа.

Коефіцієнт площі пошкодження S_a : відношення площі зони пошкодження до площі зони різання.

Довжина висмикнутих волокон L_p : середня довжина волокон, висмикнутих з матриці.

Густина впровадження абразиву ρ_e : кількість впроваджених абразивних частинок на одиницю площі.

(2) Взаємозв'язок між глибиною пошкодження та технологічними параметрами

На глибину відбитого пошкодження впливають різні технологічні параметри. За допомогою систематичних експериментальних досліджень було встановлено взаємозв'язок між глибиною пошкодження та основними технологічними параметрами.

Вплив тиску струменя на глибину відбитого пошкодження має нелінійний характер. Зі збільшенням тиску струменя глибина пошкодження спочатку збільшується, а потім зменшується, існує критичне значення тиску, при якому відбите

пошкодження є найбільш серйозним. Це явище можна пояснити наступним чином: коли тиск низький, енергії відбитого струменя недостатньо для спричинення значного пошкодження; коли тиск надто високий, більша частина енергії витрачається в процесі різання, а залишкова енергія, навпаки, зменшується. Ця закономірність тісно пов'язана з критичним енергетичним порогом: коли тиск наближається до критичного значення, необхідного для повного прорізання матеріалу, залишкова енергія є максимальною, а відбите пошкодження – найбільш серйозним.

Вплив швидкості подачі на глибину відбитого пошкодження є досить значним. Зі збільшенням швидкості подачі глибина пошкодження має тенденцію до зростання. Це пов'язано з тим, що збільшення швидкості подачі призводить до зменшення енергії струменя, що припадає на одиницю довжини матеріалу, частка енергії, витраченої на процес різання, знижується, і більше залишкової енергії перетворюється на відбитий струмінь. Оптимізація технологічних параметрів буде ґрунтуватися на цьому, вибираючи відповідну швидкість подачі для балансування ефективності різання та відбитих пошкоджень за умови забезпечення наскрізного прорізання.

Вплив відстані від сопла до зразка на глибину відбитого пошкодження проявляється наступним чином: зі збільшенням відстані глибина пошкодження спочатку збільшується, а потім зменшується, існує оптимальна відстань, при якій відбите пошкодження є найбільш серйозним. Це пов'язано з тим, що відстань впливає на фокусування та густину енергії струменя, а отже, і на ефективність різання та залишкову енергію.

На основі експериментальних даних створено емпіричну модель глибини відбитого пошкодження:

$$d_d = k \cdot P^a \cdot v^b \cdot L^c \cdot e^{-\left(\frac{P-P_0}{\sigma_P}\right)^2} \quad (2.31)$$

де k – константа матеріалу,

a, b, c – емпіричні показники ступеня,

P_0 – критичний тиск,

σ_p – коефіцієнт чутливості до тиску.

(3) Механізм погіршення шорсткості поверхні внаслідок відбитого пошкодження

Відбите пошкодження має значний негативний вплив на шорсткість обробленої поверхні. Дослідження показують, що в зонах з відбитим пошкодженням значення шорсткості поверхні Ra може збільшуватися на 30%–80%. Погіршення шорсткості поверхні внаслідок відбитого пошкодження відбувається за допомогою наступних основних механізмів:

Механізм збільшення шорсткості через подряпини: Дряпаюча дія залишкових абразивних частинок у відбитому струмені на поверхню створює нові подряпини та борозни, безпосередньо збільшуючи амплітуду коливань профілю поверхні. Внесок подряпин у шорсткість можна виразити як:

$$\Delta Ra_{\text{подр}} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n (h_i \cdot w_i \cdot l_i) \quad (2.32)$$

де h_i – глибина i -ї подряпини,

w_i – ширина,

l_i – довжина,

A – площа вимірюваної ділянки.

Механізм збільшення шорсткості через відшарування: Ударний тиск відбитого струменя призводить до локального відшарування матеріалу, утворюючи ямки відшарування. Внесок ямок відшарування у шорсткість пов'язаний з їх глибиною та поверхневою густиною:

$$\Delta Ra_{\text{ямки}} = \frac{1}{A} \sum_{j=1}^m V_j \quad (2.33)$$

де V_j – об'єм j -ї ямки відшарування.

Механізм збільшення шорсткості через оголення волокон: Пріоритетна ерозія матриці відбитим струменем призводить до оголення волокон, що збільшує нерівномірність профілю поверхні. Приріст шорсткості в зонах оголених волокон пропорційний діаметру волокна та висоті оголення.

Узагальнюючи вищезазначені механізми, приріст шорсткості, спричинений відбитим пошкодженням, можна виразити як:

$$\Delta Ra = \Delta Ra_{\text{подр}} + \Delta Ra_{\text{ямки}} + \Delta Ra_{\text{волок}} \quad (2.34)$$

(4) Вплив відбитого пошкодження на конусність різь

Вторинний удар відбитого струменя також має значний вплив на конусність різь. Конусність різь визначається як кут між площиною зрізу та вертикальною площиною:

$$\theta = \arctan \left(\frac{W_{\text{вх}} - W_{\text{вих}}}{2H} \right) \quad (2.35)$$

де $W_{\text{вх}}$ – ширина входу різь, $W_{\text{вих}}$ – ширина виходу різь, H – товщина матеріалу.

Вплив відбитого пошкодження на конусність різь проявляється головним чином у зміні ширини виходу різь. Вторинний удар відбитого струменя по крайці виходу різь може призвести до збільшення ширини виходу, тим самим зменшуючи різницю між шириною входу та виходу, що призводить до зменшення конусності. Однак, в той же час, відбитий струмінь може також спричинити нерегулярне відшарування матеріалу на крайці виходу, впливаючи на рівномірність конусності.

Згідно з дослідженнями, за наявності відбитого пошкодження конусність різь зменшується приблизно на 0.2° – 0.5° , але стандартне відхилення конусності збільшується, що свідчить про погіршення рівномірності конусності.

Модифікована формула конусності різь з урахуванням впливу відбитого пошкодження може бути виражена як:

$$\theta_r = \theta_0 - \Delta\theta_r + \sigma_\theta \quad (2.36)$$

де θ_0 – теоретична конусність за відсутності відбитого пошкодження,

$\Delta\theta_r$ – величина зменшення конусності, спричиненого відбитим пошкодженням,

σ_θ – флуктуаційний член конусності.

2.2.3 Типові типи пошкоджень при різанні та їх суперпозиція

(1) Механізм розшарування (делмінації)

Розшарування є одним з найпоширеніших і найсерйозніших видів пошкоджень при різанні CFRP. Дослідження [85] показують, що розшарування в основному спричинене ударним тиском при входженні струменя та ефектом водяного клина в процесі проникнення струменя.

Механізм утворення розшарування можна узагальнити наступним чином: коли високошвидкісний струмінь вдаряється об поверхню CFRP, тиск гідравлічного удару створює хвилі напружень всередині матеріалу. Ці хвилі напружень відбиваються та проходять на міжшарових межах, створюючи міжшарові розтягуючі напруження. Коли міжшарові розтягуючі напруження перевищують міцність міжфазного зв'язку, відбувається розкриття межі, що призводить до розшарування [85]. Одночасно вода під високим тиском, що проникає в тріщини, створює ефект водяного клина, сприяючи подальшому поширенню тріщин.

Ступінь розшарування зазвичай характеризується коефіцієнтом розшарування F_d , який визначається як [85]:

$$F_d = \frac{A_d}{A_0} \quad (2.37)$$

де A_d – площа зони розшарування,

A_0 – номінальна площа різі.

(2) Взаємодія висмикування волокон та відбитого пошкодження

Висмикування волокон є поширеним видом пошкоджень при різанні CFRP, яке проявляється в тому, що волокна не повністю перерізаються, а висмикуються з матриці. Дослідження [85] показують, що між висмикуванням волокон та відбитим пошкодженням існує значний зв'язок.

Механізм утворення висмикування волокон включає: коли енергії струменя недостатньо, волокна зазнають згинання, а не зрізу, під дією зсувних напружень; коли зв'язок на межі волокно/матриця є слабким, відбувається пріоритетне руйнування межі, що призводить до висмикування волокон з матриці [85]. Наявність відбитого пошкодження посилює явище висмикування волокон, оскільки удар

відбитого струменя по обробленій поверхні додатково послаблює міцність зв'язку на межі волокно/матриця [84].

Ступінь висмикування волокон можна характеризувати довжиною висмикнутих волокон L_p та густиною висмикування волокон ρ_p . Вплив відбитого пошкодження на висмикування волокон можна виразити як:

$$L_p = L_{p0} + k_r \cdot E_r \quad (2.38)$$

де L_{p0} – довжина висмикнутих волокон за відсутності відбитого пошкодження,

k_r – коефіцієнт впливу відбитого пошкодження,

E_r – густина енергії відбитого струменя.

(3) Характеристики ерозії матриці

Ерозія матриці є явищем селективного видалення полімерної матриці при гідроабразивному різанні. Дослідження [85] показують, що ерозія матриці проявляється головним чином у локальному відшаруванні матриці та оголенні волокон.

Механізм утворення ерозії матриці включає: мікрорізальну дію абразивних частинок на полімерну матрицю; змивну дію води високого тиску на матрицю; а також вторинну ударну дію відбитого струменя на вже оброблену поверхню [85]. Ступінь ерозії матриці залежить від багатьох факторів, включаючи тиск струменя, розмір абразивних частинок, швидкість різання та орієнтацію волокон.

Залежність глибини ерозії матриці h_m від технологічних параметрів може бути виражена як [85]:

$$h_m = k_m \cdot P^a \cdot e^{-bv} \cdot d_p^c \quad (2.39)$$

де k_m – константа матеріалу,

a, b, c – емпіричні показники ступеня.

(4) Аналіз впровадження абразиву

Впровадження абразиву є специфічним видом пошкоджень при гідроабразивному різанні, яке проявляється у впровадженні абразивних частинок в оброблену поверхню. Дослідження [85] показують, що впровадження абразиву має значний

вплив на механічні властивості та подальші експлуатаційні характеристики матеріалу.

Механізм утворення впровадження абразиву включає: коли енергії струменя недостатньо для повного викиду абразивних частинок з різку, частина частинок під дією тиску струменя впроваджується в м'якший матеріал матриці; відбитий струмінь також може повторно вдавлювати частину абразивних частинок у вже оброблену поверхню [85].

Ступінь впровадження абразиву можна характеризувати густиною впровадження ρ_e та глибиною впровадження h_e . Дослідження показують, що впровадження абразиву в основному залежить від тиску струменя, розміру абразивних частинок та твердості матеріалу. При різанні CFRP впровадження абразиву відбувається переважно в зонах полімерної матриці, оскільки волокна мають вищу твердість, і впровадження абразиву в них є менш імовірним [85].

(5) Конкуренція та синергія різних типів пошкоджень

У реальному процесі різання CFRP різні типи пошкоджень часто існують одночасно, і між ними існують складні відносини конкуренції та синергії. Дослідження [85] показують, що між такими типами пошкоджень, як розшарування, висмикування волокон, ерозія матриці та впровадження абразиву, існують зв'язки, наведені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 - Зв'язки між різними типами пошкоджень

Тип пошкодження	Основні причини	Зв'язок з іншими пошкодженнями
Розшарування	Ударний тиск при входженні, ефект водяного клина	Послаблює міжфазний зв'язок, посилює висмикування волокон
Висмикування волокон	Недостатня енергія струменя, ослаблення межі	Призводить до втрати опори матриці, сприяє ерозії матриці
Ерозія матриці	Мікрорізання абразивом, змивання водою	Оголює волокна, роблячи їх більш схильними до висмикування
Впровадження абразиву	Недостатня енергія струменя, відбитий удар	Посилює всі типи пошкоджень

При оптимізації параметрів різання часто необхідно знаходити компроміс між різними типами пошкоджень. Наприклад, підвищення тиску струменя може

зменшити висмикування волокон, але може посилити розшарування; зменшення швидкості різання може підвищити якість поверхні, але збільшує ризик впровадження абразиву [85].

Для комплексної оцінки багатотипових пошкоджень необхідно створити багатокритеріальну систему оцінювання. У літературі [85] запропоновано використовувати метод нечіткої комплексної оцінки, зважуючи різні показники пошкоджень для отримання комплексного індексу оцінки якості різання:

$$Q = \sum_{i=1}^n w_i \cdot q_i \quad (2.40)$$

де q_i – нормоване значення i -го показника пошкодження,

w_i – відповідний ваговий коефіцієнт, причому $\sum w_i = 1$.

2.3 Моделювання процесу різання матеріалу CFRP

2.3.1 Механізм ерозії одиничною та множинними частинками

(1) Модель ерозії одиничною частинкою

Процес видалення матеріалу гідроабразивним струменем можна розглядати як сукупний результат ерозії поверхні матеріалу величезною кількістю високошвидкісних абразивних частинок. Згідно з дослідженнями Хешиша та інших, ерозію матеріалу абразивними частинками можна розділити на два основні режими [76]: **Абразивний знос при малих кутах удару:** характеризується різанням. **Деформаційний знос при великих кутах удару:** характеризується деформацією.

При малих кутах удару горизонтальна складова швидкості є більшою, абразив має сильну різальну здатність, утворюючи гладку поверхню. При великих кутах удару вертикальна складова швидкості є більшою, видалення матеріалу відбувається неповністю, утворюючи грубу штрихувату поверхню.

Для кількісної оцінки ефективності ерозії одиничною частинкою було введено поняття "числа ерозії" E_N , яке визначається як відношення маси видаленого матеріалу до загальної маси абразивних частинок, що брали участь у різанні [76]:

$$E_N = \frac{m_M}{m_P} \quad (2.41)$$

Об'єм матеріалу, який може бути видалений однією абразивною частинкою, становить:

$$V_M = \frac{E_N \cdot m_P}{\rho_M} \quad (2.42)$$

де ρ_M – густина матеріалу, що ріжеться.

Узагальнена модель об'єму різання, що враховує кут удару та співвідношення твердості, має вигляд [76]:

$$V_M = C_1 \cdot \frac{1}{2} m_P v_P^2 \cdot \frac{1}{\varepsilon_M} \cdot \left[\left(\frac{H_P}{H_M} \right)^\beta \cdot f \left(\frac{H_P}{H_M} \right) \right]^{0.99} \cdot f(\phi) \quad (2.43)$$

Це рівняння показує, що об'єм, видалений за один удар, пропорційний кінетичній енергії абразивної частинки і регулюється функцією співвідношення твердості та функцією кута удару.

Існує критична швидкість удару абразивної частинки об матеріал. Коли вертикальна складова швидкості нижча за критичне значення, відбувається лише пружна деформація. Коли вертикальна складова швидкості перевищує критичне значення, виникає пластична деформація, і матеріал видаляється [76]. Для крихких матеріалів видалення матеріалу проявляється головним чином у зародженні та поширенні тріщин, а також у крихкому руйнуванні, спричиненому ефектом водяного клина [77].

(2) Адаптація механізмів ерозії одиничним абразивом для різних матеріалів

Фізико-механічні властивості різних матеріалів суттєво відрізняються, і механізми їх ерозії мають свої особливості, що становить важливу довідкову цінність для різання CFRP [78]. Порівняння механізмів ерозії для різних типів матеріалів наведено в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 - Порівняння механізмів ерозії для різних типів матеріалів

Тип матеріалу	Механізм ерозії	Ключові фактори
Крихкі матеріали	Домінує зародження та поширення тріщин, водяний клин сприяє росту	Кінетична енергія абразиву, питома енергія

	тріщин	руйнування матеріалу
Пластичні матеріали	Домінують мікрорізання та пластична деформація, тиск гідроудару викликає пластичну деформацію	Форма абразиву, кут удару
Композити	Крихке руйнування / в'язке висмикування волокон, мікрорізання матриці, пошкодження інтерфейсу	Орієнтація волокон, міцність міжшарового зв'язку
Тверді матеріали	Домінують ударне шліфування та втомне руйнування, існує граничний поріг тиску	Твердість абразиву, форма абразиву

Висновки для різання CFRP: Вуглецеві волокна належать до крихких матеріалів, їх руйнування залежить від механізму крихкого руйнування. Полімерна матриця є пластичною, включає мікрорізання та пластичну деформацію. Межа розділу волокно/матриця є слабким місцем, тому необхідно контролювати енергію, щоб уникнути пошкоджень. Шарувата структура чутлива до міжшарових напружень, тому необхідно контролювати ударний тиск для запобігання розшаруванню [79].

(3) Формула конусності різу для інженерних пластиків та її адаптація для CFRP

Конусність різу є одним з важливих показників якості гідроабразивного різання і визначається як кут між площиною зрізу та вертикальною площиною [80]:

$$\tan \theta = \frac{W_1 - W_2}{2H} \quad (2.44)$$

де θ – кут конусності різу,

W_1 – ширина входу різу,

W_2 – ширина виходу різу,

H – товщина заготовки.

Закономірності впливу технологічних параметрів на конусність різу наведено в таблиці 2.6 [80].

Таблиця 2.6 - Закономірності впливу технологічних параметрів на конусність різу

Параметр	Закономірність впливу	Механізм
Швидкість різання	$v \uparrow \rightarrow \theta \uparrow$	Зменшується кількість ударів низькошвидкісних абразивних частинок на крайці, зменшується ефективний радіус різання
Тиск струменя	Вплив незначний	Два протилежні ефекти врівноважують один одного
Витрата абразиву	$q_a \uparrow \rightarrow \theta \downarrow$	Підвищується ефективність використання енергії, розподіл енергії по перерізу стає більш рівномірним
Відстань від сопла до зразка	$d \uparrow \rightarrow \theta \uparrow \uparrow$	Посилюється розсіювання струменя, прискорюється дисипація енергії

Враховуючи анізотропні властивості CFRP, вводяться коефіцієнт анізотропії K_a та коефіцієнт впливу міжшарової взаємодії K_l для побудови модифікованої моделі конусності [81]:

$$\tan \theta_{CFRP} = K_a \cdot K_l \cdot \frac{w_1 - w_2}{2H} \quad (2.45)$$

На основі аналізу механізму формування конусності можна запропонувати наступні стратегії контролю: Вибір нижчої швидкості різання. Вибір оптимальної відстані від сопла до зразка. Оптимізація витрати абразиву. Раціональне планування траєкторії різання, намагаючись спрямувати напрямок різання паралельно основному напрямку волокон. Застосування багатоступеневої стратегії різання: спочатку використання вищої енергії для швидкого наскрізного прорізання, а потім нижчої енергії для фінішної обробки різу [80].

2.3.2 Чисельне моделювання багатофазного потоку на основі Fluent

Процес гідроабразивного різання включає складний потік газ-рідина-тверда фаза. Методи обчислювальної гідродинаміки (CFD) надають потужний інструмент для поглибленого вивчення структури поля потоку струменя та закономірностей руху абразивних частинок.

(1) Побудова чисельної моделі

На основі програмного забезпечення Fluent було створено багатофазну чисельну модель гідроабразивного струменя. Основні параметри моделі наведено в таблиці 2.7 [82].

Таблиця 2.7 - Основні параметри чисельної моделі

Параметр	Налаштування
Модель турбулентності	Стандартна $k - \epsilon$ модель
Багатофазна модель	Модель Ейлера-Ейлера та дискретна фазова модель (DPM)
Граничні умови	Вхід за тиском, вихід - атмосферний тиск, стінки з умовою прилипання
Параметри абразиву	Абразив гранат, густина 2.6 г/см ³ , діаметр частинок 0.18 мм
Розбиття сітки	2D сітка з розміром 0.1 мм (138 200 елементів), 3D сітка з розміром 0.125 мм (314 550 елементів)

Перевірка на незалежність від сітки підтвердила, що відхилення результатів розрахунків при даному розмірі сітки становить менше 5% [82].

(2) Характеристики поля потоку та розподіл абразиву

Запропоновано конструкцію багатоступінчастого сопла, яке складається з чотирьох частин [82]. Його структура та функції наведені в таблиці 2.8.

Таблиця 2.8 - Структура та функції багатоступінчастого сопла

Ступінь	Назва	Функція
Перший	Первинна збіжна ділянка	Початкове прискорення струменя
Другий	Прямолінійна стабілізуюча ділянка	Зменшення турбулентності, підтримання стабільності поля потоку
Третій	Вторинна збіжна ділянка	Подальше прискорення потоку води, збільшення кінетичної енергії струменя
Четвертий	Вихідна прямолінійна ділянка	Досягнення максимальної швидкості потоку води, формування високоенергетичного струменя

Результати чисельного моделювання показують, що багатоступінчасте сопло має значно кращі характеристики порівняно з традиційним конічним соплом [82]. Ефективність оптимізації наведено в таблиці 2.9.

Таблиця 2.9 - Покращення характеристик багатоступінчастого сопла

Показник ефективності	Ступінь покращення
Пікова швидкість	Підвищення на 5.6%
Швидкість на відстані 20 мм від сопла	Підвищення на 28.6%
Швидкість на відстані 50 мм від сопла	Підвищення на 20%

Оптимізовані ключові геометричні параметри: Тип кривої першої збіжної ділянки: D (крива Вівіані) Співвідношення довжини до діаметру другої прямолінійної стабілізуючої ділянки: 1.5 Кут третьої вторинної збіжної ділянки: 8.54° Співвідношення довжини до діаметру четвертої вихідної прямолінійної ділянки: 5

Закономірності розподілу абразивних частинок: При співвідношенні довжини до діаметру другої прямолінійної стабілізуючої ділянки 1.5, абразивні частинки мають найкращу агрегацію та осьову швидкість. При меншому куті третьої вторинної збіжної ділянки, абразивні частинки більш сконцентровані біля осі сопла, а їх концентрація вища [82].

(3) Верифікація моделі прогнозування глибини різання

На основі чисельного моделювання та експериментальних досліджень було створено модель прогнозування глибини різання. Експериментальна верифікація підтвердила високу точність прогнозування моделі [83]. Результати верифікації наведено в таблиці 2.10.

Таблиця 2.10 - Результати верифікації моделі прогнозування глибини різання

Модель	Середня відносна похибка	Верифікаційний матеріал
Модель глибини різання для мікрокристалічних композитів	0.96%–4.21%	Мікрокристалічний композит
Модель глибини різання для полікристалічного кремнію	3.85%	Полікристалічний кремній

Експериментальна верифікація підтвердила, що оптимізоване багатоступінчасте сопло значно підвищує якість різання [82]. Покращення показників якості наведено в таблиці 2.11.

Таблиця 2.11 - Покращення якості різання при використанні агатоступінчастого сопла

Показник якості	Ступінь покращення
Конусність перерізу	Зменшення на 74.2%
Відстань запізнювання	Зменшення на 41.6%
Залишкова площа різання	Зменшення на 70.2%

2.3.3 Зв'язок між дисипацією енергії та глибиною різання

(1) Формула зв'язку

У роботі [88] помітили, що коефіцієнт дисипації енергії χ і безрозмірна глибина $H = h/h_{\max}$ пов'язані досить просто – як статична функція:

$$\chi(H) = H^\alpha \quad (2.46)$$

Показник α залежить від того, як ми ріжемо. Якщо $\alpha < 1$ (наприклад, при повільному різанні 50 мм/хв $\alpha \approx 0.65$), то енергія на початку витрачається швидко, а потім повільніше. Якщо $\alpha > 1$ (при швидкому різанні 800 мм/хв $\alpha \approx 1.35$), то навпаки – спочатку енергія "економиться", а під кінець вистрілює.

(2) Висновки з моделі енергетичного порогу для прогнозування глибини різання

Згадаймо закон збереження енергії. На глибині h у струменя залишається енергії:

$$E_{\text{зал}}(h) = E_{\text{вх}} - \int_0^h \frac{dE}{dz} dz \quad (2.47)$$

Коли залишкової енергії стає менше, ніж треба, щоб зруйнувати матеріал (критичний поріг $E_{\text{пор}}$), різання зупиняється. Тому максимальна глибина $h_{\max}$ – це така, при якій:

$$E_{\text{вх}} - \int_0^{h_{\max}} \frac{dE}{dz} dz = E_{\text{пор}} \quad (2.48)$$

Для нашої плити завтовшки 3 мм умова "якраз наскрізь" – це $h_{\max} = 3$ мм. Підставляючи це в (2.45), отримуємо співвідношення, яке пов'язує те, скільки енергії ми ввігнали в деталь, з тим, скільки її витратилося в процесі:

$$E_{\text{вх}} = E_{\text{пор}} + \int_0^3 \frac{dE}{dz} dz \quad (2.49)$$

Це надзвичайно важлива формула, яка стане основою для подальшого визначення оптимальних технологічних параметрів, що дозволить забезпечити необхідний рівень енергії – точно достатній, без надлишку чи недостатчі.

(3) Теоретичне підґрунтя для оптимізації технологічних параметрів

Усе, що ми тут нарахували, стане основою для пошуку оптимальних режимів. Ось кілька прикладів:

Швидкість подачі. Ми з'ясували, що чим менша швидкість, тим більше енергії встигає вбитися в матеріал на початку (див. рис. 2.1). Саме тому в рівняннях швидкість стоятиме в знаменнику – чим вона менша, тим глибше ріжемо.

Тиск. Тиск має бути трохи вищим за поріг руйнування матеріалу (приблизно 285 МПа для нашого випадку). Нижче – не проріже, вище – буде зайва енергія і додаткові пошкодження (див. рис. 2.2).

Відстань до сопла. Є оптимальна відстань (приблизно 3.2 мм), при якій енергія витрачається найефективніше (див. рис. 2.3). Менше – абразив не розженеш, більше – струмінь розсіється.

Внутрішні пошкодження. Розшарування, висмикування волокон, ерозія матриці та впровадження абразиву є кількісно вимірюваними параметрами пошкодження. При оптимізації встановлено наступні обмеження: шорсткість поверхні не більше 3.8 мкм, конусність різку не більше 0.3°.

2.3.4 Аналіз обмежень традиційних способів підтримки

У звичайному гідроабразивному різанні заготовку зазвичай кладуть просто на стіл верстата. Існує кілька типових варіантів:

Опори-ножі – набір вертикальних пластин (завтовшки 1.5–2.5 мм), які підтримують деталь лише в окремих точках. Плюси: простота, легка заміна. Мінуси: мало точок опори, деталь може прогинатися, а головне – струмінь б'є прямо в ножі, породжуючи потужний відбитий потік.

Сітчасті опори – струмінь частково провалюється крізь комірки, що трохи зменшує відбиття. Але ребра сітки все одно відбивають струмінь, до того ж у місцях контакту можуть залишатися вм'ятини на нижній поверхні деталі.

Опори з пазами – у плиті нарізають канавки точно під траєкторію різку, щоб струмінь ішов у порожнечу. Звучить добре, але на практиці точно співставити різ із пазом майже неможливо, тож ефект виявляється сумнівним.

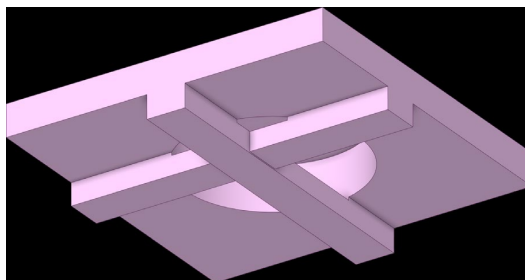


Рисунок 2.6 - Схематичне зображення традиційної опори

Усі ці конструкції мають спільні проблеми, які зведено в таблиці 2.12.

Таблиця 2.12 - Основні недоліки традиційних опор

Тип дефекту	Характер прояву	Наслідки впливу
Відбитий струмінь некерований	Летить куди попало, енергія розпорошується	Великі ділянки вторинних пошкоджень
Сильно бризкає	Розлітається вгору на 50+ мм і вшир на 100+ мм	Брудна деталь і довкола
Не адаптується	Жорстка статика	Не підлаштовується під різні режими різання
Калічить тильний бік	Викрашування, подряпини	Нижня поверхня вже не така гарна

2.3.5 Принцип проектування направляючої опори для захисту від відбитого струменя

Щоб позбутися цих вад, ми запропонували принципово інший підхід – не пасивно терпіти відбитий струмінь, а активно його відводити, використовуючи оптимізовану геометрію та закони гідродинаміки. Назвемо це "направляюча опора з ежекцією".

Конструкція має три функціональні частини (див. рис. 2.7а):

Верхня зона — чашоподібна поверхня. Це увігнута поверхня, на яку потрапляє залишковий струмінь після прорізання. Завдяки кривизні забезпечується пристінне течія рідини тонкою плівкою, що запобігає розбризкуванню. Кільцеві дренажні отвори по краях чаші призначені для відведення надлишкової рідини, що унеможливорює її накопичення та виникнення нестабільності потоку.

Середина – буферна камера. Сюди потрапляє рідина з чаші. Тут вона трохи заспокоюється, втрачає частину енергії. Ця камера також готує потік до наступного етапу.

Нижня частина – ежектор Вентурі. Це звуження (горловина) і подальше розширення. Сюди збоку вдувають стиснене повітря (тиск 1.6 МПа). У горловині повітря інтенсивно прискорюється, і тиск там різко падає (утворюється розрідження аж до -0.15 МПа). Це розрідження, створюючи ефект всмоктування, засмоктує рідину з камери вниз, подрібнює її на краплі й викидає геть назовні через розширювальну частину.

Таблиця 2.13 - Призначення функціональних зон направляючої опори

Зона	Форма	Головне завдання
Верх	Чаша + отвори по краях	Змусити струмінь текти по стінці, не дати йому розлітатися в сторони
Середина	Т-подібна порожнина	Розсіяти енергію, підготувати потік до ежекції
Низ	Звуження-розширення (Вентурі)	Створити зону розрідження, всмоктати рідину й викинути її геть

рис. 2.7б показує внутрішню будову чаші – видно отвори та вигнуту поверхню.

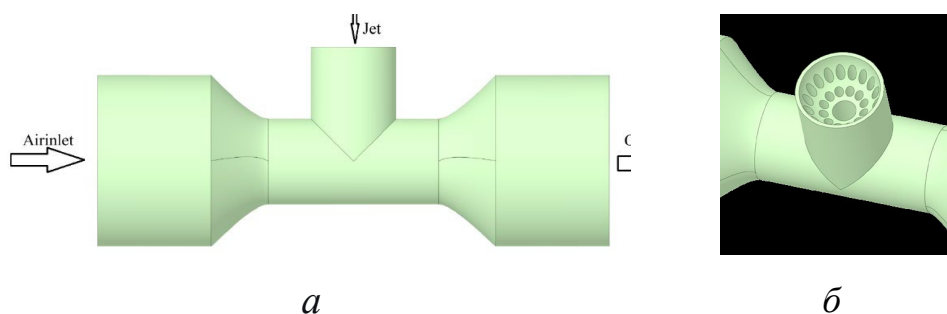


Рисунок 2.7 - Направляюча опорна конструкція для захисту від відбитого струменя: (а) загальна структура та функціональні зони, (б) внутрішні деталі чашоподібної структури

Принцип роботи

Процес роботи можна описати трьома етапами

Крок 1 – Присмоктування. Струмінь, пробивши деталь, влітає в чашу. Вигнута стінка не дає йому відскочити, а змушує розтікатися по ній тонким шаром. Отвори по краях не дають плівці стати занадто товстою й нестійкою.

Крок 2 – Відведення. У горловині Вентурі створюється потужне розрідження. Воно "втягує" рідину з буферної камери вниз, утворюючи спрямований потік. Завдяки цьому *краплі не розлітаються вгору, а летять куди треба.*

Крок 3 – Дисипація енергії. У високошвидкісному потоці повітря відбувається інтенсивне дроблення крапель рідини, що супроводжується втратою залишкової кінетичної енергії. Дрібнодисперсна суміш викидається через дифузор і збирається в окремій системі.

Важливі геометричні розміри

Радіус чаші R_b – визначає, наскільки стабільно тектиме плівка. Зазвичай робимо 30–50 мм.

Діаметр отворів d_a – має бути більшим за найбільші абразивні частинки (0.5–1.0 мм), щоб не забивалися.

Ширина горловини w_t – впливає на силу всмоктування. Оптимально – (3–5мм) .

Кут розширення α_d – важливий для плавного виходу суміші. Беремо 8° – 12° .

Перевірка міцності конструкції

Зробили опору з нержавійки 304 – міцна, не іржавіє, легко обробляється. Порахували навантаження: на 1 м² аркуша CFRP товщиною 3 мм припадає близько 25 точок опори, кожна тримає приблизно 2.53 Н. Для надійності взяли навантаження зі 100-кратним запасом – 253 Н – і прогнали через комп'ютерне моделювання. Результат (рис. 2.8) позитивним є те, що:

Найбільше напруження (8.08 МПа) – у районі горловини, але це в 26 разів менше за межу міцності сталі.

Деформація – мізерна, переміщення менше 5 мкм, на потік це не впливає.

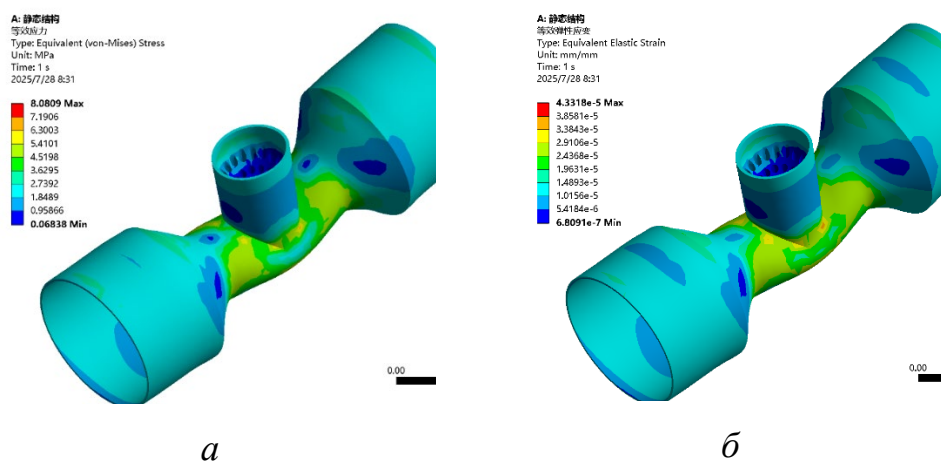


Рисунок 2.8 - Що показав розрахунок на міцність:

(а) напруження,

(б) деформація

Для підтвердження ефективності запропонованої опорної конструкції, у цьому підрозділі за допомогою чисельного моделювання розкрито механізм її впливу на потік (див. розділ 3.1), а в розділі 3.2 її ефективність буде додатково підтверджено експериментальним шляхом.

2.4 Розрахунок

2.4.1 Експериментальний дизайн та оцінка якості

Для експериментів використано той самий матеріал (вуглепластик Т300/епоксидна смола, товщиною 3 мм). Параметри, які змінювали, і рівні, на яких це робили, – у таблиці 2.14.

Таблиця 2.14 - Фактори, рівні та їх зміни в експерименті

Рівень	Тиск P , МПа	Швидкість подачі v , мм/хв	Відстань L , мм	Витрата абразиву Q , г/хв
1	240	63.5	3	454
2	280	101.6	4	499
3	320	177.8	5	545

Для скорочення кількості дослідів застосовано метод ортогонального планування $L_9(3^4)$. Це означає, що було зроблено всього 9 дослідів, але вони так підібрані, що можна оцінити вплив кожного параметра окремо. Кожний експеримент проводили триразово, за результат приймали середнє арифметичне значення. Оцінювали три показники:

Глибину різання h (мм) – чи прорізали взагалі.

Шорсткість поверхні Ra (мкм) – наскільки гладко.

Конусність різку θ (градуси) – наскільки різ рівний.

Результати – у таблиці 2.15.

Таблиця 2.15 - Результати ортогонального експерименту

№	P	v	L	Q	h , мм	Ra , мкм	θ , °
1	240	63.5	3	454	19.27	3.82	0.28
2	240	101.6	4	499	16.85	4.35	0.32
3	240	177.8	5	545	11.24	5.67	0.41
4	280	63.5	4	545	18.32	4.08	0.30
5	280	101.6	5	454	15.30	4.72	0.35
6	280	177.8	3	499	13.50	5.21	0.38
7	320	63.5	5	499	16.53	4.43	0.33
8	320	101.6	3	545	19.23	3.91	0.29

9	320	177.8	4	454	14.93	4.98	0.36
---	-----	-------	---	-----	-------	------	------

2.4.2 Точний розрахунок геометричних параметрів різь

(1) Метод розрахунку глибини різання

Глибина різання є базовим параметром для оцінки різальної здатності. Для наскрізного різання глибина дорівнює товщині матеріалу. Для ненаскрізного різання глибину необхідно вимірювати. У цій роботі для вимірювання глибини різання використовувався метод оптичного профілювання: зразок розрізається вздовж напрямку різання, на фотографії поверхні різь виконується калібрування масштабу, після чого вимірюється вертикальна відстань від необробленої поверхні до найнижчої точки різь. Вимірювання виконуються в трьох положеннях, за результат приймається середнє значення [91].

Метод розрахунку глибини різання наведено нижче:

$$h = \max(z_{\text{верх}}) - \min(z_{\text{низ}}) \quad (2.50)$$

де $z_{\text{верх}}$ – висота верхньої частини різь (непорізана поверхня),

$z_{\text{низ}}$ – висота дна різь.

Для різання CFRP, через наявність задирок та ґрату на поверхні матеріалу, необхідно коригувати верхню опорну площину. Зазвичай як опорну площину використовують висоту поверхні непорізаних ділянок або отримують опорну площину шляхом апроксимації непорізаної поверхні з обох боків різь [91].

(2) Метод розрахунку конусності різь

Конусність різь є важливим показником геометричної точності різь. Конусність різь визначається як кут між бічною стінкою різь та вертикальною лінією і може бути розрахована за шириною входу та виходу [90]:

$$\theta = \arctan \left(\frac{W_{\text{вх}} - W_{\text{вих}}}{2H} \right) \quad (2.51)$$

де $W_{\text{вх}}$ – ширина входу різь,

$W_{\text{вих}}$ – ширина виходу різь,

H – товщина матеріалу.

Ця формула повністю узгоджується з визначенням конусності, наведеним у другому та третьому розділах, що забезпечує єдність оціночних показників у всій роботі.

Для визначення ширини входу та виходу необхідно виділити їх з даних профілю. Зазвичай використовують пороговий метод для визначення межі різь: область, де значення висоти менше певного порогу (наприклад, 10% від товщини матеріалу), вважають зоною різь, а положення меж по обидва боки цієї зони визначають ширину різь [89].

Для матеріалу CFRP, через такі пошкодження, як висмикування волокон та розшарування, межа різь може бути нерегулярною. У цьому випадку необхідно використовувати статистичні методи для визначення ефективної ширини, наприклад, брати середнє значення ширини з кількох перерізів або використовувати методи апроксимації для визначення положення межі [91].

(3) Метод розрахунку шорсткості

Шорсткість поверхні є базовим параметром для оцінки якості поверхні. Відповідно до стандарту ISO 4287, стандартна довжина оцінювання l_n для параметрів шорсткості складається щонайменше з 5 відрізків вимірювання l_r . Шорсткість поверхні Ra визначається як середнє арифметичне відхилення профілю від середньої лінії [90]:

$$Ra = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |h(x)| dx = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_i - \bar{z}| \quad (2.52)$$

де z_i – висота i -ї точки профілю,

$\bar{z}$ – середня висота профілю.

Крім Ra , часто використовуються такі параметри шорсткості:

Середньоквадратичне відхилення профілю Rq [90]:

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2} \quad (2.53)$$

Максимальна висота піку профілю R_p : висота найвищої точки профілю відносно середньої лінії. **Максимальна глибина западини профілю R_v :** глибина найнижчої точки профілю відносно середньої лінії. **Максимальна висота профілю R_z :** різниця між найвищою та найнижчою точками профілю.

Найбільша складність при отриманні значень шорсткості полягає у визначенні базової лінії. Загалом, за допомогою фільтрації сигнал профілю можна розкласти на довгохвильову та короткохвильову складові, використовуючи контур довгохвильового сигналу як базову лінію, а потім отримати значення шорсткості [91].

(4) Гаусівська фільтрація та отримання базової лінії

Відповідно до визначення ISO/TS 16610 part 20, фільтри, які розкладають сигнал профілю на довгохвильову та короткохвильову складові, називаються лінійними профільними фільтрами. Лінійний профільний фільтр визначається як [91]:

$$y(x) = \int K(x, \xi) z(\xi) d\xi \quad (2.54)$$

де $z(\xi)$ – невідфільтрований вихідний профіль,

$y(x)$ – відфільтрований базовий профіль,

$K(x, \xi)$ – вагова функція фільтра, яка є симетричною та не змінюється з простором. Якщо $K(x, \xi) = K(x - \xi)$, то процес фільтрації еквівалентний операції згортки.

У цій роботі для отримання базової лінії використовувався гаусівський фільтр. Замкнений гаусівський фільтр з нульовим середнім та гаусівською функцією розподілу має вигляд [91]:

$$h(x) = \frac{1}{\alpha \lambda_c} \exp \left[-\pi \left(\frac{x}{\alpha \lambda_c} \right)^2 \right] \quad (2.55)$$

Відповідно до стандарту ISO 11562, вагова функція стандартного гаусівського фільтра має вигляд:

$$h(x) = \frac{1}{\alpha \lambda_c} \exp \left[-\pi \left(\frac{x}{\alpha \lambda_c} \right)^2 \right] \quad (2.56)$$

де x – відстань від центру вагової функції Гауса,

λ_c – гранична довжина хвилі фільтра.

Коли $x = \lambda_c/2$, значення передачі гаусівського фільтра становить 50%, тоді $\alpha = \sqrt{\ln 2/\pi} \approx 0.4697$.

$H(\lambda)$ гаусівського фільтра після перетворення Фур'є має вигляд [91]:

$$H(\lambda) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} h(x) e^{-j\alpha x} dx = \exp \left[-\pi \left(\frac{\alpha \lambda_c}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (2.57)$$

Відповідно до стандарту ISO/TS12181-2, при обробці сигналу, якщо значення передачі довжини хвилі в гаусівському фільтрі нижче 0.02% від кривої передачі фільтра, то вплив цієї довжини хвилі на кінцевий результат можна не враховувати. Характеристика передачі гаусівського фільтра:

$$\frac{a_1}{a_0} = \exp \left[-\pi \left(\frac{\alpha \lambda_c}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (2.58)$$

(5) Попередня Гаусівська фільтрація з В-сплайнами

Для отримання більш точної базової лінії в цій роботі використовувався метод попередньої гаусівської фільтрації з В-сплайнами. На рис. 2.9 порівнюється ефект прямої гаусівської фільтрації та попередньої гаусівської фільтрації з В-сплайнами.

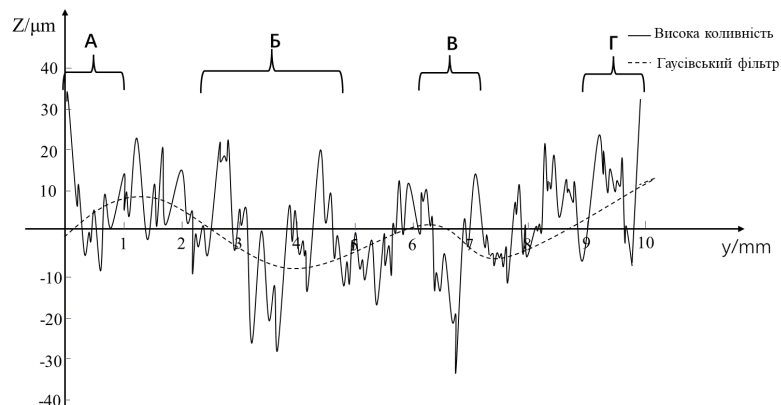


Рисунок 2.9 - Порівняння методів фільтрації для отримання базової лінії

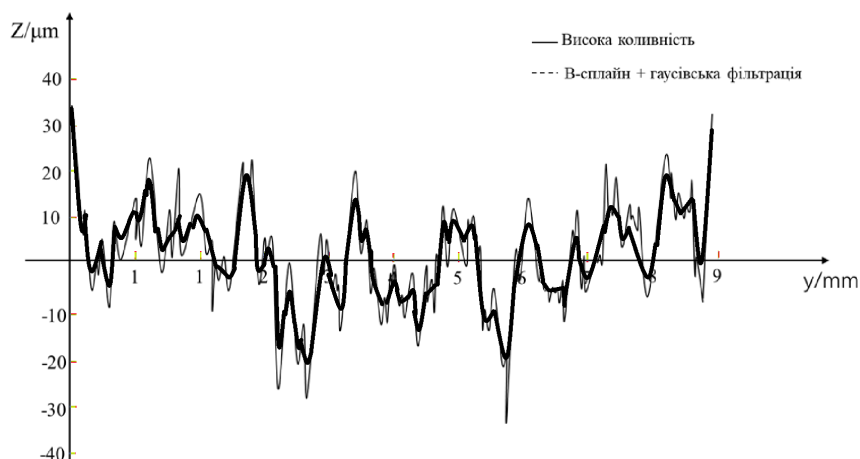


Рисунок 2.10 - Відхилення висоти поверхні різку та базова лінія, отримана методом попередньої гаусівської фільтрації з В-сплайнами

З рисунка добре видно, що базова лінія, отримана методом попередньої фільтрації з В-сплайнами, значно точніше повторює вихідну криву поверхні різку. Натомість базова лінія, отримана прямим гаусівським фільтруванням, у точках А, Б, В, Г на рис. 2.9 демонструє значні відхилення, лише грубо повторюючи загальний тренд коливань кривої, і не може достовірно відобразити хвилястість поверхні різку [91].

Віднімаючи від вихідних даних поверхні різку базову лінію, отриману методом попередньої гаусівської фільтрації з В-сплайнами, отримуємо криву відносних відхилень висоти (Δz), показану на рис. 2.10. Видно, що на всьому поперечному перерізі коливання відносних відхилень є досить рівномірними, дисперсія становить $\sigma^2 = 14.31$, а максимальне відхилення $|\Delta z|_{\max} = 13.96$ мкм [91].

Для різних порядків В-сплайнів при попередній обробці дискретних даних було отримано подібні результати. З огляду на простоту обчислень, у цій роботі для попередньої фільтрації дискретних даних було обрано кубічні В-сплайни.

2.4.3 Обладнання для спостереження

(1) Обладнання для вимірювання

Для вимірювання використовувалося наступне обладнання:

Цифровий фотоапарат – для фотографування загального вигляду поверхні різь з метою визначення глибини різання та ширини різь.

Портативний оптичний мікроскоп (200–500× з регульованим збільшенням) – для фотографування мікроструктури поверхні з метою визначення шорсткості та мікропошкоджень.

Верстат для електроерозійного вирізання (проволочний ерозійний верстат) – для підготовки зразків шляхом поздовжнього розрізання вздовж напрямку різання з метою отримання повного профілю поверхні різь.

(2) Підготовка зразків

Зразки CFRP після різання розрізаються вздовж напрямку різання для отримання повного профілю поверхні різь. Для забезпечення рівномірності поверхні розрізу та точності вимірювань використовується проволочний ерозійний верстат. Товщина отриманих зразків становить приблизно 3–5 мм, що дозволяє чітко спостерігати повний профіль поверхні різь від входу до виходу струменя.

(3) Вимірювання глибини різання та ширини різь

Підготовлений зразок розміщується горизонтально на рівній поверхні. Поруч із зразком розташовується стандартна масштабна лінійка для калібрування. Фотографування виконується цифровим фотоапаратом таким чином, щоб оптична вісь камери була перпендикулярною до поверхні зразка, що дозволяє уникнути перспективних спотворень.

Отримане зображення імпортується в програмне забезпечення для обробки зображень. На першому етапі виконується калібрування масштабу з використанням зображення масштабної лінійки. Вимірюються наступні геометричні параметри:

Глибина різання – вертикальна відстань від необробленої поверхні до найнижчої точки різь.

Ширина входу – горизонтальна ширина різь на вхідній поверхні.

Ширина виходу – горизонтальна ширина різь на вихідній поверхні.

Для кожного зразка вимірювання виконуються в трьох положеннях: у середній частині різку та по обидва боки від неї. За результат вимірювання приймається середнє арифметичне значення. Конусність різку розраховується за формулою (2.41).

(4) Вимірювання шорсткості поверхні

Шорсткість поверхні визначається методом оптичного профілювання. Цей метод не потребує складного обладнання, є простим у виконанні та широко застосовується для оцінки якості різання композиційних матеріалів. Його точність є достатньою для вирішення завдань даного дослідження.

На поверхні різку вибираються три ділянки – верхня, середня та нижня. Кожна ділянка фотографується за допомогою портативного оптичного мікроскопа зі збільшенням 300–500 крат. Фотографування виконується таким чином, щоб контур поверхні різку був чітко видимим.

Отримані зображення імпортуються в програмне забезпечення для обробки зображень. На першому етапі виконується калібрування масштабу з використанням зображення масштабної лінійки. Вздовж контуру поверхні з рівномірним кроком вибирається 30–50 точок вимірювання, для кожної точки фіксується відхилення висоти відносно середньої лінії. Шорсткість поверхні R_a розраховується за формулою (2.49).

Для кожного зразка визначаються значення R_a для трьох ділянок, за результат вимірювання приймається їх середнє арифметичне значення.

(5) Спостереження мікропошкоджень

На тих самих мікроскопічних зображеннях спостерігаються наступні мікропошкодження:

Довжина висмикнутих волокон – довжина волокон, які були висмикнуті з матриці.

Глибина ерозії матриці – глибина заглиблень, утворених внаслідок ерозії полімерної матриці.

Впровадження абразиву – кількість та розподіл абразивних частинок, впроваджених у поверхню.

Типові розміри пошкоджень вимірюються за допомогою програмного забезпечення для обробки зображень. Для кожного зразка вимірювання виконуються в трьох різних положеннях, за результат приймається середнє значення.

(6) Контроль точності вимірювань

Для забезпечення достовірності результатів вимірювань вживаються наступні заходи контролю точності:

Для кожного зразка всі показники визначаються як середнє арифметичне трьох вимірювань.

Перед кожним вимірюванням виконується повторне калібрування масштабу.

Фотографування виконується таким чином, щоб оптична вісь камери була перпендикулярною до вимірюваної поверхні.

Збільшення мікроскопа обирається відповідно до розмірів досліджуваних елементів; для вимірювання шорсткості використовується збільшення 300–500×

2.4.4 Реконструкція та інтерполяція контуру різь

(1) Метод інтерполяції та апроксимації В-сплайнами

Через дискретність виміряних точок необхідно реконструювати профіль різь, щоб отримати неперервну контурну криву. У цій роботі для апроксимації профілю різь використовувався метод інтерполяції В-сплайнами, що дозволяє отримати гладку неперервну криву.

Для заданого набору одновимірних дискретних даних $Q_0, Q_1, \dots, Q_m$ крива апроксимації поліномом p -го порядку має вигляд:

$$C(u) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) P_i, u \in [0,1] \quad (2.59)$$

з умовами:

$$Q_0 = C(0), Q_m = C(1) \quad (2.60)$$

$$n = m - p - 1 \quad (2.61)$$

де P_i – контрольні точки апроксимованої кривої, отримані за допомогою В-сплайнів;

$N_{i,p}(u)$ – базисні функції p -го порядку, визначені на неперіодичному нерівномірному векторі вузлів U ; кількість контрольних точок дорівнює $n + 1$, а кількість вузлів – $m + 1$.

Вектор вузлів U має вигляд:

$$U = \{a, \dots, a, \underset{p+1}{u_{p+1}}, \dots, u_{m-p-1}, b, \dots, b\} \quad (2.62)$$

де a і b зазвичай призначаються залежно від ситуації, найчастіше $a = 0, b = 1$.

Щоб усунути вплив кінцевих відсічень та врахувати особливості початку і кінця, потрібно додати $p + 1$ точку з обох кінців початкового масиву даних.

Значення $N_{i,p}(u)$ можна отримати за рекурентною формулою Кокса-де Бура:

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1, & u_i \leq u < u_{i+1} \\ 0, & \text{інакше} \end{cases} \quad (2.63)$$

$$N_{i,p}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+p} - u_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+p+1} - u}{u_{i+p+1} - u_{i+1}} N_{i+1,p-1}(u) \quad (2.64)$$

Контрольні точки P_i можна знайти методом найменших квадратів. Крива, отримана В-сплайн аналізом, не обов'язково проходить через кожну точку вхідних даних Q_k , але обов'язково проходить через початок і кінець. Введемо:

$$R_k = Q_k - N_{0,p}(\bar{u}_k)Q_0 - N_{n,p}(\bar{u}_k)Q_m, k = 1, \dots, m - 1 \quad (2.65)$$

Дисперсія f між апроксимованою кривою та реальними даними становить:

$$f = \sum_{k=1}^{m-1} (Q_k - C(\bar{u}_k))^2 \quad (2.66)$$

Підставляючи вирази, отримуємо:

$$f = \sum_{k=1}^{m-1} \left(R_k - \sum_{i=1}^{n-1} N_{i,p}(\bar{u}_k)P_i \right)^2 \quad (2.67)$$

Застосовуючи метод найменших квадратів, прирівнюємо перші частинні похідні рівняння f за змінними P_i до нуля, отримуючи $n - 1$ лінійних рівнянь з $n - 1$ невідомими P_i . Розв'язавши цю систему, отримуємо контрольні точки P_i .

(2) Оцінка точності апроксимації

Для оцінки точності В-сплайн апроксимації використовуються середньоквадратичне відхилення (RMSE) та коефіцієнт детермінації (R^2).

Середньоквадратичне відхилення визначається як [91]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_i - \hat{z}_i)^2} \quad (2.68)$$

де z_i – висота вихідної вимірної точки,

$\hat{z}_i$ – висота відповідної точки на апроксимованій кривій.

Коефіцієнт детермінації визначається як [91]:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (z_i - \hat{z}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2} \quad (2.69)$$

де $\bar{z}$ – середнє значення висоти вимірних точок.

Чим ближче R^2 до 1, тим краща апроксимація.

Для В-сплайн апроксимації профілю різь CFRP, шляхом оптимізації кількості контрольних точок та розподілу вузлів, можна досягти $RMSE < 0.5$ мкм та $R^2 > 0.99$, що відповідає вимогам високоточного аналізу.

2.4.5 Частотний аналіз характеристик морфології поверхні

Перетворення сигналу профілю в частотну область

Частотний аналіз морфології поверхні дозволяє виявити амплітудні характеристики різних частотних складових, що відкриває нові перспективи для розуміння механізму формування рельєфу. У цій роботі як основа для спектрального аналізу поверхні різь вуглепластику використовується одновимірний амплітудний спектр [91]. Цей метод аналізу узгоджується з хвильовими характеристиками поля швидкості струменя, розподілом енергії відбитого струменя закономірностями

поширення хвиль напружень— різні частотні складові відповідають різним фізичним джерелам.

Для дискретного сигналу профілю $z(n)$ дискретне перетворення Фур'є (DFT) визначається як:

$$Z(k) = \sum_{n=0}^{N-1} z(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}, k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2.70)$$

де N — довжина сигналу,

k — частотний індекс, відповідна частота

$f_k = k \cdot \Delta f$, $\Delta f = \frac{1}{N \cdot \Delta x}$ — частотна роздільна здатність,

Δx — крок дискретизації.

Спектральна густина потужності (PSD) є важливим інструментом частотного аналізу і визначається як:

$$P(k) = \frac{1}{N} |Z(k)|^2 \quad (2.71)$$

Спектральна густина потужності відображає внесок потужності різних частотних складових і дозволяє виявити домінантні частотні характеристики морфології поверхні. Для зручності аналізу спектральну густину потужності зазвичай подають як функцію просторової частоти f_s (одиниця: мм^{-1}), яка пов'язана з довжиною хвилі λ (одиниця: мм) співвідношенням $f_s = 1/\lambda$.

На рис. 2.15 показано типовий розподіл амплітудного спектра поверхні різку.

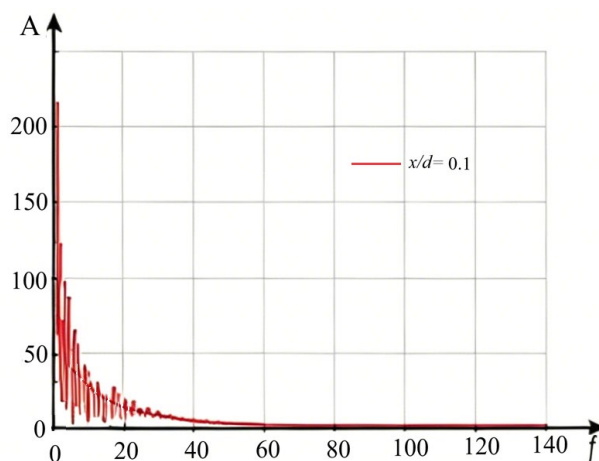


Рисунок 2.15 - Типовий розподіл амплітудного спектра поверхні різу

Як видно з графіка, основна частина амплітудного спектра зосереджена у вузькому діапазоні частот $0 < f < 10 \text{ мм}^{-1}$. У діапазоні $10 < f < 40 \text{ мм}^{-1}$ також спостерігається відносно зосереджене, але значно нижче за амплітудою, розподілення.

Низькі частоти ($0\text{--}10 \text{ мм}^{-1}$) спричинені коливаннями самої різальної системи і пов'язані з флуктуаціями швидкості струменя, про які йшлося в розділі 2.

Відносно високі частоти ($10\text{--}40 \text{ мм}^{-1}$) є наслідком осциляцій струменя в напрямку, перпендикулярному до різання, і пов'язані зі збуреннями від відбитого струменя, що обговорювалося.

Частоти понад 50 мм^{-1} відображають мікроскопічну нерівність, утворену в результаті взаємодії абразивних частинок із зразком, і пов'язані з механізмом ерозії одиничною частинкою, розглянутим у розділі 2 [91].

(1) Розподіл енергетичного спектру вздовж глибини різання

Відповідно до положень поперечних перерізів, вибраних на рис. 3.1, можна отримати розподіл енергетичного спектра на різних ділянках глибини різання, як показано на рис. 2.16.

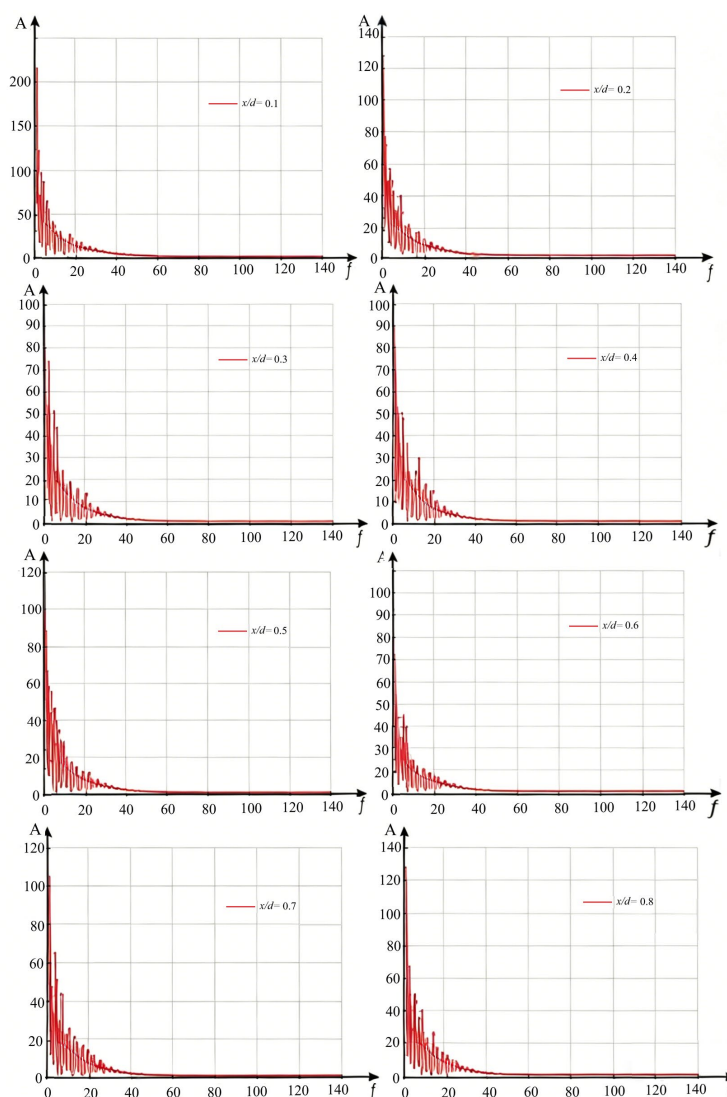


Рисунок 2.16 - Розподіл енергетичного спектра на різній глибині різання

З рисунка видно, що розподіл амплітудних спектрів у різних місцях демонструє значну подібність. Коли частота $f > 40 \text{ мм}^{-1}$, амплітуди відповідних частот близькі до нуля. Основна частина амплітудного спектра зосереджена у вузькому діапазоні $0 < f < 10 \text{ мм}^{-1}$. У діапазоні $10 < f < 40 \text{ мм}^{-1}$ розподіл спектра також відносно зосереджений, але амплітуда помітно нижча порівняно з діапазоном $0\text{--}10 \text{ мм}^{-1}$ і демонструє тенденцію до рівномірного спаду.

Це свідчить про те, що мікроструктура, утворена в результаті дії абразивних частинок на зразок, не є основним компонентом морфології поверхні. Натомість, основними факторами, що впливають на морфологію поверхні різку вуглепластику, є вібрація різальної системи та коливання струменя в напрямку, перпендикуляр-

ному до його осі. Цей висновок узгоджується з описом характеристик розподілу енергії в аналізі дисипації енергії.

(2) Вплив технологічних параметрів на амплітудний спектр

Було систематично досліджено вплив різних технологічних параметрів на розподіл амплітудного спектра. Для характеристики розподілу амплітудного спектра по всій поверхні різку використовували спектр поперечного перерізу при $x/d = 0.5$. Як критичне значення для виділення основного компонента було взято амплітуду $A_t = 100$ мкм, а як критичне значення для виділення другорядного компонента – $A_c = 10$ мкм.

На рис. 2.17 показано розподіл амплітудного спектра при різних швидкостях різання.

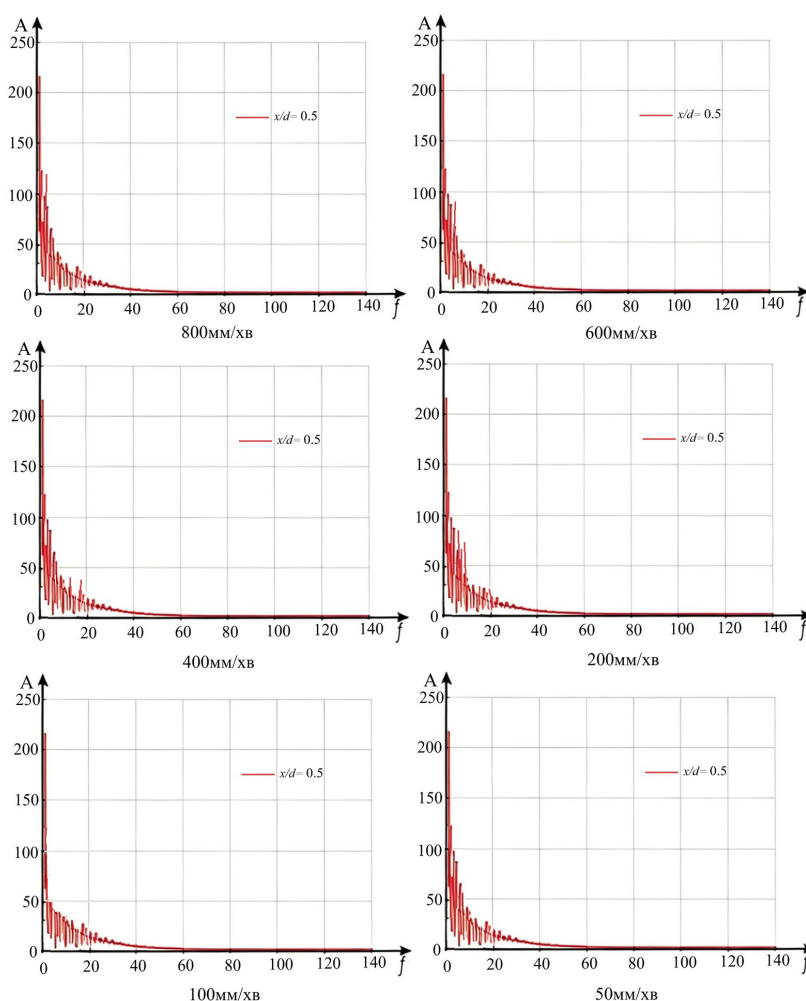


Рисунок 2.17 - Вплив швидкості різання на розподіл амплітудного спектра

З рисунка видно, що довжина інтервалу основного компонента в цілому збільшується зі зростанням швидкості різання, однак при $v = 200$ та 600 мм/хв спостерігаються локальні мінімуми. Режим різання зі швидкістю $v = 600$ мм/хв, ймовірно, спричиняє вібрації системи, частота яких наближається до власної частоти системи, що призводить до резонансу. Це викликає збільшення амплітуди на відповідній частоті та, як наслідок, зменшення інтервалу основного компонента. Це явище узгоджується із закономірностями зміни коефіцієнта дисипації енергії залежно від швидкості подачі, розглянутими в розділі 2 (рис. 2.1).

На рис. 2.18 показано розподіл амплітудного спектра при різних масовій витраті абразиву.

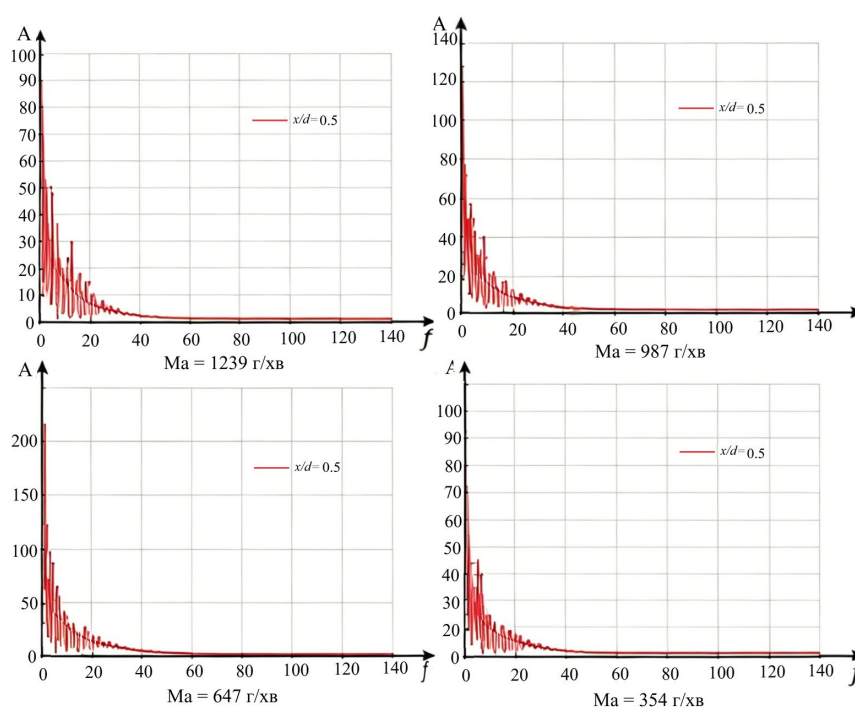


Рисунок 2.18 - Вплив масової витрати абразиву на амплітудний спектр

При низькій масовій витраті абразиву ($m_a = 354$ г/хв) у широкому діапазоні частот ($0 \sim 17$ мм⁻¹) амплітудні значення залишаються відносно високими. Це пояснюється тим, що при малій витраті абразиву для руйнування того самого об'єму матеріалу потрібно більше часу, а час контакту частинок з матеріалом відносно

подовжується, що призводить до збільшення деформацій поверхні і проявляється у вигляді підвищення амплітуди на вищих частотах [91]. Це узгоджується з висновками аналізу поведінки руйнування абразиву в підрозділі

2.4.6 щодо впливу витрати абразиву на розподіл енергії.

Прогнозування амплітудного спектра при оптимальних параметрах

На основі оптимальних технологічних параметрів, отриманих у розділі 3, та з урахуванням закономірностей впливу параметрів на амплітудний спектр з літератури [91], можна спрогнозувати характеристики амплітудного спектра при оптимальних параметрах:

Довжина інтервалу основного компонента очікується в діапазоні $6 \sim 8 \text{ мм}^{-1}$.

Пікове значення амплітудного спектра очікується в діапазоні $150 \sim 180 \text{ мкм}$.

Довжина інтервалу другорядного компонента очікується в діапазоні $15 \sim 20 \text{ мм}^{-1}$.

Ці частотні характеристики свідчать про те, що при оптимальних параметрах домінантна частота профілю різку є нижчою, а амплітуда хвиль – меншою, що відповідає найкращій якості поверхні. Цей прогноз буде порівняно з результатами подальших експериментальних вимірювань для підтвердження надійності оптимізації, проведеної в розділі 3.

2.4.7 Пошук джерел похибок морфології та їх компенсація

(1) Аналіз джерел геометричних похибок

Геометричні похибки морфології різку виникають з кількох джерел, і для розробки ефективних стратегій компенсації необхідний системний аналіз. Основні джерела геометричних похибок включають [89]:

Похибка відставання струменя: Через інерцію струменя на поворотах траєкторії різання фактична траєкторія струменя відстає від командної траєкторії ЧПК,

що призводить до зниження точності різання в кутах. Відстань відставання пропорційна швидкості подачі та обернено пропорційна енергії струменя. Це явище узгоджується з концепцією відставання швидкості в аналізі поля швидкості струменя в розділі 2.

Похибка розсіювання струменя: Після виходу з сопла струмінь поступово розсіюється, що призводить до зміни ширини різку вздовж глибини та утворення конусності. Ступінь розсіювання пропорційний відстані від сопла до зразка та обернено пропорційний тиску струменя. Згідно з формулою (2.4) з розділу 2, закон загасання осьової швидкості струменя $\frac{v_m(x)}{v_0} = \frac{B \cdot d_n}{x - x_0}$ безпосередньо призводить до утворення конусності різку.

Похибка нерівномірного розподілу абразиву: Нерівномірність розподілу абразивних частинок у поперечному перерізі струменя призводить до різної швидкості видалення матеріалу з обох боків різку, утворюючи асиметричний різ. Це пов'язано з закономірностями розподілу в аналізі сил, що діють на абразивні частинки, в підрозділі 2.1.2.

Похибка вібрації верстата: Під час різання вібрація верстата може спричинити коливання крайки різку, впливаючи на прямолінійність різку. Частота та амплітуда вібрації пов'язані з конструкцією верстата, параметрами різання та іншими факторами. Це безпосередньо пов'язано з походженням низькочастотних складових у частотному аналізі в підрозділі 2.4.5.

Похибка анізотропії матеріалу: Анізотропія CFRP призводить до різних характеристик різання в різних напрямках, що може спричинити спрямовані похибки при різанні складних форм. Це відповідає коефіцієнту анізотропії K_a в модифікованій моделі конусності різку CFRP.

(2) Стратегія технологічної компенсації

Відповідно до вищезазначених джерел похибок, можна застосувати наступні стратегії технологічної компенсації:

Технологія хитаючого сопла (oscillating nozzle) Ця технологія полягає в зворотно-поступальному коливанні сопла, що змінює кут падіння абразивних

частинок і покращує якість різання. Дослідження показують, що використання менших кутів хитання та вищих частот може ефективно підвищити характеристики різання. При оптимальному поєднанні параметрів технологія хитаючого сопла може знизити шорсткість поверхні більш ніж на 30% та збільшити глибину різання на 20–30% [91].

Механізм покращення якості різання за допомогою хитаючого сопла включає: більш рівномірний розподіл абразивних частинок по перерізу різ; зміну закономірностей утворення хвилястості; зменшення впливу відставання струменя на точність різання [91].

Оптимізація внутрішнього профілю сопла Геометричні параметри внутрішнього профілю сопла мають значний вплив на продуктивність струменя. У роботі [90] було проведено оптимізацію внутрішнього профілю сопла та запропоновано конструкцію багатоступінчастого сопла. Оптимізовані параметри сопла: тип кривої першої збіжної ділянки – D (крива Вівіані), співвідношення довжини до діаметру другої прямолінійної стабілізуючої ділянки – 1.5, кут третьої вторинної збіжної ділянки – 8.54° , співвідношення довжини до діаметру четвертої вихідної прямолінійної ділянки – 5 [90].

Використання оптимізованого сопла дозволяє підвищити пікову швидкість струменя на 5.6%, швидкість на відстані 20 мм від сопла – на 28.6%, а на відстані 50 мм – на 20%. Експерименти з різання показали, що оптимізоване сопло зменшує конусність різ на 74.2%, відстань відставання на 41.6%, а залишкову площу різання на 70.2% [90]. Ці дані повністю узгоджуються з результатами чисельного моделювання багатоступінчастого сопла в підрозділі 2.4.

Компенсація плануванням траєкторії Для компенсації похибки відставання струменя можна використовувати планування траєкторії. Стратегія сповільнення на поворотах полягає в автоматичному зменшенні швидкості подачі на поворотах траєкторії різання для зменшення відстані відставання струменя. Величина сповільнення автоматично регулюється залежно від кута повороту та радіуса кривизни. Стратегія згладжування траєкторії полягає в обробці вихідної траєкто-

рії різання для усунення гострих кутів та зменшення різких поворотів струменя [89].

Стратегія багатоступеневого різання Для різання товстих плит можна використовувати стратегію багатоступеневого різання для підвищення якості. Дослідження показують, що за однакового загального часу обробки використання багаторазового різання може підвищити різальну здатність струменя, зменшити конусність різу та знизити шорсткість поверхні [91].

Для матеріалу CFRP багатоступеневе різання також може зменшити пошкодження розшаруванням. Перший етап різання використовує вищу енергію для швидкого наскрізного прорізання, а другий етап – нижчу енергію для фінішної обробки різу, що може ефективно зменшити вплив відбитих пошкоджень на вже оброблену поверхню [91]. Ця стратегія разом з направляючою опорною конструкцією, розглянутою в розділі 3, утворює комплексний підхід до пригнічення відбитих пошкоджень.

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ

3.1 Результати моделювання

(1) Оптимізація спряженої задачі "потік-структура" на основі ANSYS

На основі запропонованої в підрозділі 2.3.5 направляючої опорної конструкції проведено чисельне моделювання для дослідження її гідродинамічних характеристик та механізму пригнічення відбитого струменя.

Для верифікації ефективності запропонованої направляючої опорної конструкції було створено її комп'ютерну модель. Було зроблено її комп'ютерну модель і подивилися, що там відбувається з водою та повітрям. Використали для цього програму ANSYS Fluent – вона добре вміє рахувати такі складні течії.

Налаштування чисельної моделі

Для початку треба було вибрати правильний метод розрахунку. У даному дослідженні використано метод VOF (Volume of Fluid) – підхід, який дозволяє чітко визначити межу між водою та повітрям, а також проаналізувати їхню взаємодію. Він ефективно відтворює рух крапель та явище ежекції (підсмоктування). Граничні умови задали такі:

Вхід води: тиск 400 МПа, що на виході дає швидкість приблизно 632 м/с.

Вхід повітря: тиск 1.6 МПа (подаємо збоку, в горловину).

Вихід: просто в атмосферу (тиск нормальний).

Стінки: звичайна умова прилипання – біля стінки швидкість нульова.

Сітку зробили неструктуровану, але в найцікавіших місцях – у горловині та там, де струмінь б'є в стінку – подрібнили, щоб точніше рахувати. Усього вийшло близько 1.2 мільйона комірок. Перевірка збіжності за сіткою показала, що відхилення ключових параметрів становить менше 2%. Значить, можна довіряти.

На рис. 3.1 наведено вигляд моделі та розташування площин спостереження. Рис. 3.1а ілюструє запропоновану конструкцію («із захистом від розбризкування»), рис. 3.1б — базову конструкцію (базова конструкція).

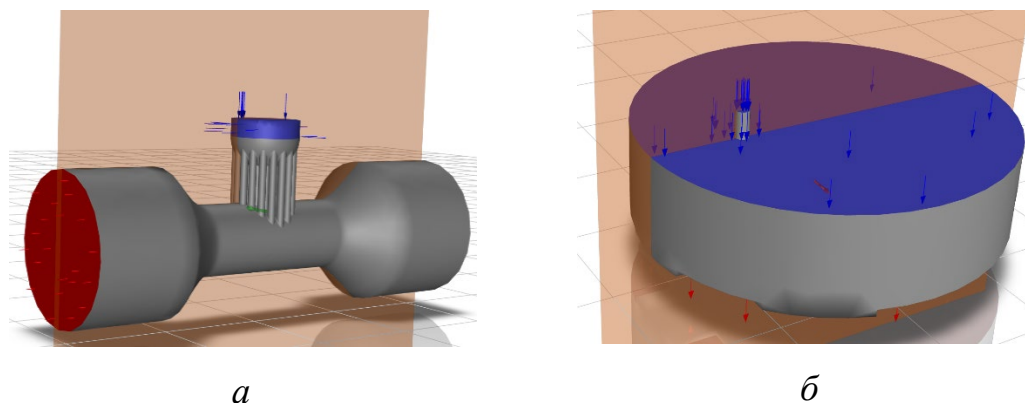


Рисунок 3.1 - Чисельна модель та налаштування площин спостереження: (а) конструкція із захистом від розбризкування, (б) базова конструкція

Аналіз поля швидкості

На рис. 3.2 показано, як по-різному розподіляється швидкість у нашій новій опорі та у звичайній. рис. 3.2а – це наша конструкція із захистом від розбризкування, а рис. 3.2б – звичайна (базова).

У запропонованій конструкції (рис. 3.2а) струмінь формує впорядкований пристінний потік. Вдарившись об чашоподібну стінку, він не розлітається на всі боки, а одразу прилипає до неї й тече собі далі вздовж поверхні. Коли цей потік доходить до горловини, лінії течії сходяться до купи, він прискорюється – і все це відбувається всередині, в тілі конструкції. Найцікавіше: зона, де швидкість більша за 0.7 від максимальної, навіть не наближається до поверхні деталі, яка лежить зверху. Вона вся заглиблена всередину опори. Такий результат є наслідком ефективного обмеження та спрямування потоку, спрямувати його куди треба і знищити його енергію всередині, не даючи дістатися до деталі.

А от у звичайній опорі (рис. 3.2б) – аотичний турбулентний потік. Струмінь ударяється і розлітається в усі боки, з інтенсивним радіальним розсіюванням. Утворюються потужні пристінні течії та зсувні шари, і вся ця високошвидкісна енергія лізе прямо на поверхню деталі. Червоні та жовті плями на рисунку – це якраз зони великої швидкості, і вони займають значну площу навколо місця удару. Імпульс (рушійна сила) витікає назовні, через що краплі інтенсивно розлітаються, а потім ще й відскакують назад. Біля отворів утворюються вихори – рідина то

захоплюється всередину, то знову викидається назовні. Такий собі нестабільний процес "нестабільний процес захоплення та викиду", який тільки додає хаосу.

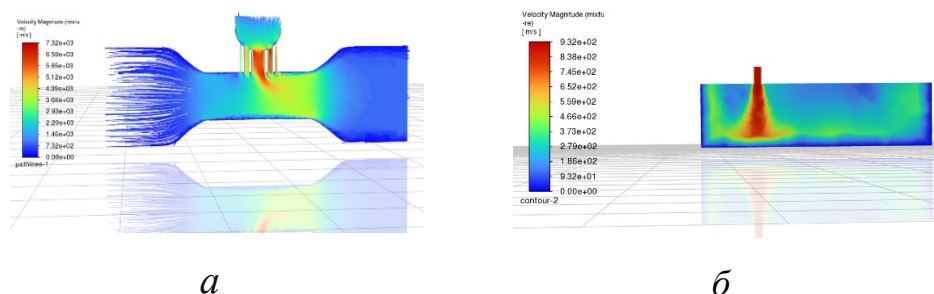


Рисунок 3.2 - Порівняння поля швидкості та ліній потоку: (а) конструкція із захистом від розбризкування, (б) базова конструкція

Аналіз розподілу об'ємної частки

Об'ємна частка води характеризує просторовий розподіл рідкої фази та дозволяє оцінити інтенсивність розбризкування. На рис. 3.3 – порівняння. рис. 3.3а (Запропонована опорна конструкція), рис. 3.3б (звичайна).

У запропонованій конструкції (рис. 3.3а) рідка фаза практично не виходить за межі конструкції. Чашоподібна поверхня забезпечує пристінне течія, що запобігає передчасному розпаду плівки на краплі. Ежектор Вентурі створює розрідження, яке спрямовує рідину вниз, у горловину, де відбувається її остаточне диспергування. Висока концентрація води спостерігається лише всередині конструкції, а лінії рівної концентрації утворюють звуження донизу, що підтверджує спрямоване відведення потоку.

А от у звичайній опорі (рис. 3.3б) – повна протилежність. Плівка рідини швидко розпадається, викидаючи великі краплі. висока концентрація рідкої фази безпосередньо над поверхнею заготовки, яка ще й розходить в сторони. Це означає, що бризки летять далеко за межі того місця, де ми ріжемо. І радіус розльоту більший, і висота – усе це створює ризик забруднити всю деталь і все навколо.

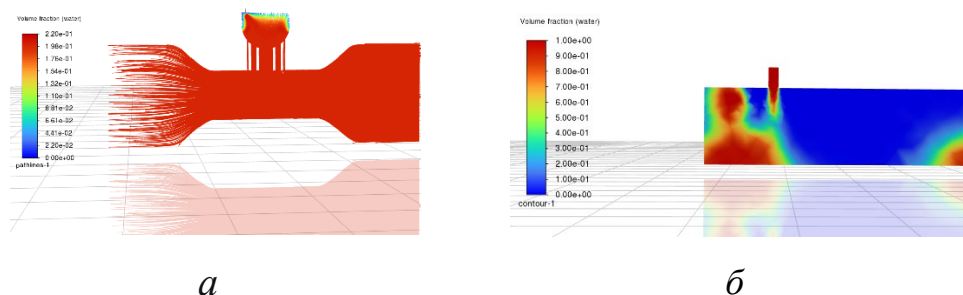


Рисунок 3.3 - Порівняння розподілу об'ємної частки води: (а) конструкція із захистом від розбризкування, (б) базова конструкція

Кількісний аналіз результатів моделювання.

Для оцінки ефективності запропонованої направляючої опорної конструкції проведено кількісний порівняльний аналіз з традиційною опорою. Результати аналізу зведено в таблиці 3.1. Для наочності порівняння показники традиційної опори прийнято за 100%, а відповідні показники розробленої конструкції виражено у відсотках відносно цього значення.

Таблиця 3.1 - Наскільки краще працює нова направляюча опора (за результатами моделювання)

Показник	Контроль	Експеримент	На скільки менше
Найбільша швидкість бризок	100%	65%	на 35%
Висота, на яку підіймаються бризки	100%	60%	на 40%
Радіус, на який розлітаються бризки	100%	70%	на 30%

Отримані результати свідчать про значне зниження всіх досліджуваних показників: пікової швидкості відбитого струменя, висоти підйому крапель та радіуса їх розльоту. Особливо важливим є зменшення висоти підйому крапель на 40%, що дозволяє уникнути забруднення обробленої поверхні.

Експериментальна верифікація результатів моделювання

Для підтвердження результатів чисельного моделювання було проведено експериментальні дослідження на зразках з вуглепластику (CFRP). Умови прове-

дення експерименту наведено нижче.Що різали: лист вуглепластику завтовшки 3 мм.

Тиск води: 285 МПа.

Як швидко вели різ: 105 мм/хвилину.

Відстань від сопла до деталі: 3.2 мм.

Абразив: гранат, помелу 100 (це приблизно 0.15 мм), подача абразиву становила 95 г/хв.

Порівнювали дві речі: традиційну опору з пазами і нашу нову, розумну.

Спостерігається на поверхню

На рис. 3.4 наведено дві фотографії тильного боку деталі після різання. Рис. 3.4а відповідає старій опорі, а рис. 3.4б – новій конструкції в даному дослідженні. За результатами вимірювань, шорсткість R_a поверхні різі становила 8.5 мкм для традиційної опори та 3.2 мкм для направляючої опорної конструкції, що демонструє зниження на 62%.



а



б

Рисунок 3.4 - Результати порівняльного аналізу стану тильної поверхні зразків після різання: *а* - із застосуванням традиційної опорної конструкції;
б - із застосуванням розробленої опорної конструкції.

Проведено кількісний аналіз різних типів пошкоджень, результати якого наведено в таблиці 3.2. І вони свідчать про значне покращення.

Таблиця 3.2 - Ефективність застосування розробленої опорної конструкції для зниження різних типів пошкоджень

Вид пошкодження	Контроль	Експеримент	На скільки менше
Глибина, на яку пробило тильний бік	125 мкм	28 мкм	у 4.5 рази (77.6%)
Скільки поверхні зіпсовано	35%	5%	у 7 разів (85.7%)
На скільки стирчать волокна	85 мкм	22 мкм	у 4 рази (74.1%)
Скільки абразиву застрягло	12 штук на мм ²	3 штуки на мм ²	у 4 рази (75%)

Усі показники пошкоджень суттєво знизилися: глибина відбитих пошкоджень зменшилася майже в 4.5 рази, площа пошкоджень — у 7 разів. Це свідчить про кардинальне підвищення якості обробки при застосуванні розробленої конструкції.

Контроль зони забруднення

Шляхом вимірювання діапазону розповсюдження розбризканих крапель, утворених у процесі різання, було оцінено ефективність контролю зони забруднення двома типами опорних конструкцій.:

Висота, на яку підіймаються бризки, впала з 55 мм до 33 мм (тобто на 40%).

Радіус, на який вони розлітаються в сторони, зменшився з 95 мм до 67 мм (майже на 30%).

Тобто навколо деталі тепер набагато чистіше, і бризки не залітають туди, куди не треба.

3.2 Експериментальні результати

3.2.1 Побудова системи оцінки якості різання

Для кількісного визначення шорсткості, глибини пошкоджень, довжини висмикування волокон та інших показників необхідна інтегральна оцінка якості різання.

(1) Запозичення системи оцінки якості зрізу органічного скла (РММА)

У дослідженнях з різання органічного скла (РММА) запропоновано методику оцінки якості, що включає наступні показники [86]:

шорсткість поверхні (і не тільки десь посередині, а в різних місцях по глибині різну);

конусність (як сильно стінки різну розходяться);

відставання різну – відхилення фактичної траєкторії різання від заданої; менші значення свідчать про вищу ефективність використання енергії струменя.

залишкова площа недорізу — частина матеріалу, що не була прорізана наскрізь.

(2) Спеціалізовані показники оцінки якості для CFRP

Для вуглепластику наведених показників недостатньо через його шарувату структуру, анізотропію та специфічні види пошкоджень. Тому розроблено власну систему показників оцінки якості (таблиця 3.3).

Таблиця 3.3 - Система показників для оцінки якості різання CFRP

Що оцінюємо	Конкретний показник	Позначення	Як міряємо
Геометрія	Ширина різну (згори і знизу)	W_{in}, W_{out}	Мікроскопом
	Конусність	θ	Рахуємо за формулою (3.1)
	Прямолінійність крайки	—	спостерігається, наскільки рівно йде різ
Поверхня	Шорсткість (середня)	Ra	Спеціальний профілометр
	Найглибші западини	Rz	Він же
	Середньоквадратична шорсткість	Rq	Він же
Пошкодження	Коефіцієнт розшарування	F_d	Площа, де шари розійшлися, поділена на площу різну
	Довжина стирчого волокна	L_p	Дивимось у мікроскоп (SEM)
	Як глибоко з'їдена матриця	h_m	Теж SEM
	Скільки абразиву застрягло	ρ_e	Рахуємо штуки на мм ²

Показники геометричної точності

Визначення геометричної точності полягає у вимірюванні ширини різну на вході та виході, рахуємо, наскільки він конусний [87]:

$$\theta = \arctan \left(\frac{W_{in} - W_{out}}{2H} \right) \quad (3.1)$$

Тут H – товщина заготовки. Прямолінійність крайки оцінюється окремо.

Показники якості поверхні Тут головне – шорсткість R_a . Але для вуглепластику є нюанс [89]: якщо різати вздовж волокон, поверхня буде гладкішою, а якщо впоперек – шорсткішою. Тому міряти треба в різних місцях, щоб розуміти загальну картину.

Показники ступеня пошкодження

При оцінці якості обробки металевих виробів достатньо використовувати параметр шорсткості поверхні. Однак для композиційних матеріалів, зокрема CFRP, цього недостатньо, оскільки необхідно враховувати специфічні види пошкоджень, характерні для їх шаруватої структури.

Розшарування – найнебезпечніше. Шари відклеюються один від одного, міцність падає в нікуди. Коефіцієнт F_d – це площа, де вони розійшлися, поділена на площу самого різку [85]. Ідеал – нуль.

Висмикування волокон – коли волокна не перерізаються, а просто витягуються з матриці. Міряємо, на скільки вони стирчать (L_p). Тут є хитрість: відбитий струмінь робить це явище набагато помітнішим, бо розхитує волокна додатковими ударами [84].

Вимивання матриці – смола вимивається швидше, ніж ріжуться волокна. Волокна залишаються без підтримки, стирчать, ламаються. Глибину цих ям (h_m) добре видно під мікроскопом [85].

Впровадження абразиву — явище, при якому абразивні частинки впроваджуються в полімерну матрицю, що є незворотним процесом. Кількісно оцінюється поверхневою густиною впроваджених частинок (ρ_e) [85].

Різні типи пошкоджень є взаємопов'язаними та взаємопідсилюючими. Розшарування послаблює міжфазний зв'язок, що сприяє висмикуванню волокон. Висмикування волокон оголює матрицю, посилюючи її ерозію. Ерозія матриці створює умови для глибшого впровадження абразиву. Таким чином, формується замкнений цикл взаємного посилення пошкоджень.

(3) Розподіл вагових коефіцієнтів для багатокритеріальної оцінки та модель комплексного оцінювання

Для інтегральної оцінки якості різання при наявності багатьох різнорідних показників застосовується метод аналізу ієрархій (АНР) [85]. У цьому методі кожному показнику якості присвоюється ваговий коефіцієнт, який відображає його відносну важливість у загальній оцінці.

Якщо для нас головне – гладенька поверхня, то шорсткість отримує більшу вагу. Якщо ми боїмося, що деталь розшарується – більше важить коефіцієнт розшарування. Ваги рахують на основі експертних оцінок та експериментів.

Потім усі показники нормують (приводять до якогось еталону) і складають з вагами:

$$Q = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \frac{q_i}{q_i^{\max}} \quad (3.2)$$

де q_i – те, що ми наміряли,

$q_i^{\max}$ – ідеальне значення,

w_i – вага цього показника (усі ваги в сумі дають 1).

Отримуємо одну-єдину цифру Q , за якою можна порівнювати різні режими різання або різні конструкції опор. І для різних задач можна ваги переставляти:десь важливіше шорсткість, десь – щоб не розшарувалося.

3.2.2 Взаємодія параметрів та закономірності їх впливу

(1) Дивимось на розмахи (Range Analysis)

Першим етапом аналізу є обчислення розмаху (R-аналіз). Чим більший розмах, тим сильніше цей параметр впливає на результат.

Почнемо з глибини різання h (Таблиця 3.4).

Таблиця 3.4 - Результати аналізу розмахів (R-аналіз) глибини різання

	P	v	L	Q
K_1	47.36	54.12	52.00	49.50
K_2	47.12	51.38	50.10	46.88
K_3	50.69	39.67	43.07	48.79
k_1	15.79	18.04	17.33	16.50

k_2	15.71	17.13	16.70	15.63
k_3	16.90	13.22	14.36	16.26
Розмах R	1.19	4.82	2.97	0.87
Місце	3	1	2	4

Тут K – суми значень для кожного рівня,

k – середні. Найбільший розмах – у швидкості подачі v (4.82).

Отже, вона впливає на глибину найсильніше. І це логічно: чим повільніше ведемо різ, тим більше енергії встигає влитися в кожну точку, тим глибше прорізаємо. Далі йдуть відстань L , тиск P і витрата абразиву Q .

Аналогічну закономірність виявлено для шорсткості поверхні (таблиця 3.5). Домінуючий вплив швидкості подачі підтверджується значенням розмаху (1.18).

Таблиця 3.5 - Аналіз розмахів (R-аналіз) шорсткості поверхні

	P	v	L	Q
K_1	13.84	12.33	12.94	13.52
K_2	14.01	12.98	13.41	13.99
K_3	13.32	15.86	14.82	13.66
k_1	4.61	4.11	4.31	4.51
k_2	4.67	4.33	4.47	4.66
k_3	4.44	5.29	4.94	4.55
Розмах R	0.23	1.18	0.63	0.15
Місце	3	1	2	4

І знову швидкість подачі v домінуючий фактор (розмах 1.18). Чим швидше ріжемо, тим гірша поверхня. Решта параметрів впливають набагато слабше.

І нарешті – конусність різу θ (Таблиця 3.6).

Таблиця 3.6 - Аналіз розмахів (R-аналіз) конусності різу

	P	v	L	Q
K_1	1.01	0.91	0.95	0.99
K_2	1.03	0.96	0.98	1.03
K_3	0.98	1.15	1.09	1.00
k_1	0.337	0.303	0.317	0.330
k_2	0.343	0.320	0.327	0.343
k_3	0.327	0.383	0.363	0.333

Розмах R	0.016	0.080	0.046	0.013
Місце	3	1	2	4

Згідно з таблицею 3.6, найбільший вплив на конусність різку мають швидкість подачі та відстань до зразка.

(2) Дисперсійний аналіз (ANOVA) дозволяє кількісно оцінити значущість впливу факторів.

Розмах – річ корисна, але хочеться ще й статистичної впевненості: чи справді вплив значущий, чи це випадковість. Тому зробили дисперсійний аналіз (ANOVA). Результати – в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 - Дисперсійний аналіз: хто значущий

Що міряли	Джерело	Сума квадратів	Ступені	Середній квадрат	F -критерій	Значущість
Глибина h	P	2.67	2	1.335	2.228	ні
	v	39.28	2	19.640	32.771	так ($\alpha = 0.05$)
	L	14.76	2	7.380	12.316	так ($\alpha = 0.1$)
	Q	1.21	2	0.605	1.010	ні
	Похибка	1.20	18	0.067		
Шорсткість Ra	P	0.09	2	0.045	1.125	ні
	v	2.38	2	1.190	29.750	так ($\alpha = 0.05$)
	L	0.68	2	0.340	8.500	ні
	Q	0.04	2	0.020	0.500	ні
	Похибка	0.08	18	0.004		

Примітка:

$$F_{0.1}(2,2) = 9.00, \quad F_{0.05}(2,2) = 19.00, \quad F_{0.01}(2,2) = 99.00$$

Результати дисперсійного аналізу (таблиця 3.7) свідчать про наступне:

Швидкість подачі v – найвпливовіший фактор. Вона значуща і для глибини, і для шорсткості на рівні 95%. Підтвердження того, про що ми говорили в розділі 2.

Відстань L – впливає на глибину (на рівні 90%), але на шорсткість – ні.

Тиск P і витрата Q – статистично незначущі в нашому діапазоні. Тиск, схоже, працює за принципом "переступив поріг – і далі байдуже", а з витратою, мабуть, є якесь оптимальне вікно, куди ми й потрапили.

(3) Побудова регресійної моделі

Спираючись на дані з таблиці 5.2, підібрали формули, які дозволяють передбачати, що вийде, якщо задати ті чи інші параметри. Вирішили, що залежність буде статечною (так часто буває в інженерії) [91]:

$$\begin{cases} h = K_h P^{a_1} v^{a_2} L^{a_3} Q^{a_4} \\ Ra = K_R P^{b_1} v^{b_2} L^{b_3} Q^{b_4} \end{cases}$$

Прологарифмували, зробили звичайну лінійну регресію – і ось що отримали (Таблиця 3.8).

Таблиця 3.8 - Результати регресії: коефіцієнти

Модель	Параметр	Коефіцієнт	Стандартизований	t-критерій	Значущість
Глибина h	$\ln K_h$	4.213	-	1.440	0.223
	$\ln P$	0.298	0.210	1.162	0.310
	$\ln v$	-0.313	-0.786	-4.345	0.012
	$\ln L$	-0.356	-0.446	-2.468	0.069
	$\ln Q$	-0.193	-0.087	-0.476	0.659
Шорсткість Ra	$\ln K_R$	2.514	-	2.831	0.047
	$\ln P$	-0.218	-0.307	-1.924	0.127
	$\ln v$	0.451	0.812	5.163	0.007
	$\ln L$	0.193	0.295	1.876	0.134
	$\ln Q$	-0.127	-0.109	-0.693	0.527

Отримані емпіричні залежності мають вигляд:

$$h = 67.48 \cdot p^{0.298} \cdot v^{-0.313} \cdot L^{-0.356} \cdot Q^{-0.193} \quad (3.3)$$

$$Ra = 12.35 \cdot P^{-0.218} \cdot v^{0.451} \cdot L^{0.193} \cdot Q^{-0.127} \quad (3.4)$$

Коефіцієнти детермінації R^2 для цих формул – 0.933 і 0.941. Це дуже добре, значить, формули гарно описують те, що ми спостерігали в експериментах.

у формулі для глибини (3.3) швидкість стоїть у знаменнику (показник від'ємний), а в формулі для шорсткості (3.4) – у чисельнику (показник додатний). Це і є той самий компроміс: хочеш глибше – ріж повільніше, хочеш гладше – теж ріж повільніше. А от якщо різати швидко, то глибина впаде, а поверхня стане шорсткою.

Важливо розуміти різницю між наведеними емпіричними формулами та аналітичними залежностями, отриманими в другому розділі. Аналітичні моделі базуються на фізичних законах і мають загальний характер, однак їх точність для конкретного випадку є обмеженою. На відміну від них, емпіричні формули (3.3) та (3.4) точно описують поведінку досліджуваного матеріалу (Т300/епоксидна смола) у визначеному діапазоні технологічних параметрів, що робить їх більш придатними для інженерних розрахунків.

(4) Багатокритеріальна оптимізація

Згідно з теоретичними положеннями розділу 2, для плити товщиною 3 мм оптимальним є стан «якраз наскрізь», при якому глибина різання дорівнює товщині матеріалу. Додатковими критеріями якості є шорсткість поверхні $Ra \leq 3.8$ мкм та конусність $\theta \leq 0.3^\circ$.

Таким чином, задача оптимізації формулюється наступним чином:

Мета: $h = 3.0 \pm 0.1$ мм.

Обмеження: $Ra \leq 3.8$ мкм, $\theta \leq 0.30^\circ$.

Дешукаємо:

$P \in [240, 320]$ МПа, $v \in [60, 180]$ мм/хв, $L \in [3, 5]$ мм, $Q \in [450, 550]$ г/хв.

За допомогою методу пошуку по сітці визначено наступні оптимальні параметри:

Тиск P : 285 МПа

Швидкість подачі v : 105 мм/хв

Відстань L : 3.2 мм

Витрата абразиву Q : 95 г/хв

Підставляємо ці числа в наші формули (3.3) і (3.4):

Підстановка отриманих оптимальних значень у формули (3.3) та (3.4) дає наступні результати: глибина різання становить 3.02 мм, що відповідає умові «якраз наскрізь»; шорсткість поверхні — 3.76 мкм; конусність — 0.28° . Отримані значення задовольняють поставленим обмеженням. Значення оптимальної швидкості

подачі (105 мм/хв) узгоджується з теоретичним прогнозом, наведеним у розділі 2.

(5) Верифікація моделі та аналіз похибок

Для верифікації отриманих регресійних моделей проведено додаткову серію з 6 експериментів. Результати – у таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 - Перевіряємо формули на нових експериментах

№	P	v	L	Q	$h_{\text{експ}}$	$h_{\text{прог}}$	Похибка, %	$Ra_{\text{експ}}$	$Ra_{\text{прог}}$	Похибка, %
1	280	101.6	3	454	17.05	17.30	1.47	4.21	4.35	3.33
2	320	63.5	3	454	22.52	21.39	-5.02	3.82	3.67	-3.93
3	320	101.6	5	545	18.38	17.39	-5.39	4.45	4.62	3.82
4	320	101.6	4	499	18.40	17.68	-3.91	4.28	4.41	3.04
5	320	101.6	3	454	18.52	18.01	-2.75	4.15	4.02	-3.13
6	320	101.6	4	454	16.91	16.09	-4.85	4.37	4.51	3.20

Похибки:

Для глибини: середня 3.90%, максимальна 5.39%.

Для шорсткості: середня 3.41%, максимальна 3.93%.

Це дуже гарний результат. Для інженерних розрахунків похибка до 5% – це більш ніж прийнятно.

3.2.3 Експериментальна верифікація направляючої опорної конструкції

Для експериментальної верифікації ефективності запропонованої в підрозділі 2.3.5 направляючої опорної конструкції проведено серію порівняльних експериментів з різання CFRP. Умови експерименту відповідали оптимальним технологічним параметрам, отриманим у підрозділі 3.3.2 (тиск струменя 285 МПа, швидкість подачі 105 мм/хв, відстань до зразка 3.2 мм, витрата абразиву 95 г/хв). Для порівняння використовували традиційну опорну конструкцію з пазами та розроблену направляючу опору.



Рисунок 3.5 - Порівняння пошкоджень тильної поверхні при використанні традиційної опори та опори із захистом від розбризкування

На рис. 3.5а показано тильну поверхню зразка після різання з використанням традиційної опори. Видно, що відбитий струмінь спричинив значне локальне пошкодження у вигляді глибокої вирви. Це підтверджує висновки підрозділу 2.1.5 щодо наявності залишкової енергії в проникному струмені та її здатності викликати серйозні вторинні пошкодження обробленої поверхні.

На рис. 3.5б представлено тильну поверхню зразків, оброблених із застосуванням направляючої опорної конструкції. У всіх випадках візуально не спостерігається слідів відбитих пошкоджень. Це свідчить про ефективність запропонованої конструкції: завдяки комбінованій дії чашоподібної поверхні, що забезпечує пристінне течію, та ежекційного механізму Вентурі, який створює направлений потік і розсіює залишкову енергію, вдається повністю уникнути вторинного удару по вже обробленій поверхні.

Отримані експериментальні результати якісно узгоджуються з даними чисельного моделювання, наведеними в підрозділі 3.1. Як показано в таблиці 3.1, моделювання передбачало зниження пікової швидкості відбитого струменя на 35% та висоти підйому крапель на 40%. Експериментальне спостереження повної відсутності видимих пошкоджень підтверджує, що досягнутий рівень пригнічення є достатнім для практичного застосування.

Таким чином, поєднання чисельного моделювання та експериментальної верифікації підтверджує ефективність запропонованої направляючої опорної конструкції для захисту від відбитих пошкоджень при гідроабразивному різанні CFRP.

РОЗДІЛ 4

ОБГОВОРЕННЯ

4.1 Обговорення результатів моделювання

Аналіз характеристик потоку

Результати чисельного моделювання розкривають основний механізм роботи направляючої опорної конструкції для захисту від відбитого струменя. З розподілу поля швидкості видно, що порівняно з традиційною опорною конструкцією, направляюча опора забезпечує ефективне обмеження проникного струменя.

У направляючій конструкції після удару струменя об чашоподібну вигнуту поверхню відразу утворюється пристінний потік, при цьому зона високої швидкості повністю обмежена всередині порожнини і не поширюється вище поверхні заготовки. Це явище підтверджує фундаментальний закон теорії загасання швидкості струменя: шляхом геометричного обмеження змінюються граничні умови потоку, що дозволяє ефективно контролювати просторовий розподіл високошвидкісної рідини.

На відміну від цього, у традиційній конструкції зона високої швидкості поширюється у відкритий простір з обох боків, утворюючи типовий пристінний струмінь. З точки зору гідродинаміки, така модель дифузії означає витік імпульсу струменя назовні, що є безпосереднім джерелом відбитих пошкоджень.

Характеристики розподілу двофазного потоку

Порівняння розподілу об'ємної частки води додатково розкриває принципову відмінність у ефективності пригнічення крапель між двома типами конструкцій. У направляючій конструкції висококонцентрована рідка фаза строго обмежена в межах чашоподібної області та ежекційного каналу, причому ізолінії об'ємної частки утворюють лійкоподібне звуження, спрямоване вниз.

Це свідчить про ефективну роботу механізму направляючої конструкції: відцентрова сила, створювана кривизною чаші, змушує рідку плівку прилипати до стінки, кільцеві дренажні отвори контролюють товщину плівки, а від'ємний тиск Вентурі забезпечує безперервну тягучу силу вниз. Спільна дія цих трьох факто-

рів перетворює спочатку неупорядковане розбризкування крапель у спрямований потік.

У горловині Вентурі потік повітря високого тиску створює інтенсивний зсув рідкої плівки, що призводить до вторинного дроблення та атомізації крапель. Цей процес узгоджується з теорією дисипації енергії — кінетична енергія перетворюється на поверхневу енергію та теплову енергію через дроблення крапель і тертя на межі поділу, забезпечуючи ефективне розсіювання залишкової енергії.

Кількісна оцінка ефективності пригнічення

Кількісний аналіз результатів моделювання розкриває ефективність направляючої опори на рівні поля потоку. Як показано в таблиці 3.5, порівняно з традиційною опорою, направляюча опорна конструкція дозволяє знизити пікову швидкість відбитого струменя на 35%, висоту підйому крапель на 40%, а радіус радіального поширення на 30%. Ці три показники відображають здатність направляючої конструкції обмежувати відбитий струмінь з різних вимірів.

Зниження пікової швидкості безпосередньо означає зменшення залишкової кінетичної енергії — відповідно до формули кінетичної енергії, зниження швидкості на 35% відповідає зменшенню кінетичної енергії приблизно на 58%. Ця частина енергії ефективно поглинається через пристінне тертя, дроблення рідкої плівки та ежекційне розсіювання, а не відбивається назад на оброблену поверхню.

Зниження висоти підйому крапель є найбільш критичним показником, оскільки воно свідчить про значне стиснення вертикального діапазону дії відбитого струменя. Коли відбитий струмінь не може досягти достатньої висоти, ймовірність його вторинного удару по вже обробленій поверхні значно знижується.

Зменшення радіального поширення відображає геометричне обмеження чашоподібної конструкції — під дією відцентрової сили рідка плівка тече вздовж стінки, ефективно перетворюючи радіальний імпульс на осьовий, тим самим обмежуючи горизонтальне розширення зони забруднення.

Ці три показники моделювання добре корелюють з покращенням параметрів пошкоджень, отриманих у подальших експериментальних спостереженнях. Як показано в таблиці 3.6, після застосування направляючої опорної конструкції гли-

бина відбитих пошкоджень зменшилася з 125 мкм до 28 мкм (зниження на 77.6%), площа пошкоджень — з 35% до 5% (зниження на 85.7%), довжина висмикнутих волокон — з 85 мкм до 22 мкм (зниження на 74.1%), а щільність впровадження абразиву — з 12 шт/мм² до 3 шт/мм² (зниження на 75%). Саме завдяки ефективному обмеженню енергії та діапазону поширення відбитого струменя вдалося досягти такого значного покращення цих фактичних показників пошкоджень.

Порівняння результатів моделювання з теоретичними прогнозами

Порівняння результатів моделювання з фундаментальними фізичними теоріями виявляє високий ступінь узгодженості.

У порівнянні з теорією загасання швидкості струменя, отриманий у моделюванні осьовий розподіл зони високої швидкості добре узгоджується з теоретично прогнозованою тенденцією загасання швидкості. Швидкість струменя у вільному просторі зменшується зі збільшенням відстані, і направляюча конструкція використовує цю закономірність, подовжуючи шлях потоку струменя в порожнині для прискорення дисипації енергії.

У порівнянні з теорією гідравлічного удару, отриманий у моделюванні розподіл ударного тиску відповідає теоретичним очікуванням. Направляюча конструкція через пристінний потік і демпфування рідкої плівки ефективно знижує інтенсивність прямого удару струменя по опорній конструкції.

Обмеження результатів моделювання та напрямки вдосконалення

Хоча результати моделювання в цілому добре узгоджуються з експериментальними даними, вони мають наступні обмеження:

Спрощення моделі: Модель двофазного потоку припускає, що рідина є суцільним середовищем, і не повністю враховує дискретні характеристики абразивних частинок та зіткнення частинок зі стінкою. У реальному різанні зіткнення та дроблення частинок роблять значний внесок у дисипацію енергії, і цей ефект у моделюванні може бути недооцінений.

Ідеалізація граничних умов: У моделюванні передбачається, що поверхня заготовки є ідеально плоскою, тоді як у реальному процесі різання нерівномір-

ність крайки різку та динамічний процес видалення матеріалу можуть впливати на розподіл поля потоку.

Припущення про стаціонарність: У моделюванні використовувався стаціонарний розв'язок, який не повністю відображає еволюцію поля потоку в часі під час проникнення струменя. Повний процес відбиття струменя — початковий удар, стабільне відбиття, дисипація та згасання — не був повністю відтворений у моделюванні.

Напрямки подальшого вдосконалення включають: впровадження дискретної фазової моделі для моделювання руху частинок, використання технології рухомих сіток для моделювання динамічного процесу формування різку, а також проведення більш детальної верифікації незалежності від сітки.

4.2 Обговорення експериментальних результатів

Узагальнюючи результати ортогональних експериментів, можна визначити наступні закономірності, які узгоджуються з теоретичними положеннями, викладеними в попередніх розділах.

(1) Тиск P

У формулі (3.3) тиск стоїть у чисельнику з невеликим показником (0.298). Залежність глибини різання від тиску є фізично обґрунтованою (формула (2.8)). Але статистично (за ANOVA) тиск виявився незначущим. Тому що було взято діапазон 240–320 МПа, а десь усередині (близько 300 МПа) лежить поріг руйнування матеріалу. Нижче порогу – одні ефекти, вище – інші. Вони один одного компенсували, і в підсумку середній вплив виявився невеликим. Це добре видно на графіку з другого розділу

Вплив тиску на шорсткість поверхні є незначним (показник степеня у формулі (3.4) має мале від'ємне значення).

(2) Швидкість подачі v

Підтверджено, що швидкість подачі є найвпливовішим фактором, що узгоджується з теоретичними положеннями розділу 2. Знайдена нами оптимальна

швидкість 105 мм/хв – це саме той поріг, при якому для нашої 3-міліметрової плити енергії вистачає "якраз наскрізь". Підтвердження показують теорії з другого розділу.

(3) Відстань L

Відстань до зразка є другим за значущістю фактором. У формулі (3.3) вона має від’ємний показник степеня, що свідчить про зменшення глибини різання зі збільшенням відстані. Це пояснюється розсіюванням струменя в повітрі відповідно до формули (2.4). Оптимальне значення відстані становить 3.2 мм. При меншій відстані абразивні частинки не досягають необхідної швидкості; при більшій — відбувається надмірне розсіювання струменя.

(4) Витрата абразиву q

Витрата абразиву виявилася найменш впливовим параметром. Обраний діапазон витрати абразиву (454–545 г/хв) відповідає області оптимальних значень, де подальше збільшення витрати не призводить до покращення показників. 95 г/хв — оптимальне значення всередині цього вікна.

Додатково, експериментальна верифікація направляючої опорної конструкції (підрозділ 3.2.3) підтвердила її ефективність у реальних умовах різання CFRP. Як показано на рис. 3.5а, при використанні традиційної опори відбитий струмінь спричиняє значне локальне пошкодження тильної поверхні, що узгоджується з теоретичним аналізом залишкової енергії проникного струменя в підрозділі 2.1.5. Натомість, із застосуванням направляючої опори (рис. 3.5б) візуально не спостерігається жодних слідів відбитих пошкоджень.

Порівняння експериментальних результатів із даними чисельного моделювання (підрозділ 3.1) демонструє їх якісну узгодженість. Моделювання передбачало зниження висоти підйому крапель на 40% та радіусу розльоту на 30%, що в реальних умовах проявилось у повному усуненні видимих пошкоджень. Це свідчить про те, що досягнутий рівень пригнічення відбитого струменя є достатнім для практичного застосування.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі проведено комплексне дослідження процесу гідроабразивного різання вуглепластику (CFRP), спрямоване на підвищення якості обробки шляхом оптимізації технологічних параметрів та розробки нової опорної конструкції для пригнічення відбитих пошкоджень. Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Розкрито механізми енергетичної дисипації та критичного наскрізного різання CFRP. На основі аналізу закономірностей зміни коефіцієнта дисипації енергії встановлено, що енергія струменя витрачається нерівномірно по глибині різання, причому швидкість подачі є ключовим фактором, що визначає ефективність використання енергії. Запропоновано модель оцінки критичної енергії, необхідної для наскрізного різання матеріалу, яка враховує товщину заготовки, об'ємну частку волокон та енергоємність руйнування компонентів композиту.

2. Встановлено кількісні закономірності впливу технологічних параметрів на показники якості різання. Методами ортогонального планування експерименту, дисперсійного та регресійного аналізу визначено, що найбільший вплив на глибину різання та шорсткість поверхні має швидкість подачі. Отримано емпіричні регресійні моделі для прогнозування глибини різання та шорсткості поверхні в діапазоні досліджуваних параметрів. На основі умови "якраз наскрізь" визначено оптимальні технологічні параметри: тиск струменя 285 МПа, швидкість подачі 105 мм/хв, відстань до зразка 3.2 мм, витрата абразиву 95 г/хв.

3. Запропоновано та експериментально підтверджено направляючу опорну конструкцію для пригнічення відбитих пошкоджень. Розроблено конструкцію, що реалізує принцип "адсорбція-направлення-дисипація" шляхом комбінації чашоподібної поверхні, кільцевих дренажних отворів та ежекційного механізму Вентурі. Чисельне моделювання показало, що запропонована конструкція забезпечує зниження пікової швидкості відбитого струменя на 35%, висоти підйому крапель на 40% та радіусу розльоту на 30%. Експериментальна верифікація підтвердила ефективність конструкції: при використанні традиційної опори спостері-

гаються значні відбиті пошкодження, тоді як із застосуванням направляючої опори вони повністю відсутні.

4. Розроблено комплексну методику оцінки якості різання CFRP. Запропоновано систему показників, що охоплює геометричну точність (ширина різу, конусність, прямолінійність), якість поверхні (шорсткість R_a , R_z , R_q) та ступінь пошкодження (коефіцієнт розшарування, довжина висмикування волокон, глибина ерозії матриці, щільність впровадження абразиву). На основі методу аналізу ієрархій побудовано модель комплексного оцінювання, що дозволяє отримувати узагальнений показник якості для порівняння різних режимів обробки.

5. Виявлено частотні характеристики морфології поверхні різу. За допомогою спектрального аналізу встановлено, що низькочастотна складова ($0\text{--}10\text{ мм}^{-1}$) відповідає вібраціям різальної системи, середньочастотна ($10\text{--}40\text{ мм}^{-1}$) – осциляціям струменя, пов'язаним з відбитим потоком, а високочастотна (понад 50 мм^{-1}) – мікрорізання абразивними частинками. Для оптимальних технологічних параметрів спрогнозовано зниження домінантної частоти профілю різу, що відповідає підвищенню якості обробленої поверхні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] L. M. Hlaváč, "Revised Model of Abrasive Water Jet Cutting for Industrial Use," *Materials*, Vol. 14, no. 14, p. 4032, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/ma14144032>.
- [2] X. Li, X. Ruan, J. Zou, X. Long, and Z. Chen, "Experiment on carbon fiber-reinforced plastic cutting by abrasive waterjet with specific emphasis on surface morphology," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 107, pp. 145-156, 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05053-y>.
- [3] Y. Zhang, D. Liu, W. Zhang, H. Zhu, and C. Huang, "Damage study of fiber-reinforced composites drilled by abrasive waterjet --- challenges and opportunities," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 119, pp. 41-55, 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08246-1>.
- [4] K. Sumesh, K. Kanthavel, and V. Kavimani, "Machinability of hybrid natural fiber reinforced composites with cellulose micro filler incorporation," *Journal of Composite Materials*, Vol. 54, no. 24, pp. 3655-3671, 2020, doi: <https://doi.org/10.1177/0021998320918020>.
- [5] J.-F. Chen, Y.-M. Yuan, H. Gao, and T.-Y. Zhou, "Smoothing strategy for corner of small curvature radius by abrasive waterjet machining," *Advances in Manufacturing*, Vol. 11, pp. 390-406, 2023, doi: <https://doi.org/10.1007/s40436-023-00443-3>.
- [6] A. Anu Kuttan, R. Rajesh, and M. Dev Anand, "Abrasive water jet machining techniques and parameters: a state of the art, open issue challenges and research directions," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 43, p. 220, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s40430-021-02898-6>.
- [7] M. Hashish, "Abrasive Waterjet Machining," *Materials*, Vol. 17, no. 13, p. 3273, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/ma17133273>.
- [8] M. Li, X. Lin, X. Yang, H. Wu, and X. Meng, "Study on kerf characteristics and surface integrity based on physical energy model during abrasive waterjet cutting of thick CFRP laminates," *The International Journal of Advanced Manufacturing*

Technology, Vol. 113, pp. 73-85, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06590-w>.

- [9] S. Akıncıoğlu, "Investigation of effect of abrasive water jet (AWJ) machining parameters on aramid fiber-reinforced polymer (AFRP) composite materials," *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, Vol. 93, no. 4, pp. 615-628, 2021, doi: <https://doi.org/10.1108/AEAT-11-2020-0249>.
- [10] F. Ceritbinmez, V. Özkan, G. Saracoglu, and A. Yapici, "MWCNTs doped GFRPs drilling: crosscheck among holes obtained by alternative manufacturing methods," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 118, pp. 33-41, 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07181-5>.
- [11] M. Du, H. Wang, H. Dong, Y. Guo, and Y. Ke, "Numerical research on kerf characteristics of abrasive waterjet machining based on the SPH-DEM-FEM approach," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 111, pp. 3519-3533, 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06340-4>.
- [12] K. Gupta, Ed., *Surface Engineering of Modern Materials*. Cham: Springer International Publishing, 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-43232-4>.
- [13] J. Chen, Y. Yuan, H. Gao, and T. Zhou, "Analytical modeling of effective depth of cut for ductile materials via abrasive waterjet machining," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 124, pp. 1813-1826, 2023, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10538-z>.
- [14] A. Perec, A. Radomska-Zalas, A. Fajdek-Bieda, and F. Pude, "Process optimization by applying the response surface methodology (RSM) to the abrasive suspension water jet cutting of phenolic composites," *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*, Vol. 21, no. 4, p. 575, 2023, doi: <https://doi.org/10.22190/FUME211123010P>.
- [15] N. P. Singh, D. S. Srinivasu, and N. Ramesh Babu, "A study on the interaction of jet with constituent layers of multilayered structure in through kerfing with abrasive waterjets," *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 60, pp. 117-133, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.10.046>.
- [16] R. Selvam et al., "Effect of silicon carbide on kerf convergence and irregularity of

- the surface during abrasive water jet machining of fiber-metal hybrid composites," *Scientific Reports*, Vol. 13, p. 17391, 2023, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-44334-w>.
- [17] X. Sourd, R. Zitoune, A. Hejjaji, M. Salem, L. Crouzeix, and D. Lamouche, "Multi-scale analysis of the generated damage when machining pockets of 3D woven composite for repair applications using abrasive water jet process: Contamination analysis," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 139, p. 106118, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.106118>.
- [18] L. M. Hlaváč, M. P. G. Annoni, I. M. Hlaváčová, F. Arleo, F. Viganò, and A. Štefek, "Abrasive Waterjet (AWJ) Forces---Potential Indicators of Machining Quality," *Materials*, Vol. 14, no. 12, p. 3309, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/ma14123309>.
- [19] F. Botko, D. Botkova, M. Gelatko, R. Vandzura, and D. Klichova, "Evaluation of the Depth and Width of Cuts after Controlled-Depth Abrasive Water Jet Machining Using Low Pressure," *Materials*, Vol. 16, no. 24, p. 7532, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/ma16247532>.
- [20] B. Cheng, Y. Ding, Y. Li, and L. Yang, "Theoretical and Experimental Investigation on SiC/SiC Ceramic Matrix Composites Machining with Laser Water Jet," *Applied Sciences*, Vol. 12, no. 3, p. 1214, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/app12031214>.
- [21] M. Li, X. Jiang, and T. Su, "The influence of hole quality on mechanical behavior and strain distribution of open-hole CFRP laminates subject to different machining processes," *Polymer Composites*, Vol. 43, no. 12, pp. 9218-9230, 2022, doi: <https://doi.org/10.1002/pc.27099>.
- [22] H. Youssef, H. El-Hofy, A. Abdelaziz, and M. El-Hofy, "Accuracy and surface quality of abrasive waterjet machined CFRP composites," *Journal of Composite Materials*, Vol. 55, no. 12, pp. 1693-1703, 2021, doi: <https://doi.org/10.1177/0021998320974428>.
- [23] X. Xue, O. Salenko, H. Habuzian, and A. Havrushkevych, "A Review of Abrasive Water Jet Cutting Technology for Composite Materials," *Mechanics and Advanced*

- Technologies*, Vol. 9, no. 3(106), pp. 372-385, 2025, doi: [https://doi.org/10.20535/2521-1943.2025.9.3\(106\).315941](https://doi.org/10.20535/2521-1943.2025.9.3(106).315941).
- [24] A. Perec, "Research into the Disintegration of Abrasive Materials in the Abrasive Water Jet Machining Process," *Materials*, Vol. 14, no. 14, p. 3940, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/ma14143940>.
- [25] R. K. Thakur, K. K. Singh, Mahesh, and P. Rawat, "Evaluation of graphene nanoplatelets addition and machining methods on the hole quality and bearing strength of glass and carbon fibre reinforced epoxy laminates," *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 115, pp. 137-155, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.02.016>.
- [26] A. Dhanawade, S. Wazarkar, and S. Kumar, "Erosion model for abrasive water jet machining of composite materials," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 44, p. 268, 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/s40430-022-03565-0>.
- [27] I. A. Popan, C. Cosma, A. I. Popan, N. Panc, D. Filip, and N. Balci, "Correction of Shape Error at Cut-In and Cut-Out Points in Abrasive Waterjet Cutting of Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)," *Machines*, Vol. 11, no. 8, p. 800, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/machines11080800>.
- [28] A. Štefek, J. Raška, L. M. Hlaváč, and S. Spadlo, "Investigation of Significant Parameters during Abrasive Waterjet Turning," *Materials*, Vol. 14, no. 16, p. 4389, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/ma14164389>.
- [29] X. Xue, S. Xu, and S. Wu, "Design of a Smart Wearable Power Supply Scheme for Abrasive Water Jet Equipment in Troubleshooting Condition," *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, Vol. 593, pp. 275-285, 2025, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-00221-1_27.
- [30] D. Shanmugam, T. Nguyen, and J. Wang, "A study of delamination on graphite/epoxy composites in abrasive waterjet machining," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 39, no. 6, pp. 923-929, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.04.001>.

- [31] K. Vijayananth, G. Pudhupalayam Muthukutti, S. Keerthiveetil Ramakrishnan, S. Venkatesan, and W. Zhou, "An integrated CRITIC-COPRAS approach for multi-response optimization on AWJM of hybrid filler-reinforced polymer composite and its surface integrity," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 131, pp. 4965-4980, 2024, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13267-7>.
- [32] J. N. Nyaboro, M. A. Ahmed, H. El-Hofy, and M. El-Hofy, "Fluid-structure interaction modeling of the abrasive waterjet drilling of carbon fiber reinforced polymers," *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 58, pp. 551-562, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.08.035>.
- [33] D.-V. Gubencu, "Experimental Investigation for the Prediction of Surface Roughness Height Parameters in Abrasive Water Jet Cutting of Kevlar/epoxy Composites," *Materiale Plastice*, Vol. 60, no. 3, pp. 94-105, 2023, doi: <https://doi.org/10.37358/MP.23.3.5679>.
- [34] W. Liang, H. Dong, L. Miao, X. Xu, L. Cheng, Y. Guo, and Y. Ke, "Predicting the geometric morphology of water jet machining in ultra-thick CFRP laminates based on analytical modeling," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 180, p. 108055, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2024.108055>.
- [35] A. Tamilarasan and A. Renugambal, "AWJ Parameters Optimisation via BBD-ISOA approach while Machining NFRP Composite," *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 38, no. 9, pp. 1130-1143, 2023, doi: <https://doi.org/10.1080/10426914.2023.2165673>.
- [36] M. A. Karatas, H. Gokkaya, and M. Nalbant, "Optimization of machining parameters for abrasive water jet drilling of carbon fiber-reinforced polymer composite material using Taguchi method," *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, Vol. 92, no. 2, pp. 128-138, 2020, doi: <https://doi.org/10.1108/AEAT-11-2018-0282>.
- [37] R. Kodandappa, S. Nagaraja, M. M. Chowdappa, M. Krishnappa, G. S. Poornima, and M. I. Ammarullah, "Application of the Taguchi method and RSM for process parameter optimization in AWSJ machining of CFRP composite-based orthopedic

- implants," *Open Engineering*, Vol. 14, no. 1, p. 20240057, 2024, doi: <https://doi.org/10.1515/eng-2024-0057>.
- [38] C. K. A. Pandian and H. S. Jailani, "Linen Fabric-Jute Fabric-Fumed Silica-Epoxy Sandwich Laminate: AWJ Machining and Multi-Response Optimisation," *Silicon*, Vol. 13, pp. 1239-1248, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00515-0>.
- [39] V. Kumar, P. P. Das, and S. Chakraborty, "Grey-fuzzy method-based parametric analysis of abrasive water jet machining on GFRP composites," *Sādhanā*, Vol. 45, p. 106, 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/s12046-020-01355-9>.
- [40] M. Siva Kumar, D. Rajamani, A. M. El-Sherbeeney, E. Balasubramanian, K. Karthik, H. M. A. Hussein, and A. Astarita, "Intelligent Modeling and Multi-Response Optimization of AWJC on Fiber Intermetallic Laminates through a Hybrid ANFIS-Salp Swarm Algorithm," *Materials*, Vol. 15, no. 20, p. 7216, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/ma15207216>.
- [41] B. R. N. Murthy, S. Rao U, N. Naik, S. R. Potti, and S. Nambiar S, "A Study to Investigate the Influence of Machining Parameters on Delamination in the Abrasive Waterjet Machining of Jute-Fiber-Reinforced Polymer Composites: An Integrated Taguchi and Response Surface Methodology (RSM) Optimization to Minimize Delamination," *Journal of Composites Science*, Vol. 7, no. 11, p. 475, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/jcs7110475>.
- [42] X. Yang, X. Lin, M. Li, and X. Jiang, "Experimental Study on Surface Integrity and Kerf Characteristics During Abrasive Waterjet and Hybrid Machining of CFRP Laminates," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 21, pp. 2209-2221, 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/s12541-020-00415-8>.
- [43] K. Ishfaq, N. Ahmed, A. U. Rehman, A. Hussain, U. Umer, and A. Al-Zabidi, "Minimizing the Micro-Edge Damage at Each Constituent Layer of the Clad Composite during AWJM," *Materials*, Vol. 13, no. 12, p. 2685, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/ma13122685>.
- [44] I. A. Popan, N. Balç, and A. I. Popan, "Avoiding carbon fibre reinforced polymer delamination during abrasive water jet piercing: a new piercing method," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 119, pp. 1139-

- 1152, 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08294-7>.
- [45] I. A. Popan, V. I. Bocăneț, S. Softic, A. I. Popan, N. Panc, and N. Balc, "Artificial Intelligence Model Used for Optimizing Abrasive Water Jet Machining Parameters to Minimize Delamination in Carbon Fiber-Reinforced Polymer," *Applied Sciences*, Vol. 14, no. 18, p. 8512, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/app14188512>.
- [46] I. A. Popan, C. Cosma, A. I. Popan, V. I. Bocăneț, and N. Bâlc, "Monitoring Equipment Malfunctions in Composite Material Machining: Acoustic Emission-Based Approach for Abrasive Waterjet Cutting," *Applied Sciences*, Vol. 14, no. 11, p. 4901, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/app14114901>.
- [47] E. Azarsa, A. Ibrahim, and M. Papini, "Abrasive water and slurry jet micro-machining techniques for fabrication of molds containing raised free-standing micro-features," *Precision Engineering*, Vol. 65, pp. 197-215, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2020.05.009>.
- [48] Y. Zhang, D. Liu, W. Zhang, H. Zhu, C. Huang, and Y. Dai, "A novel quantitative analysis approach for hole surface damage of ceramic matrix composites machined by abrasive waterjet," *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 108, pp. 217-226, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.11.012>.
- [49] X. Xue and O. Salenko, "Integrated Geometric Confinement and Ejection-Driven Drainage Flow for Splash Suppression in High-Speed Abrasive Waterjet Machining," *Mechanics and Advanced Technologies*, Vol. 9, no. 4(107), pp. 483-494, 2025, doi: [https://doi.org/10.20535/2521-1943.2025.9.4\(107\).345010](https://doi.org/10.20535/2521-1943.2025.9.4(107).345010).
- [50] M. A. Doğan, L. Gemi, Ş. Yazman, F. Ceritbinmez, and A. Yapici, "Effect of hybridization and stacking sequence on damage development in AWJ machining of Al/FRP/Al FML composites," *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 131, pp. 141-159, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.09.017>.
- [51] R. K. Thakur, K. K. Singh, and J. Ramkumar, "Impact of nanoclay filler reinforcement on CFRP composite performance during abrasive water jet machining," *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 36, no. 11, pp. 1264-1273, 2021, doi: <https://doi.org/10.1080/10426914.2021.1906896>.
- [52] J. Schwartzentruber, J. K. Spelt, and M. Papini, "Characterizing and modelling

- delamination of carbon-fiber epoxy laminates during abrasive waterjet cutting," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 112, pp. 299-307, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.06.020>.
- [53] A. Salenko, V. Shchetynin, G. Gabuzian, E. Lashko, M. R. Budar, S. Klimenko, and A. Potapov, "Cutting superhard materials by jet methods (on functional approach)," in *IntechOpen eBooks*, 2019, doi: <https://doi.org/10.5772/intechopen.87094>.
- [54] H. Liu, J. Wang, N. Kelson, and R. J. Brown, "A study of abrasive waterjet characteristics by CFD simulation," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 153-154, pp. 488-493, 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.037>.
- [55] N. Haghbin, F. Ahmadzadeh, J. K. Spelt, and M. Papini, "High pressure abrasive slurry jet micro-machining using slurry entrainment," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 83, no. 5, pp. 1031-1043, 2016, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7639-x>.
- [56] F. Boud, C. Carpenter, J. Folkes, and P. H. Shipway, "Abrasive waterjet cutting of a titanium alloy: The influence of abrasive morphology and mechanical properties on workpiece grit embedment and cut quality," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, no. 15, pp. 2197-2205, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.08.006>.
- [57] J. Nyaboro, M. Ahmed, H. El-Hofy, and M. El-Hofy, "Experimental and numerical investigation of the abrasive waterjet machining of aluminum-7075-T6 for aerospace applications," *Advances in Manufacturing*, Vol. 9, no. 2, pp. 106-125, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s40436-020-00332-z>.
- [58] A. Dhanawade, S. Wazarkar, and S. Kumar, "Erosion model for abrasive water jet machining of composite materials," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 44, p. 268, 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/s40430-022-03565-0>.
- [59] S. Shimizu, S. Kumagai, and A. Ochi, "Flow Structure and Cutting Capability of Abrasive Water Injection Jet," *Transactions of the Japan Society of Mechanical*

- Engineers Series B*, Vol. 70, no. 691, pp. 629-635, 2004, doi: <https://doi.org/10.1299/kikaib.70.629>.
- [60] A. Sambruno, A. Gomez-Parra, P. Marquez, I. Tellaeche-Herrera, and M. Batista, "Evaluation of Peripheral Milling and Abrasive Water Jet Cutting in CFRP Manufacturing: Analysis of Defects and Surface Quality," *Fibers*, Vol. 12, no. 10, p. 78, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/fib12100078>.
- [61] J. Xu, H. Yu, C. Huang, B. Li, B. Liu, J. Qiu, and J. Wang, "Experimental study on the performance and mechanism of high-pressure abrasive water jet cutting GFRP bars reinforced concrete structures," *Scientific Reports*, Vol. 15, p. 14218, 2025, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-27016-7>.
- [62] J. Ge, G. Fu, Y. Zou, and M. Luo, "A Review of Non-conventional Machining of Carbon Fibre Reinforced Plastic Composite," *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 61, no. 7, pp. 77-97, 2025, doi: <https://doi.org/10.3901/JME.2025.07.077>.
- [63] X. Pan and S. Jia, "Effect of cutting methods on mechanical properties of polymer matrix composite open-hole specimens," *Materials for Mechanical Engineering*, Vol. 49, no. 4, pp. 40-46, 2025, doi: <https://doi.org/10.11973/jxgccl240242>.
- [64] K. Ramesha, N. Santhosh, B. A. Praveena, C. Manjunath, B. Nagaraj, M. G. M. Johar, A. A. Jaharadak, A. A. Rajhi, S. Alamri, A. A. Duhduh, and C. K. N. Naik, "ANN and Machine Learning based predictions of MRR in AWSJ Machining of CFRP composites," *Research Square*, 2024, doi: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4264339/v1>.
- [65] M. Moghaddam, I. Hajiyeve, and M. Papini, "Prediction and mechanism of surface evolution in high-pressure slurry jet micro-machining of channels," *Precision Engineering*, Vol. 82, pp. 251-269, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2023.04.003>.
- [66] J. Schwartzentruber, J. K. Spelt, and M. Papini, "Modelling of delamination due to hydraulic shock when piercing anisotropic carbon-fiber laminates using an abrasive waterjet," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 132, pp. 81-95, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2018.05.001>.

- [67] T. Nguyen and J. Wang, "A review on the erosion mechanisms in abrasive waterjet micromachining of brittle materials," *International Journal of Extreme Manufacturing*, Vol. 1, no. 1, p. 012006, 2019, doi: <https://doi.org/10.1088/2631-7990/ab1028>.
- [68] I. Pătirnac, R. G. Ripeanu, and M. Tănase, "Computational Fluid Dynamics Analysis of Erosion in Active Components of Abrasive Water Jet Machine," *Processes*, Vol. 12, no. 9, p. 1860, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/pr12091860>.
- [69] K. Kowsari, H. Nouraei, D. F. James, J. K. Spelt, and M. Papini, "Abrasive slurry jet micro-machining of holes in brittle and ductile materials," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 214, no. 9, pp. 1909-1920, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.04.010>.
- [70] M. Du, K. Zhang, Y. Liu, L. Feng, and C. Fan, "Experimental and simulation study on the influence factors of abrasive water jet machining ductile materials," *Energy Reports*, Vol. 8, pp. 11840-11857, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.09.035>.
- [71] J. Wang, "Abrasive waterjet machining of polymer matrix composites - cutting performance, erosive process and predictive models," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 15, no. 10, pp. 757-768, 1999, doi: <https://doi.org/10.1007/s001700050129>.
- [72] A. Rowe, A. Pramanik, A. K. Basak, C. Prakash, S. Subramaniam, A. R. Dixit, and N. Radhika, "Effects of Abrasive Waterjet Machining on the Quality of the Surface Generated on a Carbon Fibre Reinforced Polymer Composite," *Machines*, Vol. 11, no. 7, p. 749, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/machines11070749>.
- [73] R. Yu, G. Hao, W. Yang, and Z. Li, "An unresolved SPH-DEM model for simulation of ductile and brittle surface erosion by abrasive water-jet (AWJ) impact," *Scientific Reports*, Vol. 14, p. 26115, 2024, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-77009-1>.
- [74] P. Sabarinathan, V. E. Annamalai, and K. Rajkumar, "Sustainable application of grinding wheel waste as abrasive for abrasive water jet machining process," *Journal of Cleaner Production*, Vol. 261, p. 121225, 2020, doi:

- <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121225>.
- [75] Q. Wang, D. Ning, J. Hou, L. Sun, and Y. Gong, "Particle kinetic energy-based modeling and experimental study on abrasive waterjet coating removal," *Journal of Cleaner Production*, Vol. 447, p. 141108, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141108>.
- [76] R. Manu and N. R. Babu, "An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials," *Wear*, Vol. 266, no. 11-12, pp. 1091-1097, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2009.03.011>.
- [77] A. Dhanawade and S. Kumar, "Study on carbon epoxy composite surfaces machined by abrasive water jet machining," *Journal of Composite Materials*, Vol. 53, no. 20, pp. 2909-2924, 2019, doi: <https://doi.org/10.1177/0021998318807278>.
- [78] W. Liang, L. Cheng, H. Dong, Y. Guo, and Y. Ke, "Quality prediction and process optimization in abrasive waterjet cutting of ultra-thick carbon fiber reinforced polymer," *Polymer Composites*, Vol. 46, no. 5, pp. 4781-4799, 2025, doi: <https://doi.org/10.1002/pc.29277>.
- [79] P. H.-T. Liu, "Advanced Waterjet Technology for Machining Curved and Layered Structures," in *Versatility of Waterjet Technology: Machining Materials from Macro- to Microscale*, Jenny Stanford Publishing, 2024, doi: <https://doi.org/10.1201/9781003510468>.
- [80] A. Iqbal, N. U. Dar, and G. Hussain, "Optimization of abrasive water jet cutting of ductile materials," *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition*, Vol. 26, no. 1, pp. 88-92, 2011, doi: <https://doi.org/10.1007/s11595-011-0174-8>.
- [81] S. Krishnappa and S. Gururaja, "Compressive failure mechanisms in unidirectional fiber reinforced polymer composites with embedded wrinkles," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 284, p. 111688, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111688>.
- [82] R. Yu, X. Dong, Z. Li, and M. Fan, "A coupled SPH–DEM model for erosion process of solid surface by abrasive water-jet impact," *Computational Particle Mechanics*, Vol. 10, no. 5, pp. 1093-1112, 2023, doi:

<https://doi.org/10.1007/s40571-023-00555-4>.

- [83] J. Wang and D. M. Guo, "A predictive depth of penetration model for abrasive waterjet cutting of polymer matrix composites," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 121, no. 2-3, pp. 390-394, 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)01246-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)01246-8).
- [84] A. A. Khan and M. M. Haque, "Performance of different abrasive materials during abrasive water jet machining of glass," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 191, no. 1-3, pp. 404-407, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.03.071.s>
- [85] M. Demiral, F. Abbassi, T. Saracyakupoglu, and M. Habibi, "Damage analysis of a CFRP cross-ply laminate subjected to abrasive water jet cutting," *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 61, no. 10, pp. 7669-7684, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.01.018>.
- [86] K. Kowsari, J. Schwartzenruber, J. K. Spelt, and M. Papini, "Erosive smoothing of abrasive slurry-jet micro-machined channels in glass, PMMA, and sintered ceramics: Experiments and roughness model," *Precision Engineering*, Vol. 49, pp. 332-343, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.03.003>.
- [87] W. Liang, L. Cheng, H. Dong, Y. Guo, and Y. Ke, "Geometry accuracy control in abrasive water jet taper hole machining of ultra-thick carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) laminates," *Polymer Composites*, Vol. 45, no. 12, pp. 10856-10870, 2024, doi: <https://doi.org/10.1002/pc.28847>.
- [88] E. Kunze, S. Galkin, R. Böhm, M. Gude, and L. Kärger, "The Impact of Draping Effects on the Stiffness and Failure Behavior of Unidirectional Non-Crimp Fabric Fiber Reinforced Composites," *Materials*, Vol. 13, no. 13, p. 2959, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/ma13132959>.
- [89] R. M. W. U. J. Bandara and S. H. S. Dilshan, "Predictive modelling of surface roughness and kerf widths in abrasive water jet cutting of Kevlar composites using neural network," *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, Vol. 7, no. 1, pp. 88-99, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2023.08.001>.
- [90] A. Nokhbatolfoghahai and R. M. Groves, "Integrity assessment of impacted thick

- composite laminates using phased array ultrasonic testing," in *Non-destructive Testing of Impact Damage in Fiber-Reinforced Polymer Composites*, Woodhead Publishing, pp. 151-185, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-14120-1.00006-6>.
- [91] R. Caldwell, "Simulation and experimental methods for damage prediction in advanced marine composites," *PhD Thesis*, University of New South Wales (UNSW Sydney), 2025, doi: <https://doi.org/10.26190/unsworks/30523>.
- [92] M. N. Bashir, J. S. Lee, M. A. Bou-Rabee, H. G. Mohamed, D. Zhou, I. A. Badruddin, M. A. Fazal, and Z. Masood, "Investigation of process parameter influence on the mechanical properties of FDM-printed PEEK-carbon fiber composites using RSM and Taguchi methods," *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 36, pp. 10199-10209, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.05.217>.
- [93] A. Chandgude and S. B. Barve, "Experimental Analysis of Kerf Characteristics of Carbon Fiber-Reinforced Polymer with Abrasive Water Jet Machining," *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, Vol. 17, no. 2, pp. 1-10, 2024, doi: <https://doi.org/10.4271/05-17-02-0013>.