

УДК 621.452.3.03:621.921.015:004.942

doi: 10.32620/aktt.2023.5.05

Ю. А. ШАШКО, О. В. КУЛИК

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна

ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ АБРАЗИВНО-ПОВІТРЯНИМ СТРУМЕНЕМ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ ЛОПАТОК МОНОКОЛІС ЗАКРИТОГО ТИПУ НА ОСНОВІ ДАНИХ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ANSYS CFX

Правильний вибір технологічних режимів може гарантувати забезпечення результатів струменевої обробки. Однак необхідність врахування значної кількості вхідних даних, а саме параметрів обладнання, абразивного струменя, фізико-механічних властивостей матеріалу та форми оброблюваних поверхонь виробів, а також відсутність чітких рекомендацій та технологічних даних суттєво ускладнюють процес. **Предметом** вивчення статті є дослідження процесу обробки абразивно-повітряним струменем поверхні лопаток закритого типу виготовлених за одне ціле з диском, по типу «моноколеса», адитивним методом за технологією SLM зі сплаву Inconel 718. **Метою** завдання є моделювання струменевої обробки лопаток моноколів закритого типу з використанням програмної системи аналізу кінцевих елементів ANSYS CFX. У даній статті наведені результати чисельного моделювання обробки поверхонь закритих лопаток турбін та виявлення технологічних факторів, що впливають на шорсткість та якість поверхні середовищі стисненого повітря на зразках лопаток турбін закритого типу виготовлених зі сплаву Inconel 718. **Завдання:** розробити план дослідження та вивчити процес обробки та супутні явища що виникають при обробці, методом кінцевих елементів за допомогою програмного комплексу ANSYS CFX, з урахуванням фізико-механічних властивостей абразивних часток, середовища та оброблюваного матеріалу. Отримані такі **результати:** при математичному моделюванні методом кінцевих елементів, було отримано дані шістнадцяти розрахункових варіантів обробки поверхні лопаток, з яких було обрано найбільш оптимальний, що забезпечує найбільшу площу контакту абразивних частинок та їх рівномірну взаємодію з оброблювальною поверхнею. Крім того в процесі дослідження було вивчено вплив «нерівномірності ерозії» та різнозернистості абразивних матеріалів на якість обробленої поверхні. Подальший аналіз даних результатів дослідження дозволив знайти шляхи вирішення даних завдань, підтвердженням чого стали результати контрольно-перевіркового дослідження. **Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному: вперше було досліджено обробку абразивно-повітряним струменем закритих лопаток турбіни виконаних за одне ціле з диском по типу «моноколесо» отриманих адитивним методом. Отримані дані дослідження були взяті за основу для розробки реального маршрутного технологічного процесу обробки лопаток турбіни закритого типу, що виготовляються адитивним методом.

Ключові слова: шорсткість; бластинг; ANSYS CFX; адитивні технології; лопатки закритого типу; абразивні матеріали; абразивно-струменева обробка; Inconel 718; моноколесо; SLM.

Вступ

Сучасне авіаційне та космічне машинобудівне виробництво потребує продуктивних та дешевих методів обробки складнопрофільних деталей, типу лопаток турбін, що є відповідальними частинами двигунів авіаційної та ракетно-космічної техніки. Абразивно-струменевий сухого типу може застосовуватись, як на завершальних операціях, наприклад, для зміцнення або декоративного оздоблення поверхонь виробів, так і в підготовці поверхонь до подальшої обробки, зокрема до операцій з нанесення покриттів. Переваги струменевої обробки особливо проявляються зі збільшенням розмірів та ускладненням форми виробів роблячи її подекуди безальтернативним

методом для досягнення бажаних показників якості поверхонь виробів. Перспективним напрямком для застосування даного методу обробки є постобробка металевих деталей отриманих адитивним методом. Незважаючи на стрімке впровадження в різних галузях машинобудування, особливо авіа- та ракетобудування, однак залишається актуальною проблема забезпечення кінцевої якості складнопрофільних поверхонь виробів, таких як, наприклад, лопатки турбін з бандажем (закритого типу). Важливою вимогою до будь-якого методу обробки є прогнозованість точності та якості виробів отриманих після застосування цього методу. Правильний вибір технологічних режимів може гарантувати забезпечення результатів

струменевої обробки. Однак необхідність врахування значної кількості вхідних даних, а саме параметрів обладнання, характеристики абразивно-повітряного струменя, фізико-механічні властивості матеріалу та форми оброблюваних поверхонь виробів, а також відсутність чітких рекомендацій та технологічних даних суттєво ускладнюють процес. В роботі [1] авторами було проведено дослідження абразивно-струменевої обробки закритих лопаток турбін за допомогою програмного комплексу ANSYS CFX методом кінцевих елементів на основі усереднених рівнянь Нав'є-Стокса (RANS).

За допомогою ANSYS CFX вдалося змоделювати процеси, що відбуваються в середині каналу між лопатками та в соплові, а саме величини швидкості абразивних частинок, їх траєкторію руху та величини ерозії, як наслідок взаємодії частинок з поверхнею лопатки.

Ерозія – складне явище, яке залежить від багатьох параметрів. Параметри потоку, з іншого боку, мають сильніший вплив на ерозію, оскільки визначають концентрацію частинок, кут удару частинок і швидкість удару. Основними параметрами, що впливають на ерозію, є властивості цільової поверхні, тобто твердість поверхні кут удару, швидкість удару, діаметр частинок, масу частинок і частоту зіткнень [2].

Крім цього модель обробки дозволило виявити нерівномірність ерозії в зоні обробки міжлопаткового каналу рис. 1.

Як видно на з рис. 1 зона контакту частинок за поточних параметрів близька до площі поперечного перерізу каналу сопла. Кольоровий спектр інтенсивності ерозії показує, що вона не рівномірна по всій площі зони обробки, найбільша інтенсивність зосереджена з країв як показано в зонах 1 та 3, а відносно рівномірна в середині – зона 2. Нерівномірність ерозії може спричинити нерівномірну шорсткість та якість поверхні, а також ускладнює контроль процесу обробки. На думку автора нерівномірність ерозії могло виникнути з декількох причин: неоднорідна зернистість абразивного матеріалу, особливість форми сопла, що сприяє більшій інтенсивності ерозії по краях площини обробки, або неоптимальне просторове положення сопла відносно лопаткового каналу.

Нерівномірність ерозії на практиці може спричинити не тільки нерівномірну шорсткість чи рельєф поверхні лопатки а й її фізичне пошкодження. Тому авторами було прийнято рішення більш детально вивчити дане явище та знайти шляхи вирішення даного завдання.

1. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Метод обробки різанням металу є найбільш продуктивним видом обробки, в тому випадку коли процес видалення матеріалу виконується більш ніж однією ріжучою кромкою для виконання деяких

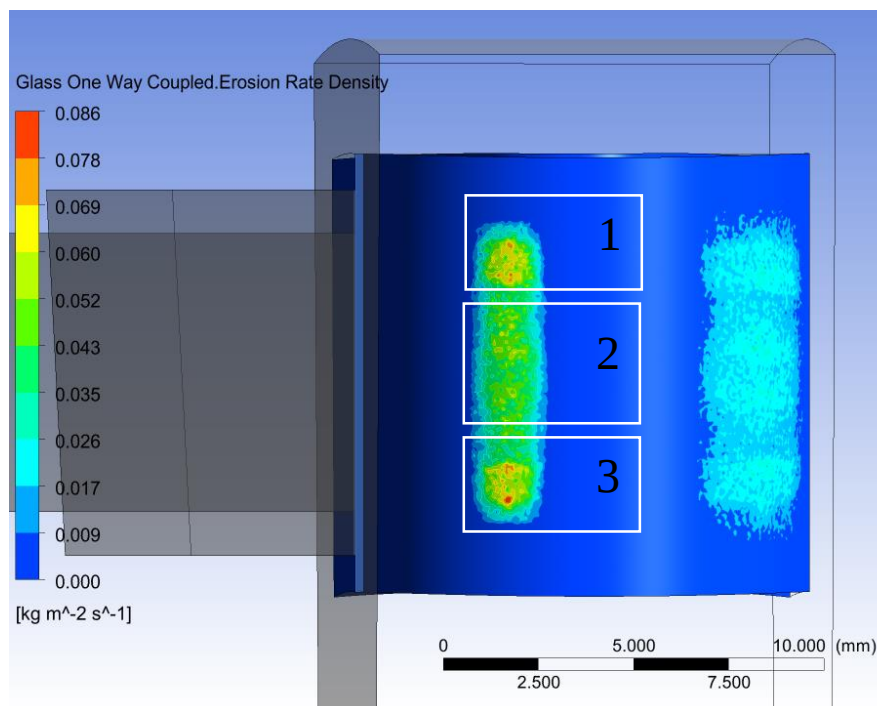


Рис. 1. Зони різної інтенсивності ерозії, $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$

конкретних критеріїв, необхідних для формування кінцевої форми деталі у вигляді певних геометричних розмірів, на додаток до цього, існує чітка вимога, щоб якість обробленої поверхні деталі була високою та суворо відповідала вимогам конструкторської документації, оскільки вони відіграють важливу роль в аерокосмічній, автомобільній та біомедичній промисловості [3]. Процес обробки вільним абразивом AFM (abrasive flow machining – з англ. перекл. обробка абразивним потоком) вважається найбільш значущим підходом до обробки деталей та виробів складної геометрії і передових матеріалів, що використовуються в промислових практиках [4-5]. Вважається, що це нещодавно розроблений процес обробки поверхні, який широко використовується в різних промислових сферах, таких як оборона, аерокосмічна, біомедична, інструменти та машинобудування тощо [6]. У вільному стані AFM не має структури, яка з'єднувала зерна разом у матриці в зв'язаному «абразивному процесі». Різноманітні стандартні процеси в технологіях обробки вільним абразивом включають полірування, хонінгування притирки та абразивно-струменеву обробку, також є одним із методів фінішної обробки, який передбачає масло для частинок абразиву та полімеру-носія та допомагає усунути бар'єри для отримання бажаного розміру та форми [7]. Таким чином, будь-яку складну форму можна легко обробити за допомогою обробки абразивним потоком, скорочено AFM. Абразивна обробка може допомогти усунути недоліки звичайних процесів, таких як «шліфування», «притирка» та «хонінгування» [4]. Однак застосування потоку абразивних частинок за допомогою полімеру-носія має вагомий недолік, що полягає у високій вартості та «низькій швидкості видалення матеріалу, це робить його трудомістким і виснажливим. Нещодавно також з'явилися ACM процеси фінішної обробки для вирішення подібних завдань, однак їх реалізація вимагає значних затрат часу [8-10].

Однак обробка абразивно-повітряним струменем, часто носить назву «піскоструменева обробка» або бластинг «м'яка обробка» має дещо інші відмінності на природу взаємодії з поверхнею.

Обробка поверхонь деталей абразивним струменем в машинобудуванні досить відомий процес. Сутність процесу полягає в абразивному зношенні (ерозія) що відноситься до механічного часткового руйнування поверхонь, яке виникає в результаті дії твердих часток, що ріжуть чи дряпають, які знаходяться у вільному стані [11]. В роботах [12] автори вважають, що механізм абразивної ерозії є дуже простим і зводиться до суми великого числа елементарних процесів дряпання. При цьому між явищем простого дряпання й абразивним зношенням (ерозією) повинен існувати глибокий зв'язок. П. Н. Львов

[13-15] розглядав механізм ерозії в залежності від структури металу. Він показав що в процесі руху по металевій поверхні кварцеві зерна прорізають канавки в м'якій основі і перестрибують через тверді карбіди. У визначений момент все більше виступаючі зерна карбіду сплаву будуть збиті абразивними частками, і далі відбудеться швидке зношування до наступних нижче розташованих карбідів. Таким чином, на думку автора, зносостійкість металу визначається зносостійкістю пластичної основи сплаву.

Н. І. Богомолів показав, що зниження інтенсивності ерозії металу при дії вільного абразиву пояснюється більшим здрібненням вільних зерен, а також тим, що вільне зерно здійснює мікрорізання періодично, у момент його тимчасового контакту з оброблюваною поверхнею. Однак не всі абразивні частинки ріжуть і знімають стружку. Частина з них пластично деформує матеріал. Відповідно до результатів [16, 17] пластична деформація, що протікає в тонких поверхневих шарах, приводить до зростання щільності дислокацій, у зв'язку, з чим різко збільшується твердість а це є причиною крихкості поверхневого шару. Тим не менш, з огляду на розвиток сучасних технологій, в тому числі адитивних, враховуючи всі можливості абразивної обробки, даний метод має значні перспективи широкого застосування як одного з основних методів постобробки деталей отриманих 3-D друком [18]. Вивчення впливу часток вільного абразивного струменя дозволить краще зрозуміти сутність процесу та в подальшому сприятиме більш точному проектуванню технологічних процесів з обробки деталей типу закритих лопаток турбін турбонасосних агрегатів рідинних ракетних двигунів.

2. Мета і завдання дослідження

Сучасна газодинаміка займається розробкою таких напрямків, як розрахунок рухів в'язкої рідини, чисельне дослідження течій газу з фізико-механічними та фізико-термічними змінами, вивченням розподілу твердих частинок в двофазних середовищах. В загальному випадку для завдання газової динаміки потрібно вирішити систему з чотирьох незалежних рівнянь Нав'є-Стокса: рівняння нерозривності (збереження маси), рівняння кількості руху (збереження імпульсу), рівняння енергії (збереження енергії), рівняння стану. Рівняння Нав'є-Стокса утворюють закінчену математичну модель поведінки рідини (газу), детально описує практично весь спектр течій, а саме:

Рівняння нерозривності, що відповідає закону збереження маси:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z)}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

де V_x, V_y, V_z – компоненти вектора швидкості в напрямках x, y і z відповідно; ρ – щільність; x, y, z – глобальні декартові координати; t – час. закон збереження імпульсу, що зв'язує напруги і швидкості деформації рідини для трьох напрямків, у вигляді рівнянь Нав'є-Стокса:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho V_x}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y V_x)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z V_x)}{\partial z} = \\ = \rho g_x - \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \mu_\epsilon \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu_\epsilon \frac{\partial V_x}{\partial y} + \\ + \frac{\partial}{\partial z} \mu_\epsilon \frac{\partial V_x}{\partial z} + T_x, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho V_y}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x V_y)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z V_y)}{\partial z} = \\ = \rho g_y - \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \mu_\epsilon \frac{\partial V_y}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu_\epsilon \frac{\partial V_y}{\partial y} + \\ + \frac{\partial}{\partial z} \mu_\epsilon \frac{\partial V_y}{\partial z} + T_y, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho V_z}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x V_z)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y V_z)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z V_z)}{\partial z} = \\ = \rho g_z - \frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \mu_\epsilon \frac{\partial V_z}{\partial x} + \\ + \frac{\partial}{\partial y} \mu_\epsilon \frac{\partial V_z}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \mu_\epsilon \frac{\partial V_z}{\partial z} + T_z, \end{aligned} \quad (4)$$

де: g_x, g_y, g_z – компоненти вектору прискорення вільного падіння в напрямках x, y і z , відповідно; μ_ϵ – ефективна в'язкість; T_x, T_y, T_z – компоненти вектору в'язких втрат в напрямках x, y і z відповідно.

$$T_x = \frac{\partial \rho}{\partial x} \mu + \frac{\partial(\rho V_x)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu + \frac{\partial V_y}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \mu \frac{\partial V_z}{\partial x}, \quad (5)$$

$$T_y = \frac{\partial \rho}{\partial x} \mu + \frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \mu \frac{\partial V_z}{\partial y}, \quad (6)$$

$$T_z = \frac{\partial \rho}{\partial x} \mu + \frac{\partial V_x}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial V_y}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \mu \frac{\partial V_z}{\partial z}. \quad (7)$$

Ефективна в'язкість враховує ламінарну в'язкість μ (яка визначається властивостями рідини) і турбулентну в'язкість μ_t : (яка розраховується за моделлю турбулентності)

$$\mu_\epsilon = \mu + \mu_t \quad (8)$$

Рівняння Нав'є-Стокса (RANS) є середніми величинами потоку, при цьому вони моделюють ефекти турбулентності без необхідності дозволу турбулентних флуктуацій. Моделюються всі масштаби поля турбулентності. Моделювання рівнянь RANS значно знижує обсяг обчислень у порівнянні з прямим чисельним моделюванням і зазвичай використовується для практичних інженерних розрахунків.

3. Матеріали та методи

Як об'єкт дослідження використовувався сегмент робочого колеса турбіни закритого типу спільно з соплом для подавання абразивного струменя в середину каналу. Напрямок подачі струменя співпадає з віссю міжлопаткового каналу сопла рис. 2.

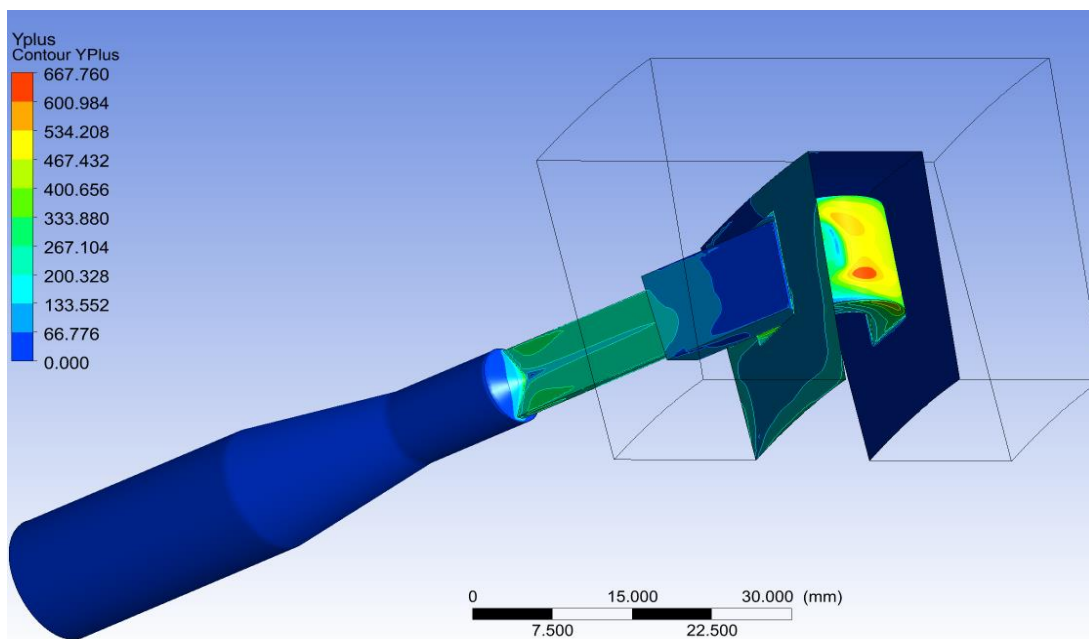
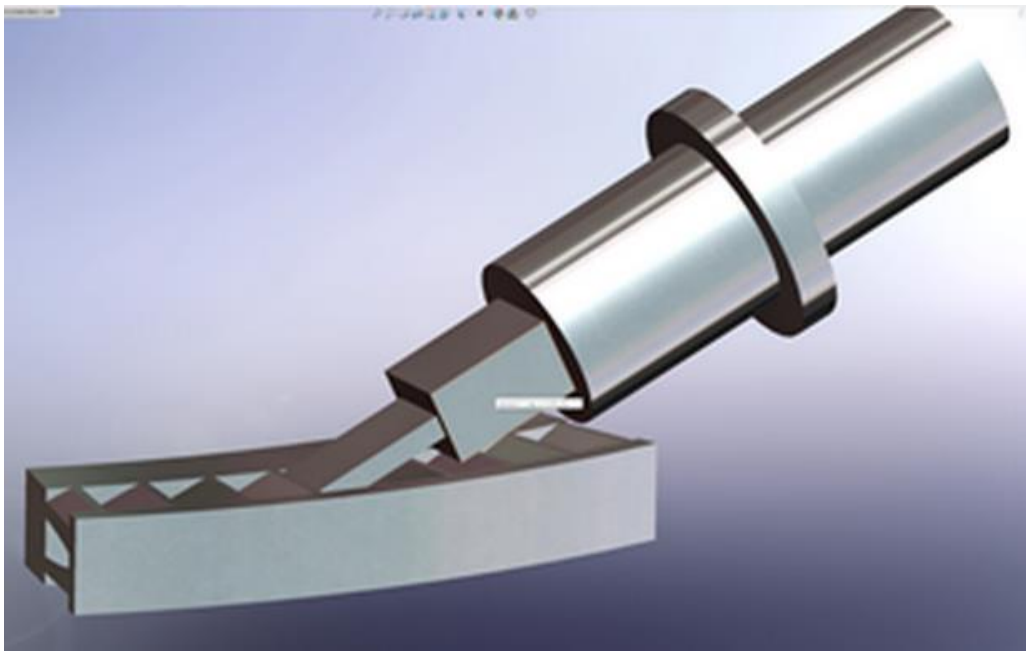


Рис. 2. Загальний вигляд моделі процесу обробки

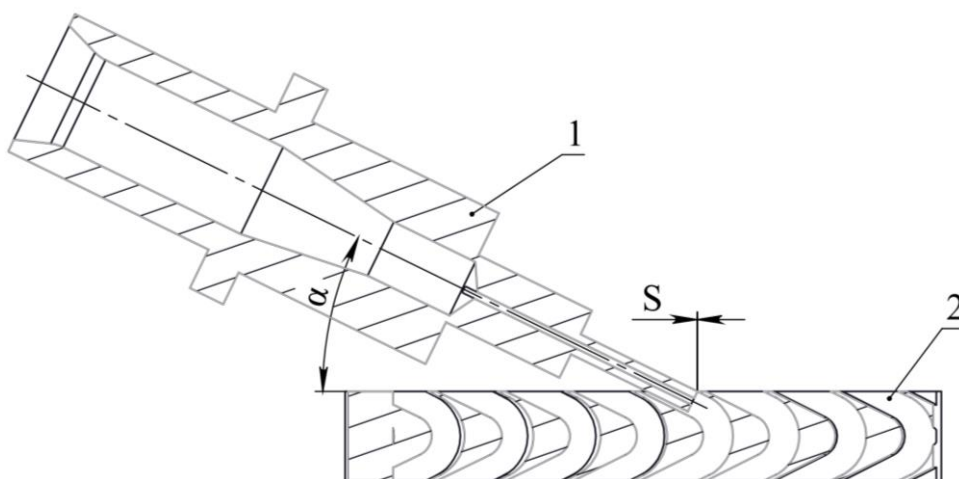
Моделювання здійснювалося з урахуванням реальних умов обробки за такими параметрами:

- тиск повітря на вході в сопло – 9 атм;
- температура на вході – 19 С°;
- температура навколишнього середовища – 19 С°;
- щільність частинок абразиву – 2500 кг/м³;
- мінімальний розмір частинок – 50 мкм;
- максимальний розмір частинок – 150 мкм;
- масова витрата частинок абразиву – 0,001 кг/с.

Для поглибленого вивчення явища нерівномірності ерозії було авторами було прийнято рішення кількості розрахункових випадків. В кожному розрахунковому випадку змінюється просторове положення сопла відносно каналу лопатки, незмінними залишаються тільки геометричні параметри сопла та відповідно каналу лопаток. Враховуючи геометричні параметри каналу (рис. 3) сопло можливо розташувати відносно каналу лопаток тільки під кутами α від 26°...40° із зазором між кромкою лопатки та соплом S від 0 до $6 \pm 0,5$ мм (див. рис. 3).



а



б

Рис. 3. Розташування сопла в каналі лопаток:

а – рендерігн; б – ескіз поперечного перетину осі каналу сопла та каналу лопаток;
1- сопло, 2 – сегмент лопаток

При збільшенні зазору S збільшується кут бокового розльоту абразивних частинок, що може спричинити пошкодження кромки лопатки. Тому виходячи з цих параметричних обмежень було розроблено 16 розрахункових варіантів, що були поділені на 4 блоки:

Варіант 1.1 – кут α 26° відстань $S=0$;
Варіант 1.3 – кут α 30° відстань $S=0$;
Варіант 1.5 – кут α 34° відстань $S=0$;
Варіант 1.7 – кут α 38° відстань $S=0$;
Варіант 2.1 – кут α 26° відстань $S=2$;
Варіант 2.3 – кут α 30° відстань $S=2$;
Варіант 2.5 – кут α 34° відстань $S=2$;
Варіант 2.7 – кут α 38° відстань $S=2$;
Варіант 3.1 – кут α 26° відстань $S=4$;
Варіант 3.3 – кут α 30° відстань $S=4$;
Варіант 3.5 – кут α 34° відстань $S=4$;
Варіант 3.7 – кут α 38° відстань $S=4$;
Варіант 4.1 – кут α 26° відстань $S=6$;
Варіант 4.3 – кут α 30° відстань $S=6$;
Варіант 4.5 – кут α 34° відстань $S=6$;
Варіант 4.7 – кут α 38° відстань $S=6$.

Кожен варіант відрізняється величиною зазору між кромкою лопатки та соплом а також кутом α , даний розподіл повинен показати динаміку зміну тих чи інших фізичних показників.

4. Результати

Виходячи з вхідних даних кожного варіанту для зручності аналізу їх можна розділити на 4 групи, варіанти групи 0 в яких спільний параметр $S=0$, група 2 в яких $S=2$ відповідно і т.д. Картина нерівномірності ерозії зображена на рис.1 відповідає значенню варіанту 1.1 що відповідає параметрам $\alpha=26^\circ$ та $S=0$. При аналізі спектру ерозії нульової групи (див. рис. 4-7) припустимо зробити висновок, що характер спектру зони обробки не зазнає кардинальних змін, а саме зона 2 залишається найбільш рівномірною, а для зон 1 та 3 характерні найбільші значення ерозії.

Для виявлення динаміки зміни величини ерозії було проведено аналіз розподілу її швидкостей вздовж вертикальної утворюючої лінії показано на рис. 4 відповідно по кожному з шістнадцяти варіантів.



Рис. 4. Графік швидкості ерозії вздовж вертикальної утворюючої лінії, варіант 1.1: $\alpha=26^\circ$ і $S=0$



Рис. 5. Графік швидкості ерозії вздовж вертикальної утворюючої лінії, варіант 1.3: $\alpha=30^\circ$ і $S=0$



Рис. 6. Графік швидкості ерозії вздовж вертикальної утворюючої лінії, варіант 1.5: $\alpha=34^\circ$ і $S=0$



Рис. 7. Графік швидкості ерозії вздовж вертикальної утворюючої лінії, варіант 1.7: $\alpha=38^\circ$ і $S=0$

5. Обговорення результатів

При візуальному аналізі даних розподілу швидкостей варіантів 1.1-4.7 видно, що загальний профіль графіка, який належить варіанту 1.1 також притаманний всім варіантам але з деякими відмінностями. Аналізуючи варіанти 1.1-1.7, спільний параметр в яких $S=0$, було виявлено, що довжина зони обробки суттєво не змінюється і залишається в діапазоні 8,1...8,3 мм, але при збільшенні кута α помітно що пікові значення зони II прагнуть вирівнятися зі значеннями зони I та III, аналогічна тенденція і у варіантах 2.1-4.7.

Даний аналіз дозволив авторам зробити висновок, що зміна положення сопла відносно каналу не спричиняє суттєвого впливу на профіль лінії обробки та характер розподілу величин ерозії в зоні обробки. Повторне вивчення отриманих даних настановило авторів на думку, що варто звернути увагу на діапазон зернистості абразиву, який знаходиться в межах 50-150 мкм та форму каналу сопла, теоретично ці два фактори можуть конкретним чином впливати на формування нерівномірного потоку абразивного струменя. Кожен з цих факторів необхідно проаналізувати окремо.

6. Формування задач додаткового дослідження

В процесі аналізу отриманих даних виникли дві задачі, необхідність вирішення яких полягає в поглибленому розумінні факторів, що можуть впливати на процес та якість обробки. Авторами було висунуто декілька задач, перша з яких полягає в тому, що нерівномірність розміру частинок може слугувати однією з основних причин нерівномірної концентрації ерозії, оскільки частинки абразиву більшого розміру мають більшу масу та відповідно більшу кінетичну енергію і як наслідок спричиняють більш значний вплив на поверхню жолоба лопатки ніж частинки з меншою масою. На рис. 8 показані траєкторії руху частинок в поздовжньому перерізі каналу, при цьому розмір частинок виділений окремим кольором спектру.

Сутність другої задачі полягає на оцінці характеру розподілу концентрації ерозії по I та III зонам (див. рис. 1) та розділення потоку частинок (див. рис. 8), даний факт спонукає зробити припущення, що в момент обробки в каналі сопла виникають внутрішні фізичні сили, що змушують частинки з більшою масою притискатись до бічних сторін прямого каналу сопла, чим в свою чергу і пояснюється характер картини ерозії.

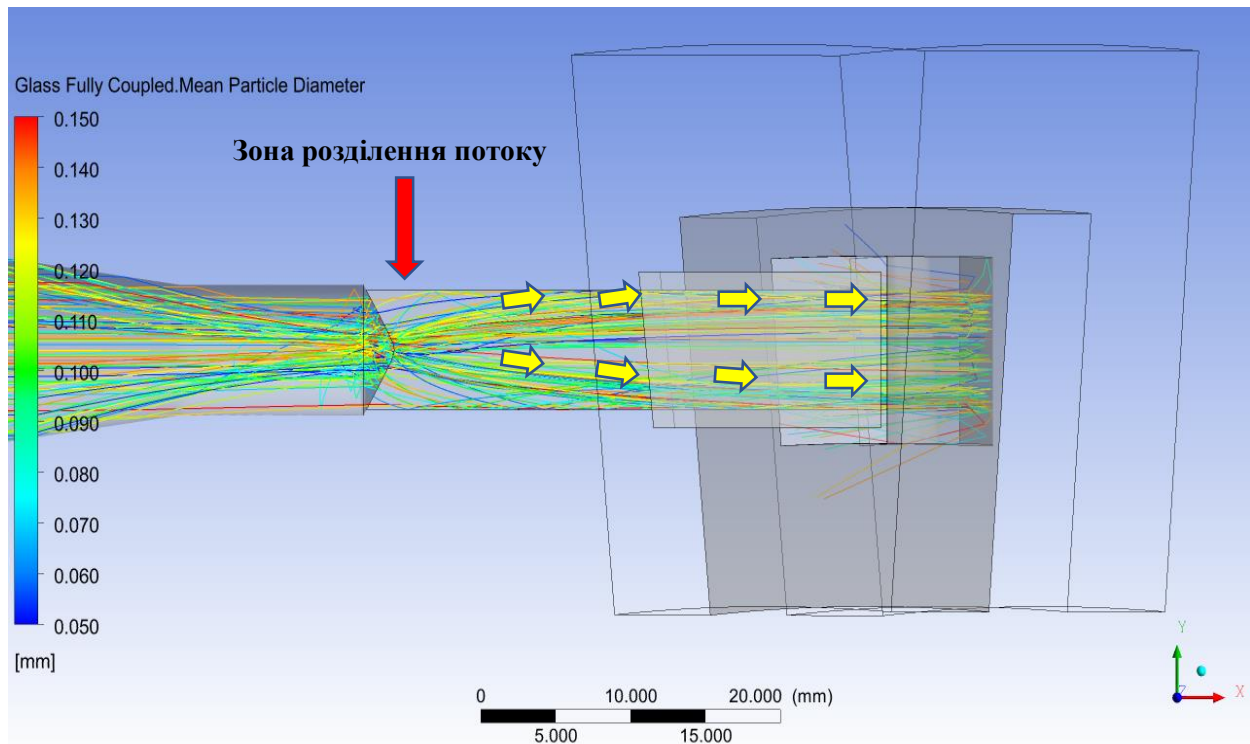


Рис. 8. Траскторія абразивних частинок
в поздовжньому перерізі каналу лопатки варіант 1.1

7. Вирішення першої задачі

Для підтвердження або спростування теорії впливу розмірності абразивних матеріалів, авторами прийнято рішення виконати повторне числове моделювання обробки абразивно-повітряним струменем жолоба лопатки закритого типу з не значними корективами вхідних даних, а саме заміна діапазону розміру абразивних частинок на сталу величину що відповідає значенню 100 мкм. Моделювання відбувалося за умовами варіанту 1.1, що передбачає розташування сопла відносно каналу під кутом $\alpha=26^\circ$ та відстань від сопла до кромки лопатки $S=0$.

Отримані результати моделювання рис. 9, показали що зміна зернистості частинок безпосереднім чином на розподіл концентрації ерозії, а саме спостерігається рівномірний її розподіл вздовж всієї зони обробки.

Основним аргументом першої гіпотези є порівняння картини інтенсивності ерозії до та після зміни вхідних даних розмірності абразивних частинок (див. рис. 1 та 9), про що свідчить і графік концентрації ерозії вздовж вертикальної утворюючої лінії (рис. 10) з якого видно що пікові значення зони II максимально прагнуть зрівнятися з максимальними значеннями зон I та Ш вздовж лінії обробки.

Отримані результати моделювання свідчать про те, що гіпотеза підтвердилась і різнозернистість аб-

разивних частинок негативно впливають на параметри якості обробки.

8. Вирішення другої задачі

Оцінюючи характер руху абразивних частинок по каналам сопла (див. рис. 8) ми спостерігаємо розділення основного потоку на дві частини, кожна з яких притиснута до бічної стінки прямого каналу сопла. На думку авторів дане явище викликане формою внутрішнього каналу сопла, а саме конусним переходом з каналу круглого перетину в прямокутний (рис. 11).

Авторами прийнято рішення внести конструктивні зміни у внутрішній перетин каналу сопла, а саме зменшення кута конусної частини переходу, що теоретично повинно позитивно вплинути на проходження абразивних частинок та формування їх однорідного потоку струменя та уникнення його розділення (рис. 12).

Контрольне моделювання абразивно-струменевої обробки каналу лопаток закритого типу з соплом доопрацьованої конструкції проводилась за такими умовами варіанту 5.1, що передбачає: кут $\alpha=26^\circ$, відстань від кромки лопатки до сопла становила $S=0$ мм а розмір абразивних частинок відповідав значенню 100 мкм. Аналіз даних рис. 13 показав, що картина інтенсивності ерозії кардинально відрізняється від попередніх результатів.

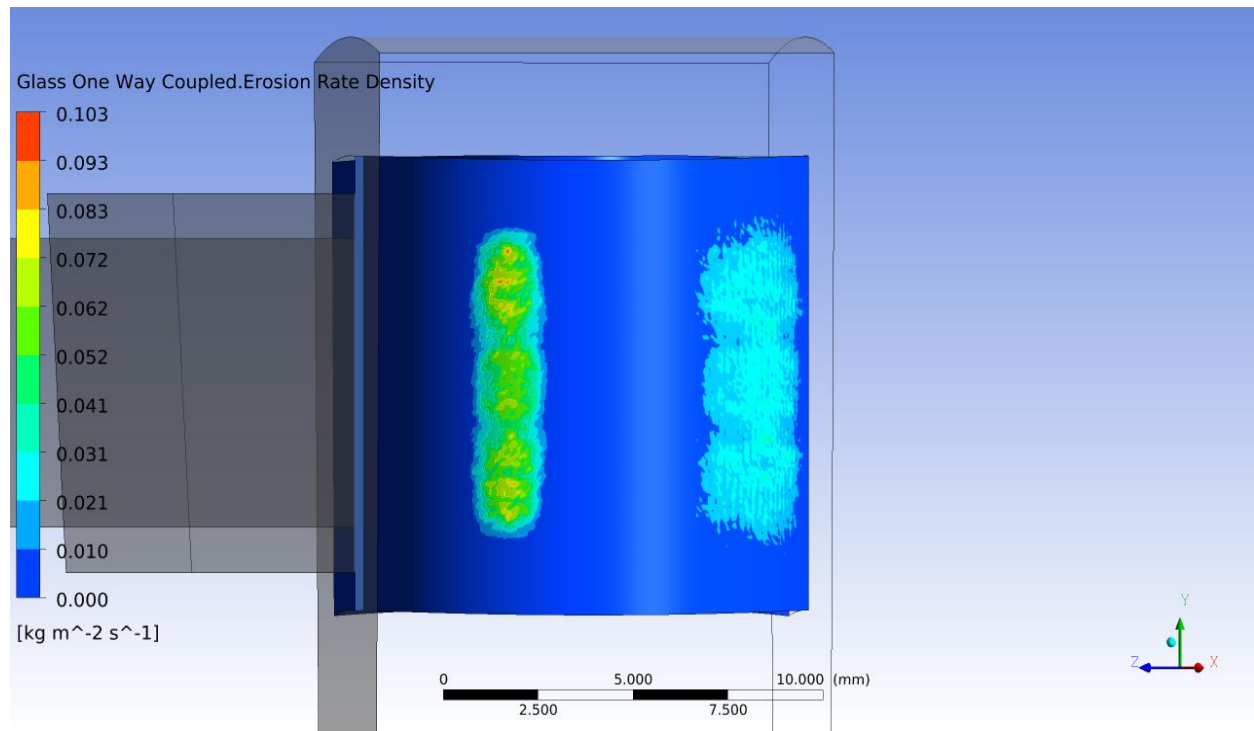


Рис. 9. Інтенсивність ерозії вздовж вертикальної утворюючої лінії
(контрольний варіант 1.0 $\alpha=26^\circ$, $S=0$, зернистість абразивних часток 100 мкм)



Рис. 10. Графік швидкості ерозії вздовж вертикальної утворюючої лінії,
(контрольний варіант 1.0 $\alpha=26^\circ$, $S=0$, зернистість абразивних часток 100 мкм)

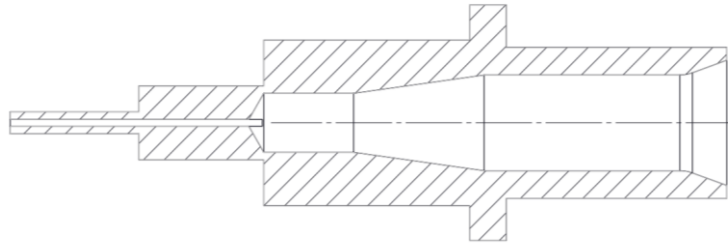


Рис. 11. Початковий варіант конструкції внутрішнього каналу сопла

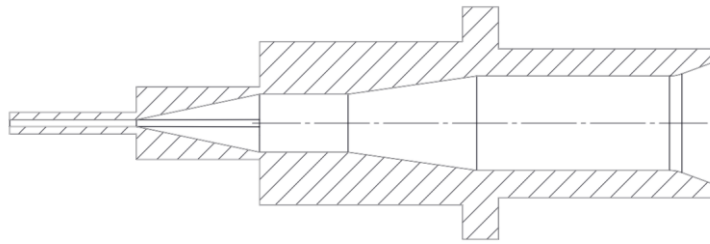
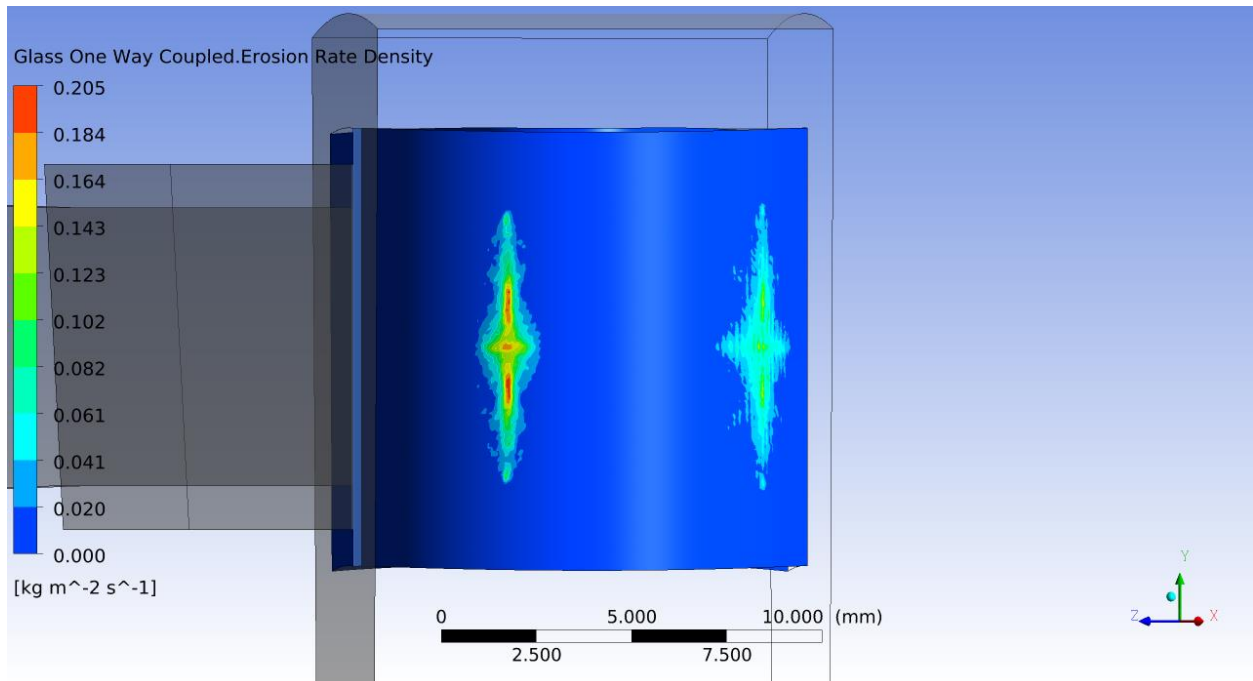


Рис. 12. Варіант конструкції внутрішнього каналу сопла після внесення конструктивних змін

Рис. 13. Інтенсивність ерозії вздовж вертикальної утворюючої лінії (варіант 5.1 $\alpha=26^\circ$, $S=0$, зернистість абразивних часток 100 мкм)

Отримані дані вказують на зменшення площі зони обробки в декілька разів, виявлення точкових зон з високою концентрацією ерозії, чого теоретично не повинно було статися враховуючи однорідність абразивних частинок, що відповідала значенню 100 мкм.

Отримані дані підтвердили що покращення аеродинамічних показників внутрішнього каналу сопла не забезпечить більш якісного впливу на поверхню лопатки при обробці, виходячи з цього дана теорія була спростована.

9. Обговорення результатів

Вперше, завдяки програмному комплексу ANSYS CFX методом кінцевих елементів, було проведено моделювання процесу абразивно-струменевої обробки лопаток турбін закритого типу виготовлених з жаростійкого сплаву Inconel 718. Результати моделювання дозволили досить зрозуміти та дослідити процеси та явища що відбуваються в зоні обробки, характер поведінки абразивних частинок чого на

практиці візуально дослідити неможливо через специфіку процесу. При дослідженні було сформульовано дві гіпотези, доведення кожної з яких дозволило глибше зрозуміти сутність процесів взаємодії абразивних частинок з оброблюваною поверхнею та можливі фактори які можуть впливають на якість обробки.

Одна з наведених гіпотез знайшла гарантоване підтвердження базуючись на даних дослідження. Відкриттям для авторів став той факт, що для забезпечення необхідної якості обробки, в першу чергу, надзвичайно важлива якість та однорідність абразивних частинок і тільки потім форма та параметри внутрішнього каналу сопла. Вивчаючи дані дослідження, автори рекомендують використовувати отримані результати дослідження при розробці нових або модернізації існуючих технологічних процесів при обробці таких деталей або деталей подібного типу.

Отримані результати мають надзвичайно високу цінність, як показало дослідження, являючись одними з ключових факторів забезпечення необхідної якості поверхні закритих лопаток при абразивного-струменевої обробці сухого типу.

Висновки

За допомогою пакету комп'ютерного газодинамічного аналізу ANSYS CFX нам вдалося змоделювати процеси, що відбуваються не тільки в середині каналу сопла а й в зоні обробки, виявити явище таке як, нерівномірність концентрації ерозії що запобігало не тільки забезпеченню необхідної якості поверхні але і могло привести до фізичного пошкодження лопатки. Розширений та поглиблений аналіз даних, дозволив авторам не тільки виявити основні фактори що мали ключовий вплив на якість поверхні при обробці, але і знайти шляхи їх вирішення, вірність яких базується на даних повторного чисельного моделювання з урахуванням виявлених факторів. Результати чисельного моделювання дозволили обґрунтувати параметри сопла, за допомогою якого подається абразивно-повітряна суміш в міжлопатковий канал. Важким відкриттям при дослідженні став той факт, що чим менший діапазон зернистості абразивних частинок тим краще це відображається на якості обробленої поверхні, ідеальним варіантом є однорідність розміру частинок. Ця умова має особливу цінність при проектування технологічного процесу обробки.

Картина траєкторії частинок показала додаткові поверхні з якими вони контактують крім основної зони обробки, даний аспект варто, як виявилось, враховувати при виборі положення сопла при обробці. Крім цього як показало дослідження, в першу чергу увагу варто приділяти якісному підбору абразивного

матеріалу, а саме однорідності розміру і тільки потім вибору геометричних параметрів абразивного сопла.

Внесок авторів: розробка методики та концепції дослідження – **О. В. Кулик**; аналіз даних математичного дослідження, пошук шляхів вирішення завдання розробки маршрутного технологічного процесу – **Ю. А. Шашко**.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

1. Шашко, Ю. А. Моделювання процесу обробки абразивно-повітряним струменем робочих поверхонь лопаток моноколів закритого типу отриманих адитивним методом [Текст] / Ю. А. Шашко // Вісник Дніпровського університету. Серія: Ракетно-космічна техніка. – 2023. – Том 32, № 5 (прийнята до публікації).
2. Hamed, A. Erosion and deposition in turbomachinery [Text] / A. Hamed, V. S. Tabakoff & R. V. Wenglarz // Journal of Propulsion and Power. – 2006. – Vol. 22, no. 2. – P. 350-360. DOI: 10.2514/1.18462.
3. Finishing of additively manufactured metal parts by abrasive flow machining [Text] / X. Wang, S. Li, Y. Fu, & H. Gao // In Proceedings of the 2016 International Solid Freeform Fabrication Symposium, University of Texas at Austin, Austin, TX, USA, 8–10 August 2016, pp. 2470-2472. Available at: <https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/89791>. – 12.07.2023.
4. Mali, H. S. Current status and application of abrasive flow finishing processes: A review [Text] / H. S. Mali & A. Manna // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 2009. – Vol. 223, iss. 7. – P. 809-820. DOI: 10.1243/09544054JEM131.
5. Jain, V. K. Experimental investigations into abrasive flow machining (AFM) [Text] / V. K. Jain & S. G. Adsul // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2000. – Vol. 40, iss. 7. – P. 1003-1021. DOI: 10.1016/S0890-6955(99)00114-5.
6. Shekhar, M. Diamond abrasive based cutting tool for processing of advanced engineering materials: A review [Text] / M. Shekhar & S. K. S. Yadav // Materials Today: Proceedings. – 2020. – Vol. 22, Part 4. – P. 3126-3135. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.03.449.
7. Mali, H. S. Simulation of surface generated during abrasive flow finishing of Al/SiCp-MMC using neural networks [Text] / H. S. Mali & A. Manna // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2012. – Vol. 61. – P. 1263-1268. DOI: 10.1007/s00170-012-4091-6.
8. Hybrid Abrasive Flow Machining for Nano Finishing – A Review [Text] / P. Ali, S. Dhull, R. Walia, Q. Murtaza & M. Tyagi // Materials Today: Proceedings. – 2017. – Vol. 4, Iss. 8. – P. 7208-7218. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.07.048.
9. Sankar, M. R. Nano-finishing studies using elastically dominant polymers blend abrasive flow

finishing medium [Text] / M. R. Sankar, V. K. Jain & K. P. Rajurkar // *Procedia CIRP*. – 2018. – Vol. 68. – P. 529-534. DOI: 10.1016/j.procir.2017.12.108.

10. Study of the Polishing Characteristics by Abrasive Flow Machining with a Rotating Device [Text] / K. C. Cheng, A. C. Wang, K. Y. Chen & C. Y. Huang // *Processes*. – 2022. – Vol. 10, Iss. 7. – Article no. 1362. DOI: 10.3390/pr10071362.

11. Kaynak, Y. Post-processing effects on the surface characteristics of Inconel 718 alloy fabricated by selective laser melting additive manufacturing [Text] / Y. Kaynak, E. Tascioglu // *Progress in Additive Manufacturing*. – 2020. – Vol. 5. – P. 221–234. DOI: 10.1007/s40964-019-00099-1.

12. Oka, Y. I. Practical Estimation of Erosion Damage Caused by Solid Particle Impact. Part 2: Mechanical Properties of Materials Directly Associated with Erosion Damage [Text] / Y. I. Oka & T. Yoshida // *Wear*. – 2005. – Vol. 259, Iss. 1-6. – P. 102-109. DOI: 10.1016/j.wear.2005.01.040.

13. Львов, П. Н. Износостойкость деталей строительных и дорожных машин [Текст] / П. Н. Львов. – М. : Машигиз, 1962. – 112 с.

14. Львов, П. Н. Абразивный износ и защита от него [Текст] / П. Н. Львов. – М. : Изд-во ЦБТИ, 1959. – 55 с.

15. Львов, П. Н. Основа абразивной износостойкости деталей строительных машин [Текст] / П. Н. Львов. – М. : Изд-во литературы по строительству, 1970. – 71 с.

16. Костецкий, Б. И. Структура и поверхностная прочность материалов при трении [Текст] / Б. И. Костецкий // *Проблемы прочности*. – 1981. – № 3. – С. 90–98.

17. Буше, Н. А. Сумісність поверхонь, що труться [Текст] / Н. А. Буше, В. В. Копитко. – М. : Наука, 1981. – 128 с.

18. Вибір оптимальних методів чистої обробки лопаток закритих моноколів турбонасосних агрегатів, отриманих адитивним методом прямого лазерного спікання порошку [Текст] / Ю. Шапко, О. Кулик, Р. Максимчук, & А. Санін // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2021. – № 4. – С. 53-62. DOI: 10.32620/aktt.2021.4.08.

References

1. Shashko, Yu. A. Modelyuvannya protsesu obrobky abrazyvno-povitryanym strumenem robochykh poverkhon' lopatok monokolis zakrytoho typu otrymanykh adytyvnym metodom [Modeling of the process of processing with an abrasive air jet of the working surfaces of the blades of closed-type monowheels obtained by the additive method]. *Journal of Rocket-Space Technology*, 2023, vol. 32, no. 5 (submitted for publication). (in Ukrainian).

2. Hamed, A., Tabakoff, V. S., & Wenglarz, R. V. Erosion and deposition in turbomachinery. *Journal of Propulsion and Power*, 2006, vol. 22, no. 2, pp. 350-360. DOI: 10.2514/1.18462.

3. Wang, X., Li, S., Fu, Y., & Gao, H. Finishing of additively manufactured metal parts by abrasive flow machining. In *Proceedings of the 2016 International Solid Freeform Fabrication Symposium, University of Texas at Austin*, Austin, TX, USA, 8–10 August 2016, pp. 2470-2472. Available at: <https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/89791>. (accessed 12.07.2023).

4. Mali, H. S., & Manna, A. Current status and application of abrasive flow finishing processes: A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2009, vol. 223, iss. 7, pp. 809-820. DOI: 10.1243/09544054JEM131.

5. Jain, V. K., & Adsul, S. G. Experimental investigations into abrasive flow machining (AFM). *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2000, vol. 40, iss. 7, pp. 1003-1021. DOI: 10.1016/S0890-6955(99)00114-5.

6. Shekhar, M., & Yadav, S. K. S. Diamond abrasive based cutting tool for processing of advanced engineering materials: A review. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 22, part 4, pp. 3126-3135. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.03.449.

7. Mali, H. S., & Manna, A. Simulation of surface generated during abrasive flow finishing of Al/SiCp-MMC using neural networks. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2012, vol. 61, pp. 1263-1268. DOI: 10.1007/s00170-012-4091-6.

8. Ali, P., Dhull, S., Walia, R., Murtaza, Q., & Tyagi, M. Hybrid Abrasive Flow Machining for Nano Finishing – A Review. *Materials Today: Proceedings*, 2017, vol. 4, iss. 8, pp. 7208-7218. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.07.048.

9. Sankar, M. R., Jain, V. K., & Rajurkar, K. P. Nano-finishing studies using elastically dominant polymers blend abrasive flow finishing medium. *Procedia CIRP*, 2018, vol. 68, pp. 529-534. DOI: 10.1016/j.procir.2017.12.108.

10. Cheng, K. C., Wang, A. C., Chen, K. Y., & Huang, C. Y. Study of the Polishing Characteristics by Abrasive Flow Machining with a Rotating Device. *Processes*, 2022, vol. 10, iss. 7, article no. 1362. DOI: 10.3390/pr10071362.

11. Kaynak, Y., & Tascioglu, E. Post-processing effects on the surface characteristics of Inconel 718 alloy fabricated by selective laser melting additive manufacturing. *Progress in Additive Manufacturing*, 2020, vol. 5, pp. 221-234. DOI: 10.1007/s40964-019-00099-1.

12. Oka, Y. I., & Yoshida, T. Practical Estimation of Erosion Damage Caused by Solid Particle Impact. Part 2: Mechanical Properties of Materials Directly Associated with Erosion Damage. *Wear*, 2005, vol. 259, iss. 1-6, pp. 102-109. DOI: 10.1016/j.wear.2005.01.040.

13. Lvov, P. N. *Iznosostoykost' detaley stroitel'nykh i dorozhnykh mashin* [Wear resistance of parts of construction and road machines]. Moscow, Mashgiz Publ., 1962. 112 p. (in Russian).

14. Lvov, P. N. *Abrazivnyy iznos i zashchita ot nego* [Abrasive wear and protection against it]. Moscow, Publishing house CBTI Publ., 1959. 55 p. (in Russian).

15. Lvov, P. N. *Osnova abrazivnoy iznosostoykosti detaley stroitel'nykh mashin* [The basis of abrasive wear resistance of construction parts machines]. Moscow, Publishing house of literature on construction Publ., 1970. 71 p. (in Russian).

16. Kostetsky, B. I. *Struktura i poverkhnostnaya prochnost' materialov pri trenii* [Structure and surface strength of materials during friction]. *Problemy prochnosti – Problems of strength*, 1981. no. 3, pp. 90-98. (in Russian).

17. Bushe, N. A., & Kopytko, V. V. *Sumisnist' poverkhon', shcho trut'sya* [Compatibility of rubbing surfaces]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 128 p.

18. Shashko, Yu., Kulyk, O., Maksymchuk, R., & Sanin, A. *Vybir optimal'nykh metodiv chystovoyi obrobky lopatok zakrytykh monokolis turbonasosnykh ahrehativ, otrymanykh adyativnym metodom pryamoho lazernoho spikannya poroshku* [Selection of optimal methods for finishing the blades of closed monowheels of turbopump units, obtained by the additive method of direct laser powder sintering]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2021, no. 4, pp. 53-62. DOI: 10.32620/aktt.2021.4.08. (In Ukrainian).

Надійшла до редакції 16.08.2023, розглянута на редколегії 20.09.2023

IMPROVEMENT OF THE PROCESS OF PROCESSING WITH AN ABRASIVE AIR BEAM OF THE WORKING SURFACES OF CLOSED-TYPE SINGLE-WHEEL BLADES ON THE BASE OF NUMERICAL MODELING DATA USING THE ANSYS CFX SOFTWARE COMPLEX

Yurii Shashko, Oleksiy Kulik

The correct choice of technological modes can guarantee the results of inkjet processing. However, the need to consider a significant amount of input data, namely the parameters of the equipment, the abrasive jet, the physical and mechanical properties of the material, and the shape of the processed product surfaces, as well as the lack of clear recommendations and technological data, significantly complicates the process. The **subject** of this study is the process of processing the surface of closed-type blades with an abrasive-air jet made in one piece with a disk of the "monowheel" type, using the SLM technology of Inconel 718 alloy. The **goal** of this task is to model the jet processing of closed-type monowheel blades using the ANSYS CFX finite element analysis software system. This article presents the results of numerical modeling of the surface treatment of closed turbine blades and the identification of technological factors that affect the roughness and quality of the surface of the compressed air environment on samples of closed turbine blades made of Inconel 718 alloy. The **task**: to develop a research plan and study the processing process and accompanying phenomena occurring during processing using the finite element method using the ANSYS CFX software complex, considering the physical and mechanical properties of the abrasive often, the environment, and the processed material. The following **results** were obtained: during mathematical modeling using the finite element method, data were obtained for sixteen calculation variants of blade surface treatment, from which the most optimal one was chosen, which provides the largest contact area of abrasive particles and their uniform interaction with the processing surface. In addition, during the research, the impact of "unevenness of erosion" and the graininess of abrasive materials on the quality of the treated surface was studied. Further analysis of the data of the research results made it possible to find ways to solve these tasks, which was confirmed by the control and verification results. **Conclusions**. The scientific novelty of the obtained results is as follows: for the first time, the processing of closed turbine blades made in one piece with a "monowheel" type disk and obtained by the additive method with an abrasive air jet was investigated. The obtained research data were used as a basis for developing a real route technological process for processing closed-type turbine blades manufactured using the additive method.

Keywords: roughness; blasting; ANSYS CFX; additive technologies; closed blades; abrasive materials; abrasive jet processing; Inconel 718; monowheel; SLM.

Шашко Юрій Анатолійович – асп. каф. технології виробництва, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна.

Кулик Олексій Володимирович – канд. техн. наук, доц., доц. каф. технології виробництва, Дніпровський національний університет ім. Олеся Гончара, Дніпро, Україна.

Yurii Shashko – PhD Student at Production Technology Department, Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine,
e-mail: rockefeller260893@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6962-440X.

Oleksiy Kulyk – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Production Technologies Department, Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine,
e-mail: kulyk@ftf.dnu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-2913-4462, Scopus Author ID: 35847695900.