

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
Міністерство освіти і науки України
Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ШАШКО ЮРІЙ АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 629.76:621.924.9]-253.5(043.3)

ДИСЕРТАЦІЯ

Розробка технології чистової обробки лопаток турбіни турбонасосного агрегату, виготовлених методом 3D друку

134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка

13 Механічна інженерія

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

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

підпис

Ю.А. Шашко

Науковий керівник – Кулик Олексій Володимирович, кандидат
технічних наук, доцент

Дніпро – 2023 рік

АНОТАЦІЯ

Шашко Ю.А. Розробка технології чистової обробки лопаток турбіни турбонасосних агрегатів, виготовлених методом 3d друку — Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка. — Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара.— Дніпро, 2023.

Дисертаційну роботу присвячено розробці і впровадженню технології чистової обробки лопаток турбін турбонасосних агрегатів виготовлених адитивним методом. Космічна галузь займає пріоритетне місце в економіці кожної провідної держави, досягнення в цьому секторі забезпечують лідерські позиції на міжнародному ринку космічних технологій а також додають певну вагу в питанні освоєння космічного простору. В кожній країні до складу даної галузі входить ціла низка високотехнологічних підприємств, що займають значний сектор в економіки та представляють державу на світовому ринку.

Ракетно-космічна техніка пройшла значний шлях технологічного розвитку, використовуючи найсучасніші методи проектування, конструювання та виробництва. Використання в ракетній техніці значної кількості складних процесів та принципів, потребує виготовлення деталей вузлів та агрегатів, здатних працювати на межі можливостей використовуваних матеріалів. Прикладом таких процесів є виробництво турбонасосних агрегатів (ТНА), що є одним з найважливіших елементів рідинного ракетного двигуна, завдання якого полягає в здійсненні подачі паливних компонентів в камеру згорання.

Жорсткі умови роботи та конструктивна складність деталей ТНА висувають високі вимоги якості до їх виготовлення, а саме: надійно забезпечувати безперебійну подачу необхідної кількості компонентів у камеру згорання з необхідним тиском для забезпечення максимальної продуктивності (ККД) турбонасосного агрегату; турбіна повинна мати високу кутову швидкість без застосування механічних передач обертання; точність

посадкових місць повинна відповідати 7-12 квалітетам; биття зовнішніх посадкових місць відносно осі ротора та центральної виточки отвору повинно знаходитись в межах 0,001-0,1 мм; максимальний дисбаланс дисків турбін не більше 5 гс/см на плече в 100 мм; поверхні диска турбіни задля уникнення концентрації напруження не повинні мати рисок та різних переходів; шорсткість лопаток не більше $Ra=0,63\dots0,8$.

Одним з основних елементів турбонасосного агрегату є робоче колесо турбіни, що експлуатується при високотемпературних навантаженнях та виготовляються з жаростійких матеріалів. В процесі конструювання дисків турбін велика увага приділяється раціональному способу кріплення лопаток з точки зору конструктивної міцності та технологічності конструкції. Найбільш оптимальним типом конструкції є турбіни з лопатками закритого типу (з бандажем) виконані за одне ціле з диском. Бандажне кільце відіграє важливу роль в конструкції та роботі турбіни в цілому, такий тип турбін називається закритим.

Традиційне виготовлення деталей подібного типу забезпечується використанням освоєних наукомістких технологій таких як, лиття під тиском або за витоплюваними моделями. Турбіна ТНА повинна мати джерело енергії (гезогенератор або шаробалони з газом під високим тиском) з мінімальним підвищенням маси конструкції та легко переходити від одного режиму роботи до іншого. Колесо турбіни має лопатки спеціального профілю які сприймають дію генераторного газу і передають обертовий момент на вал.

Основними і необхідними вимогами при чистовій обробці поверхонь лопаток є забезпечення шорсткості поверхні з параметром не вище $Ra\ 0.8$ та точності форми профілю лопатки, що безпосередньо впливає на газодинамічну характеристику турбіни в цілому. Необхідність забезпечення високої чистоти поверхні лопаток закритих моноколів обумовлена специфікою роботи у агресивному середовищі з досить високими температурами.

Ще однією особливістю виробництва ракетно-космічних апаратів є застосування великої кількості складних технологічних процесів, унікального виробничого та випробувального обладнання, що зумовлює великі витрати, і як наслідок, збільшення собівартості виробів. Вітчизняне ракетно-космічне виробництво потребує глибокої модернізації, а саме продуктивних, дешевих методів виготовлення та обробки відповідальних виробів таких як лопатки турбін закритого типу виконані за одне ціле з диском.

Саме тому сучасний технологічний розвиток ракетно-космічного машинобудування спрямований на створення і впровадження новітніх технологій, що дозволяють суттєво зменшити витрати і терміни виробництва ракетно-космічної техніки та спростити виготовлення окремих вузлів, агрегатів і ракет-носіїв в цілому. До таких технологій відносяться адитивні методи виробництва, серед яких особливе місце займають технології 3D-друку методом селективного лазерного плавлення (SLM). Вони дозволяють виготовляти деталі за цифровими моделями методом пошарового додавання матеріалу. При цьому отримання виробу відбувається крок за кроком, безпосередньо формуванням шару матеріалу, його затвердінням та фіксацією з попереднім шаром у відповідності з даними CAD моделі.

В якості джерела енергії може використовуватись електронний або лазерний промінь. В першу чергу, інтерес до SLM-технологій виник в авіації, медицині та космічній промисловості, основним рушієм яких є економічна раціональність. Застосування цих технологій дозволяє створювати деталі зі складною геометрією, мінімальною масою конструкції, збереженням високих міцнісних характеристик. Для металів деталей, отриманих даною технологією, характерна дрібнозерниста структура, при цьому їх механічні властивості повторювані і часто перевищують аналогічні властивості аналогічних металів у виробках, отриманих, наприклад, штампуванням або литтям. Однак виготовлені адитивним методом лопатки робочих коліс турбін мають серйозні недоліки, а саме ускладнена навіть часто неможлива обробка робочих поверхонь звичайним різальним інструментом неможливо

реалізувати через незначні зазори між поверхнями лопаток (2...3,5 мм) та наявністю бандажного кільця.

Крім того SLM-технології мають і деякі недоліки, пов'язані з виникненням дефектів, викликаних локальною дією променя – напруження, усадка металу, пористість та інше. Макро- і мікрогеометрія поверхонь деталей, мікроструктура їх матеріалу у значній мірі залежить від конкретного методу сплавлення і технологічних параметрів процесу. Проблемою таких технологій є велика шорсткість поверхні матеріалу надрукованого виробу, яка для кожного використовуваного металу, залежить від режимів сплавлення, властивостей вихідного порошку та положення поверхні при друкуванні.

Пошук або розробка методів зниження шорсткості поверхонь виробів, отриманих за SLM-технологією, є важливим напрямком досліджень, особливо для закритих або внутрішніх криволінійних поверхонь з обмеженим доступом, як-то внутрішні поверхні відцентрових коліс насосів або закритих лопаткових каналів робочих моноколів турбін турбонасосних агрегатів.

Завданням даної роботи є розробка ефективної технології обробки закритих поверхонь лопаткових каналів коліс турбін, виготовлених за SLM-технологією, як способу зниження їх шорсткості. Складність обробки закритих поверхонь деталей подібного типу полягає у неможливості застосування існуючих методів механічного і хімічного фрезерування або шліфування з причин відсутності доступу інструменту до зони обробки в зв'язку з особливостями форми закритих каналів та їх розташуванням в деталі. Аналіз можливих методів обробки закритих поверхонь лопаткових каналів коліс турбін показав, що використання абразивно-струменевої обробки та її різновиду – бластингу відкриває перспективи для розробки ефективного методу зниження шорсткості складнопрофільних закритих поверхонь турбін, за умов відповідної адаптації існуючих способів абразивно-струменевої обробки, встановлення закономірностей впливу параметрів обробки на кінцеву шорсткість поверхонь, удосконалення технологічного оснащення, розробки технологічного процесу та впровадження його у виробництво.

В процесі розробки ефективного методу зниження шорсткості складнопрофільних закритих поверхонь турбін було вирішено ряд важливих задач:

- виконано порівняльний аналіз існуючих та можливих методів обробки робочих поверхонь лопаток та деталей подібного типу, на основі якого визначено і обґрунтовано метод абразивно-струменевої чистової обробки робочих поверхонь лопаток закритого типу (з бандажем), як найбільш ефективний;

- розроблено методику оцінки шорсткості складнопрофільних закритих поверхонь лопаток турбін;

- проведено моделювання процесу абразивно-струменевої обробки методом кінцевих елементів, що дало змогу більш детально дослідити закономірності обробки, виявити ключові фактори, що впливають на кінцевий результат, та на їх основі обрати найбільш ефективні параметри обробки;

- проведено експериментальні дослідження впливу абразивного матеріалу на зразках-свідках, для підтвердження ефективності обраних режимів обробки і типу абразивного матеріалу;

- здійснене дооснащення технологічного обладнання, що дозволило зробити процес обробки складнопрофільних закритих поверхонь лопаток турбін більш ефективним та контрольованим.

Таким чином, у дисертаційній роботі розв'язано актуальну науково-практичну задачу із забезпечення необхідного рівня шорсткості складнопрофільних закритих поверхонь турбіни у відповідності до вимог конструкторської документації, шляхом розробки ефективної технології абразивно-струменевої обробки.

Ключові слова: адитивні технології, турбонасосний агрегат, лопатки турбін закритого типу, SLM-технології, абразивно-струменева обробка, складнопрофільні поверхні, шорсткість, моделювання процесу обробки.

SUMMARY

Shashko Yu.A. Development of the technology for finishing the turbine blades of turbopump units made by the 3d printing method — Qualifying scientific work with manuscript rights. Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 134 Aviation and rocket and space engineering. - Dnipro National University named after Oles Honchar.— Dnipro, 2023. The dissertation work is devoted to the development and implementation of the technology of final processing of turbine blades of turbopump units manufactured by the additive method. The space industry occupies a priority place in the economy of every leading state, achievements in this sector provide leadership positions in the international market of space technologies and also add a certain weight to the issue of space exploration. In each country, this industry includes a number of high-tech enterprises that occupy a significant sector of the economy and represent the state on the world market.

Rocket and space technology has gone through a significant path of technological development, using the most modern methods of design, construction and production. The use of a significant number of complex processes and principles in rocket technology requires the manufacture of parts of assemblies and units capable of working at the limit of the capabilities of the materials used. An example of such processes is the production of turbopump units (TNA), which is one of the most important elements of a liquid rocket engine, the task of which is to supply fuel components to the combustion chamber. The harsh working conditions and structural complexity of TNA parts impose high quality requirements for their manufacture, namely: reliably ensure uninterrupted supply of the required number of components into the combustion chamber with the required pressure to ensure maximum performance (efficiency) of the turbopump unit; the turbine must have a high angular speed without the use of mechanical rotation gears; the accuracy of seats must correspond to 7-12 qualities; the runout of the external seats relative to the axis of the rotor and the central recess of the hole should be within 0.001-0.1 mm; the maximum unbalance of the turbine discs is no more than 5 gs/cm per

shoulder of 100 mm; the surfaces of the turbine disc should not have scratches and various transitions in order to avoid stress concentration; the roughness of the blades is no more than $Ra=0.63...0.8$.

One of the main elements of the turbopump unit is the turbine impeller, which is operated under high-temperature loads and is made of heat-resistant materials. In the process of designing turbine discs, great attention is paid to the rational way of fastening the blades from the point of view of structural strength and manufacturability of the structure. The most optimal type of design is turbines with blades of a closed type (with a bandage) made as one unit with a disk. The tire ring plays an important role in the design and operation of the turbine as a whole, this type of turbine is called closed.

The traditional production of parts of this type is ensured by the use of mastered science-intensive technologies such as injection molding or melting models. The TNA turbine should have an energy source (gas generator or high-pressure gas cylinders) with a minimal increase in structural weight and easily switch from one operating mode to another. The turbine wheel has blades of a special profile that perceive the action of the generator gas and transmit the torque to the shaft.

The main and necessary requirements for finishing the surfaces of the blades are to ensure the surface roughness with a parameter not higher than $Ra\ 0.8$ and the accuracy of the shape of the blade profile, which directly affects the gas-dynamic characteristics of the turbine as a whole. The need to ensure high cleanliness of the surface of the blades of closed monowheels is due to the specifics of working in an aggressive environment with fairly high temperatures. Another feature of the production of rocket and space vehicles is the use of a large number of complex technological processes, unique production and testing equipment, which leads to large costs, and as a result, an increase in the cost of products. The domestic rocket and space industry needs deep modernization, namely, productive, cheap methods of manufacturing and processing responsible products, such as blades of closed-type turbines made as one unit with a disk.

That is why the modern technological development of rocket and space engineering is aimed at the creation and implementation of the latest technologies that allow to significantly reduce the costs and terms of production of rocket and space technology and to simplify the manufacture of individual components, aggregates and launch vehicles as a whole. Such technologies include additive manufacturing methods, among which 3D printing technologies using selective laser melting (SLM) occupy a special place. They allow the production of parts based on digital models by the method of layer-by-layer addition of material. At the same time, the product is obtained step by step, directly by the formation of a layer of material, its hardening and fixation with the previous layer in accordance with the data of the CAD model.

An electron or laser beam can be used as an energy source. First of all, interest in SLM technologies arose in aviation, medicine and the space industry, the main driver of which is economic rationality. The use of these technologies allows you to create parts with complex geometry, minimal structural weight, and preservation of high strength characteristics. The metals of parts obtained by this technology have a characteristic fine-grained structure, while their mechanical properties are repeated and often exceed the similar properties of similar metals in products obtained, for example, by stamping or casting. However, the blades of turbine working wheels manufactured by the additive method have serious drawbacks, namely, the complicated and often impossible processing of the working surfaces with a conventional cutting tool cannot be implemented due to the small gaps between the surfaces of the blades (2...3.5 mm) and the presence of a banding ring. In addition, SLM technologies have some disadvantages associated with the appearance of defects caused by the local effect of the beam - stress, metal shrinkage, porosity, etc. The macro- and microgeometry of the surfaces of parts, the microstructure of their material largely depends on the specific fusion method and technological parameters of the process. The problem of such technologies is the high roughness of the surface of the material of the printed product, which for each metal used depends on the

alloying modes, the properties of the original powder and the position of the surface during printing.

The search or development of methods for reducing the roughness of the surfaces of products obtained by SLM technology is an important direction of research, especially for closed or internal curved surfaces with limited access, such as the internal surfaces of centrifugal pump wheels or closed blade channels of working monowheels of turbines of turbopump units.

The **task of this work** is to develop an effective technology for processing the closed surfaces of blade channels of turbine wheels, manufactured using SLM technology, as a way to reduce their roughness. The difficulty of processing the closed surfaces of parts of this type is the impossibility of using existing methods of mechanical and chemical milling or grinding due to the lack of access of the tool to the processing area due to the peculiarities of the shape of the closed channels and their location in the part. The analysis of possible methods of processing the closed surfaces of the blade channels of turbine wheels showed that the use of abrasive blasting and its variant - blasting opens up prospects for the development of an effective method of reducing the roughness of closed surfaces of complex turbines, under the conditions of appropriate adaptation of existing methods of abrasive blasting, establishing patterns of influence processing parameters for the final surface roughness, improvement of technological equipment, development of the technological process and its introduction into production.

In the process of developing an effective method for reducing the roughness of closed surfaces of complex turbines, a number of important problems were solved:

- a comparative analysis of existing and possible methods of processing the working surfaces of blades and parts of a similar type was performed, on the basis of which the method of abrasive jet finishing of the working surfaces of closed type blades (with a bandage) was determined and substantiated as the most effective;
- developed a methodology for assessing the roughness of closed surfaces of turbine blades with a complex profile;

- simulation of the process of abrasive blasting using the finite element method was carried out, which made it possible to investigate the regularities of processing in more detail, to identify key factors affecting the final result, and on their basis to choose the most effective processing parameters;

- experimental studies of the effect of abrasive material on witness samples were carried out to confirm the effectiveness of the selected processing modes and type of abrasive material;

- technological equipment was upgraded, which made it possible to make the process of processing complex profiled closed surfaces of turbine blades more effective and controlled.

Thus, the actual scientific and practical problem of ensuring the necessary level of roughness of closed surfaces of the turbine in accordance with the requirements of the design documentation was solved in the dissertation work, by developing an effective technology of abrasive blasting.

Key words: additive technologies, turbopump unit, closed type turbine blades, SLM technologies, abrasive jet processing, complex profile surfaces, roughness, modeling of the processing process.

Публікації, в яких оприлюднено основні наукові результати дисертації

1. Шашко Ю.А., Казеєв С.В., Аджамський С.В., Кулик О.В., Санін А.Ф.(2021). Аналіз можливості та перспективи використання методу бластингу при чистовій обробці закритих лопаток моноколіс турбін, виготовлених адитивним методом за технологією slm. *Journal of Rocket-Space Technology*, 4(T29), 132-137. <https://doi.org/10.15421/452114>
<https://rocketspace.dp.ua/index.php/rst/article/view/116>
2. Шашко Ю.А., Казеєв С.В., Аджамський С.В., Кулик О.В., Максимчук Р.Ф.(2022). Застосування сухої абразивної обробки та експериментальний підбір матеріалів для чистової обробки лопаток

- закритого типу. *Journal of Rocket-Space Technology*, 4(T30), 51-56.
<https://doi.org/10.15421/452208>
<https://rocketspace.dp.ua/index.php/rst/article/view/141>
3. Шашко Ю.А., С.В., Кулик О.В., Максимчук Р.Ф., Санін А.Ф.,(2021). Вибір оптимальних методів чистової обробки лопаток закритих моноколів турбонасосних агрегатів, отриманих адитивним методом прямого лазерного спікання порошку. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*, 4(172), 53–62. <https://doi.org/10.32620/aktt.2021.4.08>
<http://nti.khai.edu/ojs/index.php/aktt/article/view/aktt.2021.4.08>
 4. Shashko, Y. (2023). 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*, 31(4), 121-127. <https://doi.org/10.15421/452316>
<https://rocketspace.dp.ua/index.php/rst/article/view/183>
 5. Ю.А. Шашко, О. В. Кулик. Вдосконалення процесу обробки абразивно-повітряним струменем робочих поверхонь лопаток моноколів закритого типу на основі даних чисельного моделювання за допомогою програмного комплексу ansys cfx: *Авіаційно-космічна техніка і технологія*, 2023, №5(191), 55–68, Index Copernicus
<https://doi.org/10.32620/aktt.2023.5.05>
<http://nti.khai.edu/ojs/index.php/aktt/article/view/aktt.2023.5.05>

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	2
ЗМІСТ	13
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	16
ВСТУП	17
1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НЕОБХІДНОЇ ЯКОСТІ ОБРОБКИ	23
1.1 Передумова та мотивація	23
1.2 Конструктивно-технологічні особливості турбін турбонасосних агрегатів	24
1.3 Методи отримання заготовок дисків турбін ТНА	27
1.4 Методи забезпечення чистоти поверхні лопаток робочих коліс турбін	37
1.5 Визначення напрямків дослідження.....	64
Висновки за розділом 1	65
2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ.....	66
2.1 Аналіз існуючої методики підготовки зразків	66
2.2 Створення 3D-моделей зразків	67
2.3 Розробка методики підготовки зразків	69
2.4 Методика дослідження та оцінки якості поверхні	74
2.5 Опис конструкції та методика вимірювання шорсткості поверхні на подвійному мікроскопі Линника МІС-11	76
2.6 Рекомендації з підбору та підготовки абразивних матеріалів	81
2.7 Ієрархія абразивних матеріалів за шкалою Мооса.....	83
2.8 Опис та будова обладнання абразивно-струменевої обробки.....	89
2.9 Вибір програмного забезпечення для моделювання процесу обробки в середовищі ANSYS	91
Висновки за розділом 2.....	92
3 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СУХОЇ АБРАЗІВНО-СТРУМЕНЕВОЇ ОБРОБКИ ПОВЕРХОНЬ ЛОПАТОК ЗАКРИТОГО ТИПУ МЕТОДОМ КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ В ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ ANSYS CFX	93

3.2 АНАЛІЗ ШВИДКОСТЕЙ ЕРОЗІЇ ТА ВЕЛИЧИН ЇХ ДІЛЯНОК ВЗДОВЖ ГОРИЗОНТАЛЬНОЇ УТВОРЮЮЧОЇ ЛІНІЇ	103
3.3 АНАЛІЗ ШВИДКОСТЕЙ ЕРОЗІЇ ТА ВЕЛИЧИН ЇХ ДІЛЯНОК ВЗДОВЖ ВЕРТИКАЛЬНОЇ УТВОРЮЮЧОЇ ЛІНІЇ	117
3.4 ВИРІШЕННЯ ЗАВДАННЯ	119
3.5 ВПЛИВ РІЗНОЗЕРНИСТОСТІ АБРАЗИВНОГО МАТЕРІАЛУ ЗЕРНИСТОСТІ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЯКІСТЬ ОБРОБКИ	128
3.6 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РІЗНОЗЕРНИСТОСТІ АБРАЗИВНОГО МАТЕРІАЛУ ЗЕРНИСТОСТІ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЯКІСТЬ ОБРОБКИ.....	129
3.7 ВПЛИВ ФОРМИ ВНУТРІШНЬОГО КАНАЛУ СОПЛА НА ПАРАМЕТРИ ОБРОБКИ ТА ШОРСТКІСТЬ ПОВЕРХНІ ЛОПАТОК	132
3.8 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ФОРМИ ВНУТРІШНЬОГО КАНАЛУ СОПЛА НА ПАРАМЕТРИ ОБРОБКИ ТА ШОРСТКІСТЬ ПОВЕРХНІ ЛОПАТОК.....	132
Висновки за розділом 3.....	134
 4 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	136
 4.1 ВИМІРЮВАННЯ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХОНЬ ЗАКРИТИХ ЛОПАТОК ПІСЛЯ 3D-ДРУКУ	136
4.2 МЕТОДИКА ВІДБОРУ АБРАЗИВНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ОБРОБКИ	142
4.3 ОБРОБКА ЗРАЗКІВ	144
4.3.1 ОБРОБКА СКЛЯНИМИ КУЛЬКАМИ.....	145
4.3.2 ОБРОБКА ЗРАЗКА ЕЛЕКТРОКОРУНДОМ НОРМАЛЬНИМ 14А.....	147
4.3.3 ОБРОБКА ЗРАЗКА ГОРІХОВОЮ КРИХТОЮ	148
4.3.4 ОБРОБКА ЗРАЗКА МАРШАЛІТОМ.....	149
4.4 УСУНЕННЯ КОНСТРУКТИВНОГО НЕДОЛІКУ ОБЛАДНАННЯ.....	150
4.5 ОБРОБКА МІЖЛОПАТКОВОГО КАНАЛУ СЕГМЕНТА ЛОПАТОК ТУРБИНИ ЗАКРИТОГО ТИПУ	152
4.6 ПІДГОТОВКА ДО АБРАЗИВНО-СТРУМЕНЕВОЇ ОБРОБКИ.....	153
4.7 ПРОВЕДЕННЯ ОБРОБКИ	154
4.8 ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНИХ РЕЖИМІВ ОБРОБКИ	155
Висновки за розділом 4.....	159
 5 РОЗРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МАРШРУТНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ ЛОПАТОК ЗАКРИТОГО ТИПУ	161
 5.1 РЕКОМЕНДАЦІЇ ПРИ РОЗРОБЦІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ	161
5.2 РОЗРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МАРШРУТНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ	163
Висновки до розділу 5.....	165
 ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	166

	15
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	168
ДОДАТОК А.....	187
ДОДАТОК Б	189

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ТНА	-	турбонасосний агрегат
ККД	-	коефіцієнт корисної дії
EDM/ЕЕО	-	Електроерозійна обробка (Electrical discharge machining)
SLM	-	Вибіркове лазерне плавлення (selective laser melting)
DMLS	-	Пряме лазерне спікання (Direct Metal Laser Sintering)
WEDM	-	Електроерозійна обробка дротом (Wire Electrical discharge machining)
ГП	-	Гаряче ізостатичне пресування
МАО	-	Магнітно-абразивна обробка
ММ	-	Магнітно-абразивні матеріали
МАІ	-	Магнітно-абразивний інструмент
РКТ	-	ракетно-космічна техніка
ФАП	-	Фероабразивний порошок
ГАО	-	Гідроабразивна обробка
ГТД	-	Газотурбінні двигуни
КСО	-	Камера струменевого очищення
ЕСМ/ЕХО	-	Електрохімічна обробка (Electrochemical machining)
РЕСМ	-	Роботизована електрохімічна обробка (robotic electrochemical machining)
РАНС	-	Рівняння Нав'є-Стокса усереднені по Рейнольдсу (Reynolds-averaged Navier–Stokes)
РКЛА	-	Ракетно-космічні літальні апарати
ТО	-	Термічна обробка

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження

Робоче колесо турбіни турбонасосного агрегату (ТНА) є однією з найбільш відповідальних деталей, що забезпечує стабільну роботу насосів та двигунної установки (ДУ) в цілому. Однак виготовлення робочих коліс турбіни закритого типу (з бандажем) існуючими методами досить складне і має високу собівартість одиниці виробу при незначних об'ємах виробництва. В останні два десятиріччя у ракетній техніці активно розвинулись адитивні технології, такі як 3D-друк за SLM-технологією, які дозволили спростити процес виготовлення складних виробів, підвищити їх якість, зменшити час на технологічну підготовку виробництва, тощо. Однак виготовлені методом 3D-друку суцільні робочі колеса турбіни ТНА мають недолік, а саме – високу шорсткість поверхонь лопаток турбіни, обробка яких різальним інструментом або фізико-хімічними методами неможлива з причин малих зазорів між поверхнями лопаток (2...3,5 мм), складної форми лопаткових каналів та наявністю бандажного кільця.

Автором вирішується завдання розробки ефективної технології чистової обробки складнодоступних поверхонь лопаток робочого колеса турбіни закритого типу (з бандажним кільцем), виготовленого із жароміцного нікелевого сплаву Inconel 718 за SLM технологією 3D-друку, яка задовольняє вимоги конструкторської документації із забезпечення шорсткості поверхні з параметром не вище Ra 0.8 та збереженні точності форми профілю лопатки, що має вагомий вплив на газодинамічні характеристики турбіни в цілому.

Актуальність наявної задачі окреслила **тематику, мету та завдання даної роботи**, а саме комплексного дослідження обраного методу – абразивно-струменевої обробки, розробки методики та рекомендацій, які б дозволили більш якісно розробляти технологічні процеси та дали змогу розширити сферу застосування даного методу та впровадити в авіаційній та ракетно-космічній галузях промисловості України.

Мета дослідження

Метою дисертаційної роботи є визначення ефективного та найбільш раціонального методу обробки і розробка технологічного процесу чистової обробки лопаток робочих коліс турбін закритого типу (з бандажем) отриманих адитивним способом за технологією SLM.

Щоб досягнути поставленої мети, були визначені та вирішені наступні завдання:

- виконано порівняльний аналіз існуючих та можливих методів обробки робочих поверхонь лопаток та деталей подібного типу, на основі якого визначено і обґрунтовано метод абразивно-струменевої чистової обробки робочих поверхонь лопаток закритого типу (з бандажем), як найбільш перспективний;
- розроблено методику оцінки шорсткості складнопрофільних закритих поверхонь лопаток турбін;
- проведено моделювання процесу абразивно-струменевої обробки методом кінцевих елементів, що дало змогу більш детально дослідити закономірності обробки, виявити ключові фактори, що впливають на кінцевий результат, та на їх основі обрати найбільш ефективні параметри обробки;
- проведено експериментальне дослідження впливу абразивного матеріалу на зразках-свідках, для підтвердження ефективності обраних режимів обробки і типу абразивного матеріалу;
- здійснене дооснащення технологічного обладнання, що дозволило зробити процес обробки складнопрофільних закритих поверхонь лопаток турбін більш ефективним та контрольованим.

Об'єкт дослідження – процеси обробки і забезпечення шорсткості поверхонь закритих лопаток коліс турбін.

Предмет дослідження – вплив параметрів процесу абразивно-струменевої обробки на величину шорсткості робочих поверхонь лопаток турбіни турбонасосного агрегату закритого типу, виготовлених за SLM технологією.

Методи дослідження

- оцінка шорсткості поверхні зразків лопаток турбін закритого типу оптичним методом;
- металографія;
- механічні випробування;
- експериментальні дослідження якості поверхні після обробки різними абразивними матеріалами;
- моделювання процесів абразивно-струменевої обробки в програмному комплексі ANSYS CFX та аналіз отриманих даних в Microsoft Office Excel.

Наукова новизна отриманих результатів

Результати дослідження в повній мірі відповідають поставленим завданням та меті дисертаційної роботи. Наукова новизна результатів, що виносяться на захист полягає в наступному:

- *вперше, з використанням розроблених математичних моделей* встановлено і експериментально підтверджено закономірності процесів руху абразиву у міжлопатковому каналі, що спричиняють створення на поверхні лопаток зон з різною шорсткістю та змінного розміру в залежності від режимів обробки;

- *вперше з використанням розроблених моделей* процесу абразивно-струменевої обробки лопаток турбін закритого типу (з бандажем), встановлено залежність показників шорсткості обробленої поверхні від величини різнозернистості абразивних матеріалів;

- *вперше на основі моделювання та порівняльного аналізу* закономірностей утворення зон з різною шорсткістю були визначені найбільш раціональні режими обробки поверхонь лопаток закритого типу, що забезпечують необхідний рівень шорсткості.

Практичне значення отриманих результатів

- визначено і обґрунтовано метод абразивно-струменевої чистової обробки поверхонь лопаток закритого типу (з бандажем), як найбільш перспективний;

- *вперше*, для лопаток турбін закритого типу (з бандажем) розроблена методика оцінки шорсткості складнопрофільних поверхонь лопаток турбін;
- *вперше встановлено* найбільш ефективні режими обробки поверхонь лопаток турбін на основі моделювання та експериментальної обробки .
- *вперше*, експериментальним шляхом на зразках-свідках визначені найбільш ефективні абразивні матеріали;
- *вперше розроблено* та впроваджено експериментальний маршрутний технологічний процес чистової обробки лопаток турбін закритого типу (з бандажем) на дослідно-киробничому комплексі з розробки рідинних ракетних двигунів ТОВ «ФЛАЙТ КОНТРОЛ» (Додаток А).
- *вперше*, здійснене дооснащення технологічного обладнання, що дозволило зробити процес обробки складнопрофільних закритих поверхонь лопаток турбін більш ефективним та контрольованим.

Ключові наукові результати запроваджено в навчальний процес Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара при підготовці бакалаврів і магістрів за дисциплінами «Технологія виробництва типових деталей» за спеціальністю 133 – Галузеве машинобудування та «Технології виробництва літальних апаратів» 134 – Авіаційна та ракетно-космічна техніка (Додаток Б).

Публікації та особистий внесок здобувача. За темою дисертації опубліковано 5 статей. Одна з них опублікована у виданні, що входить до наукометричної бази Index Copernicus [163]. 4 статті входять до переліку наукових фахових видань України [5, 14, 90, 162]. Основні результати дисертації отримані автором самостійно. Визначення загального плану досліджень належить науковому керівнику О. В. Кулику. У працях, що опубліковані у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає у такому: [5,14] – аналіз можливості та перспектив застосування існуючих методів обробки для лопаток турбін закритого типу, [90, 162] – експериментальний відбір абразивних матеріалів та моделювання процесу абразивно-струменевої

обробки для визначення найбільш ефективних та контрольованих режимів обробки.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися міжнародних конференціях протягом 2019-2023 років:

1. Shashko Y., Adzhamsky S., Sanin A., Kulik A. (2021). Rationale for choosing the final treatment of the wheels of monocoils of turbopumping units obtained by the additive method. Abstracts of XXXII International Scientific and Practical Conference ACTUAL PROBLEMS OF MODERN SCIENCE AND PRACTICE. (June 29 – 02 July 2021, Boston). 260–262.
2. Шашко Ю.А., Кулик О.В., Санін А.Ф. Використання адитивних технологій для отримання заготовок дисків турбін турбонасосних агрегатів. *VII Міжнародна конференція «Космічні технології: сучасне та майбутнє»* (21–23 травня 2019, Дніпро), 73.
3. Шашко Ю.А., Кулик О.В., Аджамський С.В. Міжнародна науково-практична конференція "PERSPECTIVES OF DEVELOPMENT OF SCIENCE AND PRACTICE", 14-17 грудня 2021р., Прага, Чехія.
4. Shashko Yu.A., Kulyk O.V., Adzhamskyi S.V. Blasting as an alternative to classic methods of surface treatment details of RCT obtained by the additive method. XIV International Conference of Students and Young Scientists "INTELLIGENCE. INTEGRATION. RELIABILITY" which will take place on December 7-8, 2021.
5. Ю. А. Шашко, О. В. Кулик, А. Ф. Санін, Р. Ф. Максимчук. ВИБІР ОПТИМАЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ЧИСТОВОЇ ОБРОБКИ ЗАКРИТИХ ЛОПАТОК ТУРБІН ТУРБОНАСОСНИХ АГРЕГАТИВ. *XXII Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і Космос», Дніпро, 2020 р.*
6. Ю.А. Шашко, О.В. Кулик, А.Ф. Санін, Максимчук Р.Ф., Буштрук С.І. Аналіз існуючих технологічних рішень для забезпечення кінцевої якості поверхонь лопаток моноколіс турбін виготовлених адитивним методом.

XXIII Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і Космос», Дніпро, 2021 р.

7. Ю.А. Шашко, О.В. Кулик, С.В. Казеєв, Максимчук Р.Ф., Аджамський С.В. Застосування сухої абразивної обробки, та її різновидів, для чистової обробки поверхні лопаток турбін ТНА закритого типу виготовлених адитивним методом. *XXIV Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і Космос», Дніпро, 2022 р.*
8. Ю.А. Шашко, О.В. Кулик, С.В. Казеєв, Максимчук Р.Ф., Аджамський С.В. Моделювання процесу обробки абразивно-повітряним струменем робочих поверхонь лопаток моноколів закритого типу отриманих адитивним методом. *XXV Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і Космос», Дніпро, 2023 р.*

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалась у відповідності з індивідуальним планом підготовки аспіранта кафедри ракетно-космічних та інноваційних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара. Дослідження за темою дисертації не пов'язані з жодною з держбюджетних тем.

Структура та обсяг дисертації.

Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів та висновків до кожного з них, загального висновку, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 191 сторінки, з яких: анотація — 5 с., зміст — 3 с., основний текст — 140 с., список використаних джерел із 163 найменувань — на 18 с., додатки — на 2 с. Робота містить 12 таблиць та 113 рисунків по тексту.

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НЕОБХІДНОЇ ЯКОСТІ ОБРОБКИ

Ключовим завданням першого розділу є аналіз існуючих технологій забезпечення кінцевої якості поверхонь деталей, типу лопаток турбін закритого типу (з бандажем) виготовлених за одне ціле з диском турбіни за допомогою адитивних технологій. Автором розглянуто та проаналізовано наукові праці та література, що стосуються особливостей кожного методу існуючих технологій та сформовано наукове завдання.

1.1 Передумова та мотивація

Розвиток космічної галузі займає пріоритетне місце в економіці кожної держави, досягнення в цьому секторі забезпечують лідерські позиції на міжнародному ринку космічних технологій а також додають певну вагу в питанні освоєння космічного простору. В кожній країні космічна галузь є однією з найбільш конкурентоспроможних та провідних в економіці, до її складу входить ціла низка високотехнологічних підприємств, які представляють державу на світовому ринку.

Основним рушієм технологічного розвитку ракетно-космічної галузі України є пошук нових методів обробки матеріалів або зниження вартості існуючих технологій, що дозволить знизити собівартість виготовлення вітчизняної ракетно-космічної техніки та підвищити її конкурентоспроможність на міжнародному ринку.

1.2 Конструктивно-технологічні особливості турбін турбонасосних агрегатів

Одним з основних елементів турбонасосних агрегатів (ТНА) являється газова турбіна. Це один з найважливіших елементів насосного агрегату, функція якого полягає у перетворенні потенційної енергії продуктів згорання газогенератора в механічну роботу насосів окислювача та пального. Турбіни ТНА працюють при великій частоті обертів у високотемпературному середовищі корозійно-активних газів внаслідок чого в металі виникає високе напруження від дії відцентрових сил.

До турбін ТНА висуваються суворі конструктивні вимоги:

- Надійно забезпечувати безперебійну подачу необхідної кількості компонентів у камеру згорання з необхідним тиском для забезпечення максимальної продуктивності (ККД) турбонасосного агрегату.
- Турбіна повинна мати високу кутову швидкість без застосування механічних передач обертання;
- Точність посадкових місць повинна відповідати 7-12 квалітетам;
- Биття зовнішніх посадкових місць відносно осі ротора та центральної виточки отвору повинно знаходитись в межах 0,001-0,1 мм;
- Максимальний дисбаланс дисків турбін не більше 5 гс/см на плече в 100 мм;
- Поверхні диска турбіни задля уникнення концентрації напруження не повинні мати ризик та різних переходів.
- Шорсткість лопаток не більше $Ra=0,63\dots0,8$.

Диски турбін ТНА є двох типів відкритого та закритого (рис. 1.1).



а



б

Рис.1.1 – Конструктивні схеми моноколів турбін турбонасосного агрегату , а -відкритого, б- закритого типу.

При роботі турбіни відкритого типу (без бандажа) відбувається явище «перетікання» частини газу з одного каналу робочого вінця лопаток в інший. Пов'язано це з наявністю радіального зазору між торцем пера та корпусом, а також різницею тиску на жолобі і спинці лопаток (рис.1.2) [3].

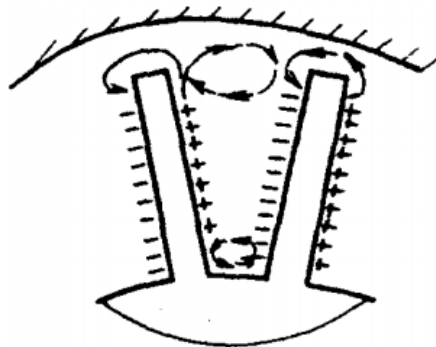


Рис. 1.2 – Схема перетікання газу в радіальному зазорі:

(-) зона низького тиску; (+) зона високого тиску [3].

Частина газу, що рухається граничним шаром вздовж жолоба лопатки йде на створення верхньої частини парного вихрового потоку, а інша через зазор перетікає у вихрову плівку, яка виноситься основним потоком. Перетікання пов'язано із затратами енергії на утворення вихрової плівки та зниженням різниці тиску на жолобі та спинці лопатки що сумарно зменшує ефективність роботи турбіни [3-4].

Вплив шорсткості поверхонь лопаток на ККД турбіни залежить від законів перебігу аерогазодинамічних та теплообмінних процесів.

При проектуванні робоче колесо турбіни розраховується для конкретного діапазону частот, при яких вихідні і профільні витрати турбіни мінімальні [3]. ККД турбіни визначається за втратами при протіканні газів по соплам, при обтіканні лопаток диска турбіни, втратами енергії з вихідною швидкістю і т.д.

У довіднику [3] наведена формула 1.1 питомої теоретичної роботи турбіни L_u :

$$L_u = L_u / G = u(\omega l_u + \omega^2 u) \quad (1.1)$$

де, G – масова витрата пального чи газу, кг/с;

ω – кутова швидкість, рад/с; u – колова швидкість, м/с;

Аналіз формули [3] дозволяє зробити висновок, що підвищення частоти обертання не впливає на зростання потужності турбонасосного агрегату. Збільшення частоти зменшить величини ωl_u і $\omega^2 u$, крім того, вихідні і профільні витрати мінімальні у вузькому діапазоні частот обертання. Як збільшення так і зменшення частоти обертання від заданого діапазону призводить до суттєвого зростання вихідних витрат [3].

Втрати на лопатках турбіни прийнято розділяти на три групи: профільні, кінцеві та додаткові. Перші дві групи характерні як рухомим, так і не рухомим решіткам. Профільні витрати викликані наступними факторами:

- тертя в граничних шарах профілів лопаток;
- вихроутворенням за вихідними крайками (у цьому випадку утворюються так звані крайкові витрати);
- появою стрибків ущільнення в міжлопаткових каналах [3, 5].

Втрат на перетікання можливо уникнути завдяки бандажу. Бандажне кільце відіграє важливу роль в конструкції та роботі турбіни в цілому, такий тип турбін називається закритим.

Необхідність забезпечення високої чистоти поверхні лопаток закритих моноколів обумовлена специфікою роботи у агресивному середовищі з досить високими температурами.

Даний тип конструкції більш ефективний і раціональний з конструктивної точки зору за відкритий тип турбіни, що сприяло його

широкому застосуванню в турбонасосах. Наявність бандажного кільця покращує характеристики, однак виготовлення турбін закритого типу має більш складну технологію в порівнянні з відкритими але менш технологічним [2, 5]. Виходячи зі специфіки процесів, що протікають між лопатками при роботі турбіни, питання забезпечення кінцевої якості та шорсткості поверхні на сьогодні є актуальним завданням, вирішення якого дозволить не тільки підвищити продуктивність турбонасосних агрегатів але й спростити та здешевити технологію їх виготовлення.

1.3 Методи отримання заготовок дисків турбін ТНА

Враховуючи жорсткі конструктивно-технологічні вимоги, що висуваються до турбін ТНА, матеріал повинен володіти високою корозійною стійкістю та високою міцністю при високих температурних навантаженнях. Традиційно диски турбін виготовляють з високолегованих сталей і сплавів таких як: 12Х2Н4ВА, ОХНЗМ, 30ХГСА, ЭИ481, ХН77ЮР(ЭИ437Б), ХН70МВТЮ(ЭИ617), ХН65МВТКЮЛ(ЖСК6), ЭИ415, ЭИ395, Х18Н9Т, 1Х18Н9Т, ЭИ69, ВЛ7-20 та нові перспективні матеріали такі як Inconel 625, Inconel 718. З усього різноманіття існуючих технологій виготовлення моноколів можна виділити такі [6-8]:

- виготовлення моноколів як закритого типу (з бандажем) так і відкритого з високоточних профільованих заготовок отриманих точним литтям;
- виробництво моноколів турбін шляхом складання попередньо виготовлених окремо дисків та лопаток;
- виготовлення моноколів з монолітних заготовок у яких відсутній профільований лопатковий вінець електроерозійним (EDM);
- метод гарячого ізостатичне пресування;
- виготовлення високоточних заготовок турбін адитивним методом за технологією SLM та DMLS.

Розглянемо кожен метод детальніше з точки зору перспектив застосування для виготовлення моноколiс закритого типу в сучасних умовах.

Виготовлення профільованих заготовок точним литтям в пісок використовується для робочих колiс середнього та малого розміру, до яких не висувають суворих вимог щодо точності обробки та механічних властивостей. Литі робочі колеса використовуються, як правило, для робочих колiс відцентрових насосів [9]. Робочі колеса, виготовлені методом піщаного лиття, зазвичай виготовляються зі сталі, бронзи, латуні, алюмінію або пластику. Лиття в пісок використовується для формування компонентів з високою температурою плавлення, та застосовується як при дрібносерійному так і при великосерійному виробництві. Однак точність розмірів і обробка поверхні зазвичай обмежені.

Складність реалізації процесу виникає в необхідності спеціального технологічного обладнання та оснащення, крім того відливка моноколiс турбін з такими з лопатками закритого типу дає значні технологічні припуски, обробка яких ускладнена, а в деяких випадках неможлива через наявність закритого профілю [2, 5].

Основним недоліком є те, що економічна раціональність реалізації процесу можлива тільки у випадку середньо-серійного, крупно-серійного або масового виробництва через організацію додаткових ділянок виробництва для заготовельних операцій та оснащення, що в свою чергу стане причиною довготривалого циклу виробництва.

Виробництво моноколiс турбін, шляхом складання попередньо виготовлених окремо дисків та лопаток, можна реалізувати різними методами зварювання (тертям, лазером, дифузійним зварюванням тощо.) [2].

Метод дифузійного зварювання дає можливість з'єднувати елементи з різнорідних матеріалів [10-11]. Завдяки зварним з'єднанням моноколеса турбін мають меншу міцність у порівнянні з турбінами отриманими з монолітної заготовки [10] до того ж даний метод частіше застосовується для виготовлення великогабаритних колiс. При цьому варто відзначити високу

вартість обладнання, необхідність високої кваліфікації працівників, складність виготовлення та підготовки поверхонь під зварювання, також ускладнений контроль зони зварного шва на наявність дефектів [12].

Недоліком даного підходу є необхідність організації паралельних ділянок виробництва та значних виробничих площ для організації виробництва складових частин турбіни, що в свою чергу потягне за собою додаткові матеріальні витрати, збільшення циклу виробництва, що негативно відображається на собівартості виробів.

Виготовлення моноколів з монолітних заготовок електроерозійним методом (EDM) широко застосовується для чорнової та чистової обробки міжлопаткових каналів [13-14]. Незважаючи на те, що виробничий процес є достатнім для отримання складних геометрій із жорсткими допусками, чого неможливо досягти за допомогою інших виробничих процесів, основним недоліком є низька швидкість обробки та негативний вплив термічної складової процесу, внаслідок якої, виникає поверхневий шар розплавленого металу (з властивостями, відмінними від основного матеріалу), що погіршує експлуатаційні характеристики [15]. Тим не менш, ця технологія розвивалася, щоб усунути ці проблеми цілісності поверхні для термостійких суперсплавів, таких як Ti6Al4V та Inconel 718 [16]. Дана технологія зазвичай використовується для матеріалів, які не піддаються механічній обробці, таких як суперсплави на основі титану та нікелю. Завдяки тому, що немає прямого контакту між інструментом і потрібною деталлю, вплив матеріалу не викликає сили різання і не впливає на процес ерозії [17]. Klocke та ін. [18] провели технологічне та економічне порівняння чорнової обробки за допомогою фрезерування, WEDM (дротяна електроерозійна обробка) та SEDM (електророзрядна обробка) для моноколів турбін на основі титану та нікелю, дійшовши висновку, що EDM є найбільш економічним процесом чорнової обробки та реальною альтернативою для великих партій, до 400 колів турбін на рік.

Вироби подібної геометрії, виготовлені як монолітна конструкція, унеможливають доступ інструменту при механічному фрезеруванні чи шліфуванні. Електроерозійна обробка (EDM) є реальною альтернативою механічному фрезеруванню та шліфуванню для моноколів лопаток закритого типу та центробіжних коліс насосів [19]. Основними недоліками даного методу є складність синхронізації та програмуванні траєкторії руху інструмента-електрода при обробці складнопрофільних закритих поверхонь лопаток (рис.1.3) [20].

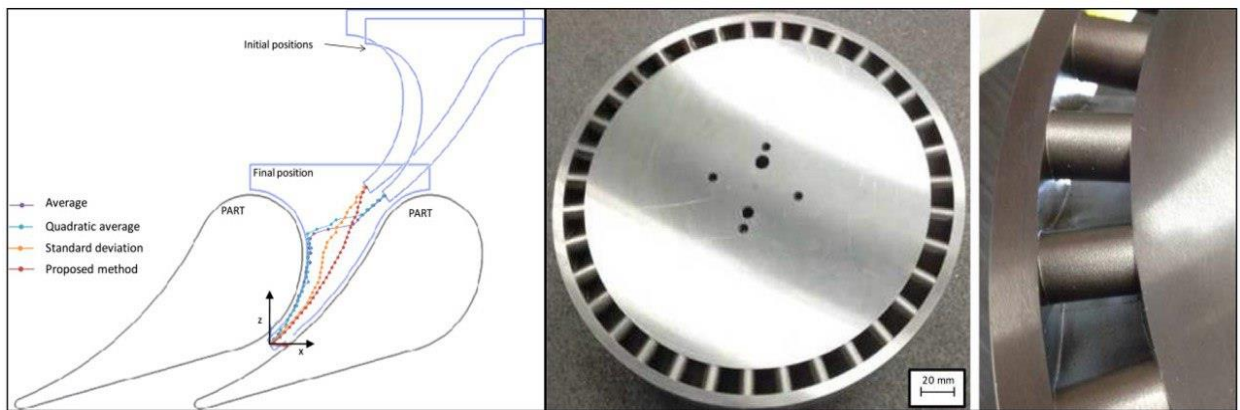


Рис.1.3 – Згенеровані ефективні траєкторії траєкторії інструменту та виготовлення коліс турбін закритого типу за допомогою EDM [20].

Крім того, програми обробки вимагають використання верстатів з більш ніж 3-ма осями, які важко інтерполювати, та декількома комплектами інструментів-електродів, для чистової та чорнової обробки, що повинні відповідати формі та профілю поверхонь закритих лопаток надрукованої заготовки [21, 22-23]. Складність реалізації процесу полягає не тільки у енергозатратах, програмуванні та виготовленні спеціального інструменту, а ще й в можливості доставки та розміщення електроду в зону обробки, що залежить від розміру каналу між лопатками, чим він менший тим складніше реалізувати обробку і тим складніше виготовити електрод, більш стисла характеристика методу наведена в таблиці 1.2.

Гаряче ізостатичне пресування (ГІП) застосовується при виготовленні заготовок виробів з точними геометричними параметрами, мінімальним припуском (з нержавіючих та жаростійких сплавів) для різних галузей машинобудування. Використання сучасних методів автоматичного проектування та можливість виготовлення виробів зі складною конфігурацією посприяли розвитку технології гарячого ізостатичного пресування (рис.1.4) [24]. Дана технологія виготовлення, є однією з найбільш перспективних процесів, серед методів формозміни матеріалу, виготовлення лопаток, дисків та дисків з лопатками (моноколів). Загальна тенденція в обробці металів тиском спостерігається в розробці безприпускової та малоприпускової технології. Це дозволить в 2,0 - 3,5 рази зменшити витрати металу, а також звести до мінімуму механічну обробку різанням та об'єм слюсарно-доводочних робіт [25].

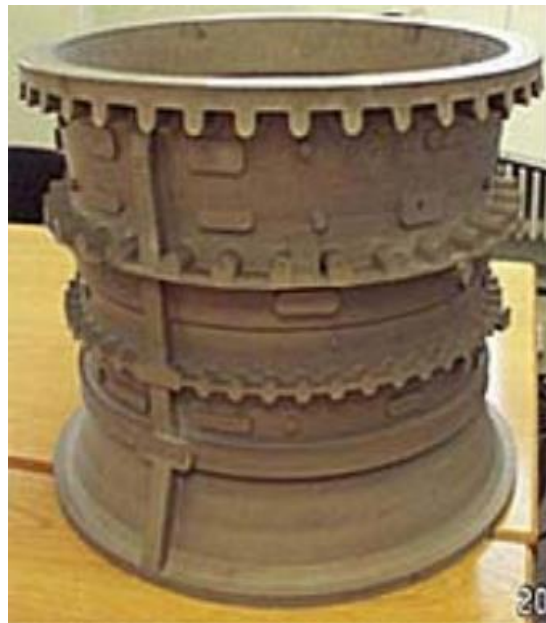



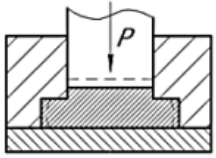

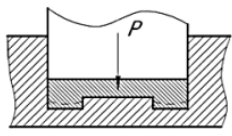
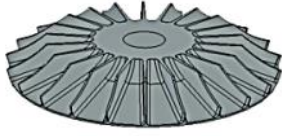
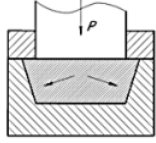
Рис.1.4 – Корпус компресора газотурбінного двигуна, компанії Rolls-Royce, виготовленого гарячим ізостатичним пресуванням.

Максимальна ефективність процесів точного штампування може бути досягнута при виготовленні деталей складної форми, наприклад лопаток складного аеродинамічного профілю разом з диском. Процеси пресування

забезпечують високу ступінь однорідності деформацій та отримання рівномірної структури матеріалу необхідної дисперсності. Це забезпечує підвищений опір навантаженням що виникають в ході експлуатації, зменшує витрати матеріалу, а також зменшує трудомісткість виготовлення.

При гарячому пресуванні моноколів можна отримувати деталі з робочими поверхнями (перо лопатки) які не вимагають подальшої механічної обробки або з мінімальним припусками чи напусками під механічну обробку [26]. В роботі [26] представлені основні типи моноколів, їх класифікація та приклади деталей які можна отримати ізостатичним пресуванням наведені в таблиці 1.1

Таблиці 1.1 - Основні типи моноколів, що можливо виготовити ГП

Конструктивна ознака	Тип моноколеса	Технологічна ознака	Схема процесу формоутворення
Розташування пера лопатки перпендикулярно осі обертання		Напрямок деформуючого зусилля перпендикулярно течії металу	
Розташування пера лопатки відносно осі обертання		Напрямок деформуючого зусилля соосно течії металу	
Розташування пера лопатки під кутом до осі обертання (змішаний тип)		Пресування пера лопатки при комбінованій течії металу	

Позитивні якості даного методу полягають у можливості виготовлення виробів більших розмірів з високою точністю та складною геометрією, в порівнянні з іншими технологіями порошкової металургії, з важко оброблювальних матеріалів таких як, жаростійкі сплави, титан, інструментальні сталі та інш. Технологія ГП дозволяє отримувати вироби, що мають стовідсоткову щільність з ізотропними механічними властивостями.

Однак виготовлення методом ГП закритого типу (з бандажем) вимагає високовартісного обладнання та оснащення, враховуючи одиничний чи

дрібносерійний тип виробництва та нинішні реалії в Україні, реалізація даної технології не є технологічно та економічно виправданою.

Адитивні технології дозволяють виготовляти деталі за цифровими моделями методом пошарового додавання матеріалу [27-28]. При цьому, отримання виробу відбувається крок за кроком, безпосередньо формуванням шару матеріалу, його затвердінням та фіксації у відповідності з даними CAD моделі і поєднанні з попереднім шаром. В якості джерела енергії може використовуватися електронний або лазерний промінь. В першу чергу інтерес до адитивних технологій, в якості альтернативи існуючим технологіям, виник в авіації, космічній промисловості основним рушієм яких економічна раціональність. Це стосується особливо одиничних складних виробів таких як сопла з каналами охолодження, турбіни ТНА та корпусів насосів, виробництво яких існуючими методами виявляється економічно затратним, в порівнянні з адитивними технологіями [27].

При виготовленні непрофільованих заготовок з використанням адитивних технологій немає необхідності в спеціальному технологічному оснащенні, що в свою чергу зменшує технологічний цикл отримання заготовки та готової деталі в цілому [29]. До групи адитивних технологій відносяться: технології селективного лазерного спікання (SLS, Selective Laser Sintering), селективне лазерне плавлення (СЛП, Selective laser Melting) та пряме лазерне спікання (DMLS, Direct Metal Laser Sintering). Принцип роботи принтера зображений на (рис.1.5). Спочатку, CAD модель виробу за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення розбивається на шари. Подальшим кроком, у відповідності з обраними технологічними параметрами, відбувається задання траєкторії руху та параметрів лазерного променя і нанесеного порошкового шару.

Після цього отриманий файл переноситься на 3D-принтер. Процес отримання деталі починається з того, що на основну плиту принтера наноситься шар порошкового матеріалу заданої товщини. Нанесення матеріалу відбувається за допомогою спеціального рухомого пристрою,

автоматично наповнюваного порошком. Потім, відбувається обробка створеного шару за допомогою лазерного променя. Весь процес проводиться в середовищі інертного газу (азоту чи аргону, в залежності від використовуваного сплаву).

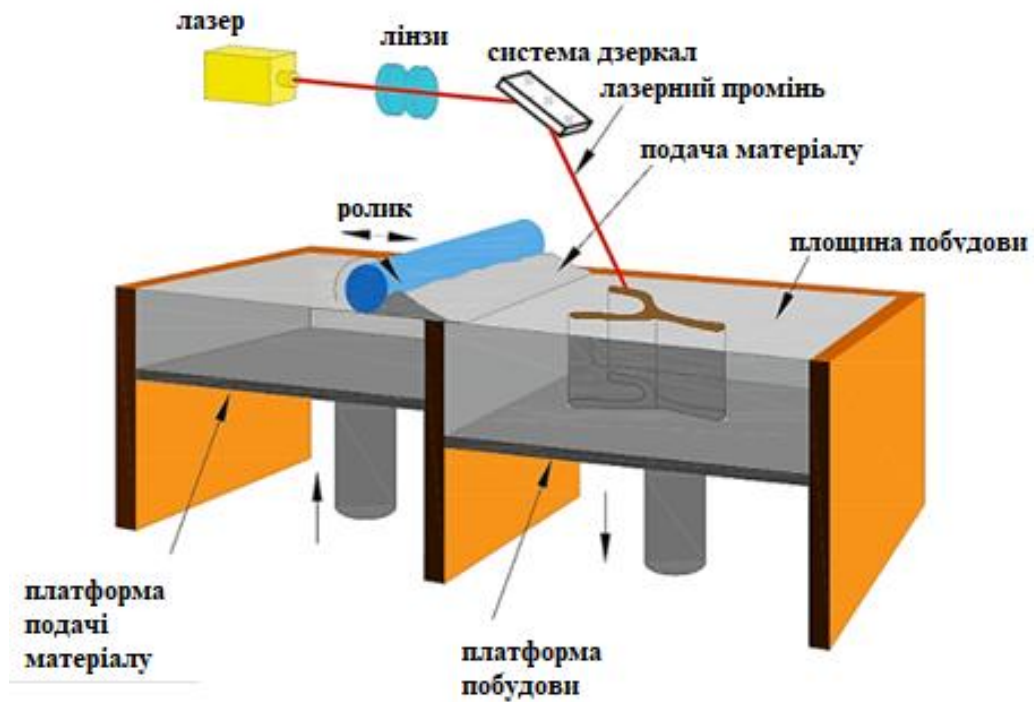


Рис.1.5 – Принцип роботи 3D принтера по технології SLM [30].

За рахунок енергії яка надається цим лазерним променем відбувається спікання порошкового шару, Далі, відбувається опускання платформи на товщину шару, нанесення нового шару порошку і процес повторюється знову і знову, поки не буде отримано готовий виріб.

У процесі роботи лазерного променя та пов'язанного з цим локального підведення тепла виникає необхідність використання спеціальних підтримуючих конструкцій (рис.1.6), що попереджають або зменшують термічні деформації в деталях [31].

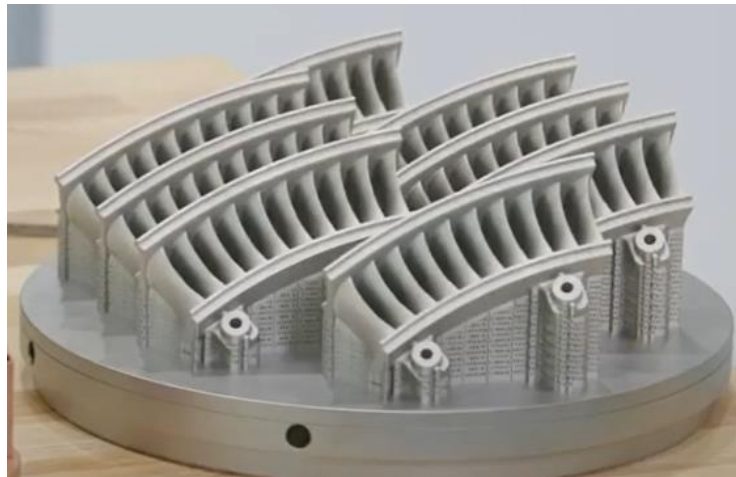


Рис.1.6 – Друковані деталі з підтримками.

Аддитивні технології, мають і деякі недоліки [32]. Можливе виникнення дефектів, що викликані локальною дією променю, такі як напруження, місцева усадка металу, захоплення молекул газу робочого середовища і т.п. Якість поверхні виробів, їх розмірна точність і мінімальна товщина елементів, шорсткості та структури у значній мірі залежать від конкретного методу і технологічних параметрів процесу 3D-друку. Обмежені граничні розміри виробів (обмеження робочої камери або робочою зоною обладнання). Значною проблемою DMLS є забезпечення необхідної мікроструктури матеріалу, зменшення пористості та шорсткості отриманого матеріалу, характерною для даної технології.

Значення пористості залежать від використовуваного матеріалу, параметрів режиму сплавлення, якості вихідного порошку і т.д.

Для уникнення утворення пористості можуть застосовуватися спеціальні методи термообробки. Пори і раковини негативно впливають на механічні властивості виробів, оскільки навіть одинична пора у виробі здатна суттєво знизити його міцність за рахунок концентрації напруження на межах раковин [33-34]. Для зменшення шорсткості поверхні, а також для зменшення пористості запропоновано спосіб подвійної обробки лазером кожного нанесеного шару. Такий метод дозволяє покращити якість поверхні і підвищити щільність виробів до 100% [35-36].

Однак, не дивлячись на ці недоліки, зручність використання адитивних технологій підтверджено чисельними дослідженнями і застосуванням у реальних областях промисловості [37-40]. Крім низької вартості виробництва унікальних виробів, адитивні технології дозволяють суттєво скоротити час, затрачений на отримання готового виробу. Можливо почати виготовлення виробу відразу, як тільки закінчилось його проектування, зникає необхідність виготовлення складного оснащення, що дозволяє отримати готовий виріб в найбільш короткий термін. При виробництві сучасних елементів ракетно-космічної техніки часто використовуються матеріали, які складно піддаються механічній обробці, при застосуванні адитивні технологій суттєво підвищується якість, а також знижується об'єм наступної механічної обробки за рахунок отримання заготовок, найбільш наближених по конфігурації до готового виробу.

Це сприяє економії матеріалу і затрат на наступну обробку, а також забезпечує свободу вибору конфігурації виробів, яка може суттєво підвищити експлуатаційні характеристики деталей [27]. Це особливо актуально в таких областях, як авіація і ракетно-космічна техніка [41-42]. В авіації, де титанові та нікелеві сплави отримали широке поширення, висуваються особливі вимоги до цілого ряду виробів. Застосування адитивних технологій дозволяє створювати деталі з геометрією, яка забезпечує легкість конструкції зі збереженням високих міцнісних характеристик [27].

У літературі описано використання адитивних технологій для отримання деталей зі сплавів на основі Ni, таких як Inconel 718 [43-45], Waspaloy [46], Inconel 939 [47], Nimonic 263 [48]. Для сплавів отриманих данною технологією характерна дрібнозерниста структура, при цьому механічні властивості у таких матеріалів відносно порівнювані, або навіть часто перевищують властивості виробів отриманих штампуванням або литтям [49-50].

Межа міцності у отриманих зразків, із сплаву Inconel 718 в роботі [43] рівний близько 1,1 ГПа, а границя текучості складає близько 0,83 ГПа,

відносно подовження складає 25%. На сьогоднішній день закордонні великі компанії-виробники авіаційної техніки активно освоюють та впроваджують адитивні технології в свої технологічні процеси [29, 51-52].

Адитивні технології дозволяють отримувати складнопрофільні вироби, не жертвуючи складністю геометрії, яка незначно впливає на можливість виготовлення, практично не впливаючи на вартість. При цьому варто відмітити, що адитивне виробництво, не знімаючи всіх виробничих обмежень, замінює їх іншими можливими конструктивними рішеннями, які можуть застосовуватися інженерами для виготовлення деталей.

1.4 Методи забезпечення чистоти поверхні лопаток робочих коліс турбін

Механічне фрезерування. Одним з основних методів чорнової і чистової обробки міжлопаткових каналів моноколів турбін є механічне фрезерування осевим інструментом, у якості якого на чорновому етапі використовуються кінцеві, а на чистовому сферичні та сферично-конічні фрези (рис.1.7) [53-54].



Рис.1.7 – Чистова обробка міжлопаткових каналів сферично-конічною фрезою [54].

Моноколеса з високоміцних сталей і сплавів отримувати фрезеруванням неефективно внаслідок низької оброблюваності цих матеріалів, крім того виготовлення фрезеруванням дуже тонких лопаток неможливо [55-57].

Для покращення якості обробки при фрезеруванні міжлопаткових каналів застосовували спеціальну демпферну масу для забезпечення необхідної жорсткості [2, 58]. Для забезпечення стабільності шорсткості застосовували різні методи керування переміщенням фрези і способи обробки [2, 59-62] а також застосування фрез спеціальної конструкції [63].

Однак не дивлячись на прогресивний розвиток механічного фрезерування та широку номенклатуру спеціального інструменту, застосування його для повної або часткової обробки моноколес закритого типу неможливе через складність або відсутність доступу інструменту в зону обробки, а це в свою чергу залежить від форми кривизни профілю та відстані між лопатками, більш стисла характеристика методу наведена в таблиці 1.2.

Магнітно-абразивна обробка. При фінішній абразивній обробці звичайними способами на окремих ділянках поверхні оброблюваних деталей виникають похибки форми та розкидання величин шорсткості [64].

В результаті параметри якості на різних ділянках поверхні можуть значно відрізнятися одне від одного, і для забезпечення необхідних конструктивних вимог можуть знадобитися додаткові операції доведення, які, як правило, виконуються вручну і є трудомісткими. Застосування магнітно-абразивної обробки (МАО) в порівнянні з існуючими способами абразивної обробки сприяє утворенню високої якості поверхні та структури поверхневого шару за рахунок невисокої температури в зоні різання. Магнітно-абразивна обробка [65-66] ґрунтується на властивостях магнітного поля впливати на феромагнітні частинки з силою достатньою для вибіркового абразивного впливу на поверхню змінного профілю [67]. Продуктивність і якість магнітно-абразивної обробки в значній мірі залежить від коректного вибору магнітно-абразивного порошку і його експлуатаційних характеристик, а саме форми, розмірів та мікротвердості частинок порошку [68-71], складу та структури

магнітно-абразивних порошкових матеріалів (МАМ), стійкість до руйнування та зношування [69-70] особливість взаємодії магнітно-абразивного інструменту (МАІ) з оброблюваними поверхнями та реологічних властивостей порошкового середовища [70, 72] в магнітному полі. Засоби та способи МАО деталей складної просторової форми типу лопаток запропоновані в роботах [73-74] не реалізують всіх можливостей методу. В НТТУ КПІ ім. Сікорського розроблена установка для МАО лопаток що дозволяє перемішувати деталі з необхідною швидкістю і достатньою для формування ефективного МАІ значення індукції магнітного поля в робочих зонах магнітних зазорів. Установка забезпечує створення МАІ з заданими властивостями в робочій зоні типу «кільцева ванна» (рис. 1.8).

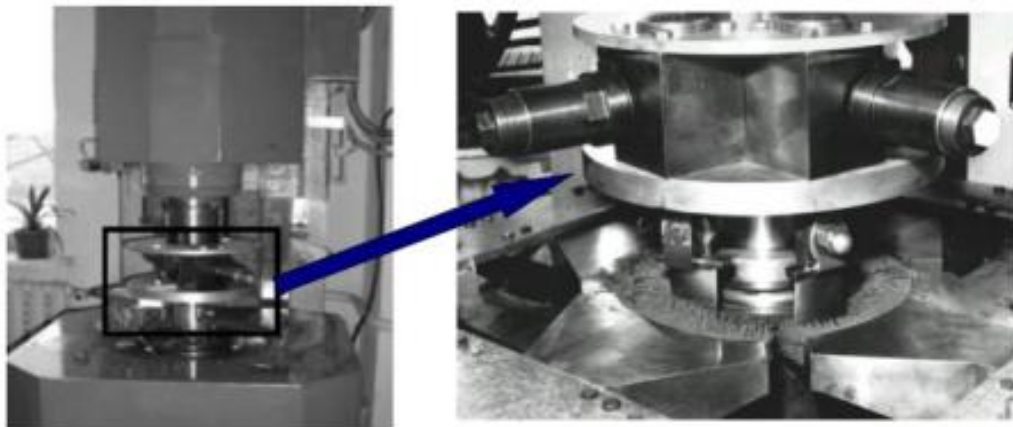


Рис.1.8 – Зовнішній вигляд установки для МАО лопаток ГТД [67].

Значна продуктивність обробки, без зміни геометрії деталей, з можливістю отримання високого класу шорсткості поверхні ($Ra \leq 0.2$ мкм) (рис. 1.9), робить одним з ефективних методів, при застосуванні на фінішних операціях виготовлення таких відповідальних і складних деталей як лопатки [75].



Рис.1.9 – Зовнішній вигляд лопаток після МАО[67].

Виконані дослідження [68, 76-78] показали перспективність використання технологій МАО, як поліруючо-зміцнюючої операції.

Перевагами МАО, на відміну від інших способів фінішної обробки, є можливість регулювання щільності і жорсткості оброблюючого інструменту, сформованого з фераабразивного порошку (ФАП), забезпечення параметрів шорсткості оброблюваних поверхонь в межах Ra (0.01...0.63) мкм, зниження хвилястості у 8...10 раз [79]. Вказані технологічні процеси легко піддаються автоматизації, оскільки потоки електромагнітного поля прості в реалізації та прості в керуванні. Однак магнітно-абразивна обробка має недолік – знижується інтенсивність «самогенерації» контуру ріжучого інструменту в робочій зоні, що негативно відображається на продуктивності та якості обробки, фізико-механічних властивостях оброблюваних поверхонь [79-80].

Обробка МАО моноколів закритого типу неможлива по причині сутності реалізації процесу, що не забезпечує контакт абразивних частин з робочими поверхнями лопаток та контроль їх обробки, стисла характеристика методу наведена в таблиці 1.2. Крім того вагомим недоліком є не тільки висока вартість обладнання та матеріалів а також шкідливий вплив на організм людини, що хворіє серцево-судинними захворюваннями.

Віброабразивна обробка. Широкого застосування набула вібраційна обробка, яка в свою чергу поділяється на віброабразивну обробку та віброударну [66, 81-82].

Вібродарна обробка використовується для зміцнення поверхні, а віброабразивна - для зняття задирок, притуплення гострих крайок, очищення, полірування складнопрофільних поверхонь тощо. Сутність обох процесів способів майже аналогічні між собою. Різниця полягає у застосуванні різних робочих тіл. Для вібрударної обробки застосовуються загартовані сталеві сферичні елементи, дріб та інші металеві наповнювачі. Для реалізації віброабразивної обробки використовуються абразивні тіла різної форми, складу і розміру, а оброблювальні деталі, положення яких часто не фіксують при обробці. Для проведення обробки, на контейнер, змонтованому на пружних підвісках, накладаються низькочастотні коливання за допомогою джерела вібраційних або електромагнітних коливань і змушують коливатися абразивні тіла в різних напрямках. Результатом низькочастотних коливань є рух маси абразивних тіл одночасно з деталлю, завдяки якому відбуваються колові рухи та перемішування абразивних тіл, і як наслідок обробка поверхонь деталі [81]. Віброобробка буває дво- і трьохкомпонентна. При двокомпонентному процесі кожна з точок контейнера робить коливання в одній площині. В основному при цьому траєкторія коливань приймає форму кола або еліпса. Трикомпонентна вібрація називається об'ємною, траєкторія переміщення при такій обробці також приймає форму еліпса або кола, яке постійно змінює кутове положення. Здебільшого поширене використання об'ємної вібрації, яка ефективно підвищує якість обробки закритих елементів деталей зі складним профілем і з внутрішніми порожнинами.

Змінюючи фізичні властивості та розміри гранул, моделюючи характер вібрацій, можна успішно обробляти і зовнішні поверхні, і внутрішні порожнини деталей складної форми. Однак віброобробка має недоліків, а саме низькі енергетичні та техніко-економічні показники, значна тривалість обробки, неможливість обробляти локальну ділянку поверхні.

Віброабразивна обробка – це безрозмірна технологія, негативним фактором якої, є підвищення витрат енергії та часу обробки кожної деталі.

Даний метод обробки ефективний при обробці важкодоступних, але просторих внутрішніх поверхонь корпусів, однак не дозволяє здійснювати обробку малогабаритних внутрішніх поверхонь [83]. Крім значного рівня шуму від обладнання, недоліком є те що обробка закритих лопаток з тонкими крайками неможлива, через ризик їх пошкодження при переміщенні абразивної маси через канали між лопатками, що в свою чергу може бути обмежено розмірами цих каналів, стисла характеристика методу наведена в таблиці 1.2.

Абразивна екструзія. Сутність методу полягає в протисканні суміші каучуку і абразивних часток через внутрішні канали виробів, однак при цьому відбувається нерівномірне зняття матеріалу, якщо деталь має змінний перетин каналу то продуктивність зростає в міру звуження каналу і знижується в напрямку його розширення. Приклади поверхонь деталей після обробки методом абразивної екструзії наведені на рис.1.10 та рис.1.11.

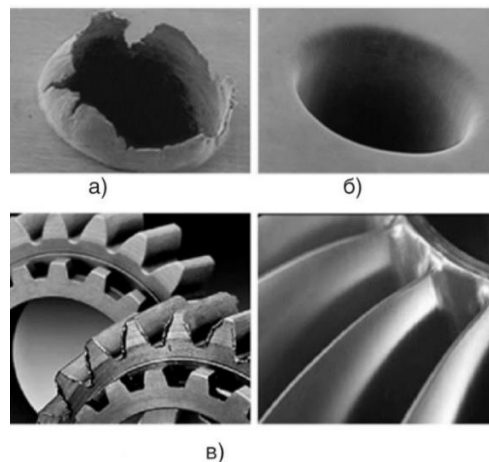


Рис.1.10 – Поверхні до та після обробки методом абразивної екструзії:
а) видалення заусенців на вихідних отворах; б) видалення заусенців та чистова обробка зубчастого колеса в) поверхня лопаток моноколеса.



Рис.1.11 – Деталі після екструзійно-абразивної обробки.

Процес екструзії обробки деталей [66, 85] полягає в прошовуванні абразивної суміші вздовж оброблюваної поверхні. Застосування на обладнанні для екструдуювання спеціальних спрямовуючих пристроїв дозволяє збільшувати довжину каналу та спрямовувати абразивну суміш під необхідними параметрами [85], що забезпечує обробку каналу конусної форми, але обробка складнопрофільних каналів відбувається нерівномірно і досягає максимальних значень у найбільш вузькому перерізі, з цієї причини досягти необхідну нам рівномірну шорсткість даним методом неможливо.

Недоліком даного методу є висока вартість обладнання та витратних матеріалів, складність підготовки абразивних сумішей, низька продуктивність, що не забезпечує рівномірної обробки поверхні, враховуючи те що рух абразивної суміші відбувається під значним тиском та нерівномірним контактом з оброблюваною поверхнею, обробка закритих лопаток стає неможливою через ризик їхнього пошкодження. Крім цього обмежене повторне застосування абразивної суміші, більш стисла характеристика методу наведена в таблиці 1.2. Враховуючи сучасні реалії в Україні реалізація даної технології не є раціональною.

Турбоабразивна обробка. Турбоабразивна обробка дозволяє ефективно видаляти задирки практично після будь-яких операцій механічної обробки деталей різної форми [66, 86-87].

Цей процес реалізується завдяки великій частоті зіткнень абразивних зерен з оброблюваними поверхнями деталей. Частота зіткнень призводить до

обламування і стирання задирок. Зняття матеріалу відбувається завдяки мікрорізанню абразивних часток об поверхню деталі. Сутністю є процес, при якому відбувається незначне нагрівання оброблюваних поверхонь деталі внаслідок тертя і невантаженого обкатування в середовищі хаотично рухомих абразивних зерен. Порівнюючи зі звичайним очищенням така обробка гарантовано знижує шорсткість поверхні до $Ra\ 0,32...0,63$. Одним з перспективних методів абразивної обробки є планетарно-ротаційний [84].

Зовнішній вигляд результату обробки поверхні, на прикладі сегменту лопаток турбін, наведений на рис.1.12 та необхідне обладнання для реалізації даної технології зображено на рис.1.13.



Рис.1.12 – Турбінні лопатки поліровані планетарно-ротаційним методом.



Рис.1.13 – Обладнання для планетарно-ротаційної обробки.

Метод обробки деталей складної форми заснований на ефекті псевдорозрідження сипучих матеріалів і характеризується створенням «кипіння» шару абразиву. Реалізація ефекту «кипіння» шару абразиву відбувається завдяки струменю стисненого повітря. Виробничі відпрацювання

методу показують, що повне зрізання задирок на деталях (від кольорових металів до конструкційних сталей титанових і жароміцних сплавів) становить від 3 до 15 хвилин. Дана технологія дозволяє формувати мікрорельєф поверхонь, що забезпечує відмінні адгезійні характеристики обробленої поверхні.

Реалізація процесу турбоабразивної обробки найбільш ефективна для відкритих поверхонь деталі. Недоліком методу є ускладнений доступ до закритих поверхонь деталей та неможливість рівномірної та точної обробки тонкостінних елементів типу кромки лопаток, стисла характеристика методу наведена в таблиці 1.2. Крім цього реалізація технології потребує значним матеріальних затрат на закупівлю обладнання що в нинішніх реаліях України реалізувати досить складно.

Піскоструменева обробка. Будь-яке виробництво машинобудівної галузі, в тому числі авіаційне та ракетно-космічне, потребує продуктивних, технологічних та низькозатратних методів обробки деталей та виробів.

Прагнення зменшення собівартості механічної обробки, підвищення її продуктивності та ефективності, сприяли створення методів обробки, в яких інструмент не має механічного зв'язку з верстатом. На теперішній час розроблена велика кількість прогресивних технологічних процесів для забезпечення необхідної чистоти і якості поверхонь деталей машин, до яких належить метод чистової обробки деталей машин з використанням ударно-імпульсного впливу на поверхню струменя незв'язних абразивних часток.

Піскоструменева або абразивно-струменева обробка – це метод обробки, при якому в якості інструменту використовуються багатофазні струмені. В залежності від фізичної складової та кількості фаз поділяють на обробку сухими абразивними матеріалами чи дробом, та обробку в рідкій фазі струменя, в середовищі рідини (затоplenі струменеві фази). Зазначені вище методи використовуються як на завершальних операціях технологічного процесу, наприклад, для поверхневого зміцнення чи декоративного

оздоблення поверхонь, так і для підготовки поверхонь до подальшої обробки чи нанесення захисних покриттів.

Такі способи обробки знайшли широке застосування в багатьох галузях машинобудування для проведення шліфування і полірування деталей особливо складної конфігурації, а також при необхідності отримання чистої поверхні без спрямованих слідів обробки, підвищення міцності, отримання поверхонь з високою адгезійною здатністю, покращення антикорозійних властивостей і зчеплення з гальванічними покриттями та фарбами, очищення від окалини, запобігання корозії тощо [88]. Природа абразивно-струменевої обробки полягає у взаємодії потоку абразивних часток чи твердих тіл (50-80 м/с) на оброблювану поверхню деталі і при ударі виконує роботу, зміцнюючи стан цієї поверхні. В основному фізико-механічні властивості поверхонь, оброблені струменевим потоком незв'язаних твердих тіл, слугують критеріями підвищення ефективності обробки та вихідними параметри процесу до яких відносять мікрорельєф та шорсткість.

При масовій дії абразивних зерен на матеріал утворюється поверхня з матовою текстурою та значною площею без будь-яких направлених слідів обробки, що наділяє її цінних властивостей, що підтверджують електронно-мікроскопічні знімки поверхонь мікрорельєфу [89]. Залежно від матеріалів, які використовуються для обдубування, поверхня набуває різкого характеру і ступеня шорсткості [90]. Вимірювання шорсткості згідно даними профілограм свідчать про те, що матові поверхні характеризуються більшою густиною профілю, в порівнянні з поверхнями, обробленими ріжучим інструментом, що є значною перевагою [89].

Варто відзначити, що деталі та вироби з високорозвинутими поверхнями володіють властивостями накопичення і утримуванням значної кількості змащувальних матеріалів, тому метод абразивно-струменевої обробки поверхонь рекомендують застосовувати для фінішної обробки пар тертя.

Основною вимогою до будь-якого методу обробки є прогнозованість отримання необхідних показників якості поверхні. Раціональний вибір

ефективних технологічних режимів є гарантією забезпечення необхідних результатів струменевої обробки. При визначенні ефективних режимів обробки виникає необхідність врахування великої кількості вхідних параметрів, серед яких характеристики обладнання, абразивного потоку, робочого середовища, властивостей матеріалу та форми оброблюваних поверхонь виробів, та відсутність чітких рекомендацій, особливо у випадку абразивно-струменевої обробки складнопрофільних поверхонь, достатньо ускладнюють цей процес.

До переваг даного методу можна віднести поверхнєве зміцнення і зносостійкість. При обробці поверхонь абразивним потоком твердих тіл зростає втомлювана міцність і зносостійкість сталей, що пояснюється створенням на поверхні наклепаного шару, а також тим, рівномірним розподілом заглиблень, отримані в результаті ударно-ріжучої дії абразивних частинок, що не є різкими концентраторами напружень.

При необхідності обробки виробів із збільшенням розмірів та складнопрофільними поверхнями абразивно-струменевий метод іноді залишається єдиним альтернативним методом для забезпечення необхідних показників якості поверхонь виробів. Крім переваг обробки абразивно-струменевим потоком, варто відзначити і недоліки даного методу, зокрема екологічні. Процес роботи установок абразивно-струменевої обробки (сухого типу) супроводжується значним шумом та утворенням кварцевого або іншого пилу, вміст якого як в робочій зоні робітника часто перевищує допустимі санітарні норми (для кварцевого пилу – 2мг/м^3 , для металевого пилу – 10мг/м^3) [91], не зважаючи на застосування потужної примусової вентиляції. Вище зазначені фактори є шкідливим для здоров'я персоналу працюючих на абразивно-струменевих установках (сухого типу). Вивчення та аналіз наукових праць свідчить про те, що вирішення поставлених задач базується на практичному досвіді і експериментальних даних, а в свою чергу обмежує можливості проектування обладнання і чим пояснюється зростання вартості та часу конструкторських розробок. Зважаючи на зазначені фактори,

необхідним завданням є покращення ефективності режимів абразивно-струменевої обробки, що дозволить знизити рівень забруднення в зоні роботи і підвищення контрольованості процесу, зниженням його вартості та розробка рекомендацій для автоматизації процесу.

При вивченні літературних джерел, виявлено значну кількість науково-експериментальних досліджень різноманітних методів струменевої обробки. Завданням даних досліджень було вирішення прикладних задач обробки певних марок матеріалів [92-95]. На теренах України основи теоретичних та частина експериментальних досліджень абразивно-струменевої обробки викладені в монографії та були розвинені в працях [96-98]. Вивчення доступних наукових праць дозволило визначити ряд задач, для вирішення яких необхідні подальші теоретичні дослідження, особливою є потреба у визначенні режимів абразивно-струменевої обробки за умов рівномірного впливу на всю криволінійну поверхню виробу. Однак обробка даним методом лопаток моноколіс закритого типу потребує додаткових досліджень та відпрацювання, стисла характеристика методу наведена в таблиці 1.2.

Гідроабразивна обробка. Гідроабразивна обробка (ГАО) – це високо ефективний, чистий та енергозберігаючий метод обробки, що використовується для розкроювання листового матеріалу, прорізання пазів (рис.1.14б), вікон, прошиванні отворів, очищення та полірування зовнішніх і внутрішніх складнопрофільних поверхонь, у тому числі і у важкодоступних місцях виробів, маркування та гравіювання [13, 99]. При гідроабразивній обробці (рис.1.14а) в установках, завдяки насосам високого тиску створюється тиск струменя води 3 (близько 400 МПа), що витікає через змішувальні елементи сопла 1. При обробці сопло 1 переміщується відносно непрофільованої заготовки 2.

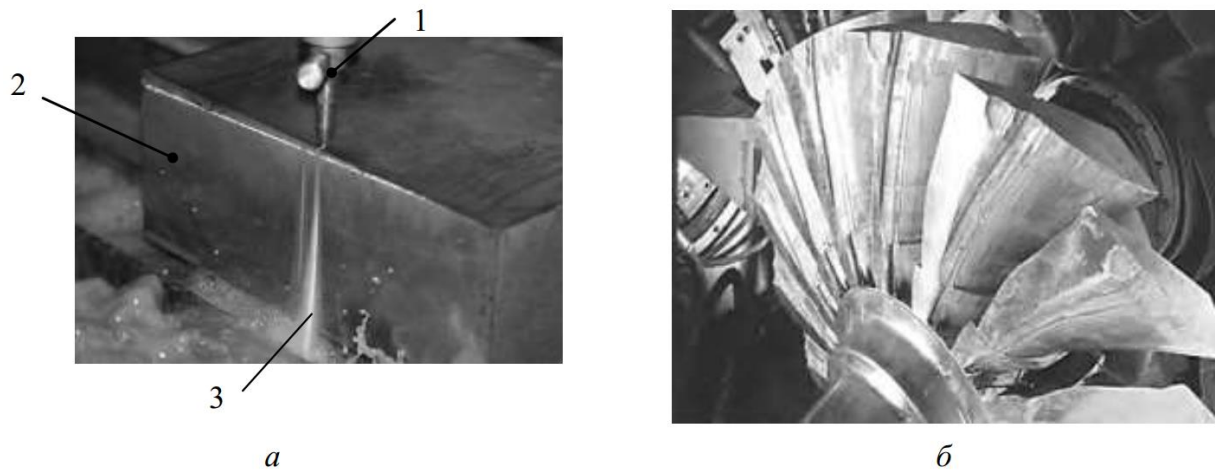


Рис.1.14 – Гідроабразивна обробка міжлопаткових каналів робочих коліс турбін [100]: а – приклад обробки; б – робоче колесо після обробки;

1 – змішувальна трубка сопла; 2 – заготовка;

3 – водний струмінь абразивних часток.

Відсоток абразивних елементів в суміші коливається від 20 до 40%. Результатом обробки є очищені матові поверхні без різноспрямованих рисок і задрів, що характерні для існуючих методів механічної обробки. У струмені суспензії кожній частинці абразиву надається саме така кінетична енергія, якої достатньо для видалення з оброблюваної поверхні невеликої частки матеріалу, нагрівання в місці контакту частинки усувається порцією рідини, що рухається разом з цією частинкою [66]. Основними недоліками гідроабразивної обробки є: порівняно короткий термін роботи сопел (до 50 год) [100]; складність управління обробкою, обумовленого специфікою взаємодії струменя і оброблюваного матеріалу, низька точність [14], погана якість отриманих поверхонь міжлопаткового каналу (рис.1.14,б) та складність контролю процесу обробки.

Спроби використовувати метод гідроабразивної обробки для підвищення продуктивності попереднього прорізання міжлопаткового каналу не став успішним [13]. Однак дана технологія може використовуватися не тільки для розкрою матеріалів та прорізання пазів. В порівнянні з абразивно-струменевою обробкою (сухого типу), гідроабразивна обробка дозволяє

використовувати в якості абразивних матеріалів шліфувальні та мікрошліфувальні порошки [101]. Геометричні параметри абразивного матеріалу обирають в межах 300-7 мкм, в залежності від призначення операції технологічного процесу. Дослідження свідчать, що гідроабразивний метод обробки дозволяє обробляти поверхні виробів з шорсткістю менше $Ra\ 0.5\ \mu\text{m}$ з мінімальним збільшенням шорсткості. У результаті обробки виходить чиста матова поверхня (рис.1.15) [102].



Рис.1.15 – Поверхня турбінної лопатки після обробки методом ГАО на стаціонарному обладнанні [102].

Обробка мікро-шліфувальними порошками, дозволяє отримати шорсткість поверхні аналогічну показникам напівчистового шліфування [102].

В деяких працях [103-105] вивчався вплив технологічних факторів процесу ГАО на показники шорсткості та форми обробленої поверхні заготовок з різних матеріалів а також обґрунтована ефективність вибору тих чи інших технологічних режимів. Однак, для визначення ефективних параметрів процесу необхідно враховувати також вплив зернистості абразивного матеріалу, концентрації суспензії, швидкості взаємного переміщення сопла і заготівки на шорсткість обробленої поверхні [101].

Розглядаючи можливість застосування даного методу для обробки моноколів закритого типу однозначного висновку дійти складно через те, що подібних робіт до цього часу не проводилось. Для обробки закритих лопаток даний метод потребує додаткових досліджень та відпрацювання, що

дозволило б зробити відносно однозначний висновок, однак реалізація даної технології в сучасних реаліях України знаходиться під питанням. Стисла характеристика методу наведена в таблиці 1.2.

Галтування (галтовка). Один з видів безрозмірної обробки деталей з метою очищення від завусин та облою, окалини та ржавчини, скруглення гострих кромek, отримання необхідної шорсткості поверхні, полірування. Даний метод обробки застосовується у випадках, коли необхідно обробити велику кількість однотипних деталей з гарантованими параметрами шорсткості поверхні та зменшенням частки ручної праці.

Режимами галтовки є частота обертання або коливання барабана (залежить від типу обладнання) та тривалість обробки. Перед обробкою необхідно визначити:

- тип і розмір абразивного тіл (галтовочних елементів);
- тип компаунду (технологічної рідини, у якій відбувається обробка;
- співвідношення оброблюваних виробів та наповнювача;
- концентрація компаунду, спосіб подачі (постійний, проточний) об'єм компаунду у випадку відсутності проточної системи подачі, частоту його зміни.

Кожний з вище зазначених пунктів у різній мірі впливає на кінцевий результат галтовки. В умовах серійного і дрібносерійного виробництва, коли необхідно в найкоротші терміни виконати галтовку невеликих партій різних виробів, єдиним методом визначення найбільш ефективного абразивного наповнювача являється безпосередній практичний досвід та експериментальні напрацювання.

Підбір наповнювача в процесі роботи має ряд недоліків [106]:

- тривалість процесу;
- непередбачуваність результату;
- підвищена вірогідність бракування деталей (завал кромek, втрата розмірів).

Розмір і форма абразиву значно впливають на продуктивність процесу. За загальним правилом, розмір абразивного наповнювача повинен бути таким, щоб він не застрягав у пазах, поглибленнях і отворах деталей [106]. Дана технологія потребує поглибленого вивчення та значної експериментальної бази напрацювання.

Недоліками даної технології є значний рівень шуму при роботі та висока вартість обладнання і галтовочних тіл (наповнювача), крім цього проблемою є складність прогнозування обробки та неможливість обробки тонкостінних елементів деталей з криволінійною поверхнею по типу закритих лопаток. Обробка також обмежується розміром каналу між лопатками та мінімальним розміром галтовочних тіл, що при неправильному їх підборі може призвести до пошкодження оброблювальної деталі або застрягання їх в каналах лопаток, більш стисла характеристика методу наведена в таблиці 1.2.

Шліфування абразивними стрічками. Даний тип абразивної обробки є більш технологічним, ніж полірування за допомогою абразивних кругів [66, 107]. Абразивна стрічка представляє собою гнучкий абразивний інструмент, спеціально підготовлену тканинну або паперову основу з нанесеним і закріпленим на ній абразивом за допомогою клеючих речовин абразивним шаром. Шліфування та полірування абразивними стрічками є поширеним методом при шліфуванні (плоскому, круглому і безцентрово), чорновій та чистовій обробці деталей, при зачищенні поковок, виливків, труб та листового матеріалу. Використовується обробка абразивними стрічками замість ручної обробки при виконанні слюсарних робіт і при доведенні деталей складної форми. Полірування абразивною стрічкою дозволяє знизити шорсткість поверхні без зміни форми і розмірів деталі.

Шліфування абразивними стрічками має значні переваги в порівнянні наприклад з обробкою абразивними колами: більша площа контакту між стрічкою поверхнею обробки; більша продуктивність шліфування за один оберт стрічки; постійна швидкість стрічки, менший коефіцієнт тертя стрічки по поверхні, ніж зв'язка абразивного круга; зменшення температури при

обробці; можливість шліфування та полірування складнопрофільних поверхонь; зміна продуктивності при зміні діаметрів контактних роликів; значна еластичність абразивної стрічки сприяє підвищенню вібростійкості системи; однотипна шорсткість оброблюваної поверхні; можливість агрегування верстатів для стрічкового шліфування. До недоліків стрічкового шліфування слід віднести: розтягнення стрічки в процесі роботи; неможливість досягнення високої точності форми і розмірів, обробка уступів на деталі, тонкого шліфування дрібнозернистими абразивами; порівняно невисока стійкість стрічки та короткий термін роботи.

Шліфування стрічками неможливо використовувати у випадку обробки лопаток моноколів закритого типу, що обумовлене не тільки розмірами каналів між лопатками та їх профілем, але і характером обробки, який не забезпечує повного контакту стрічки з оброблюваною поверхнею, оскільки при цьому можлива обробка тільки спинки лопатки без урахування жолоба, обробка якого даним методом технологічно неможлива, більш стисла характеристика якого наведена в таблиці 1.2.

Обробка поверхневим пластичним деформуванням. Широкого використання набув метод метод зміцнюючої обробки дробом [66, 108-110]. Суть методу в тому, що на майже повністю готову деталь спрямовується суміш повітря або рідини з кульками або дробом, діаметром 0,5-5,0 мм. Для отримання дроби використовують різні матеріали: чавун, сталь, скло і т.д. Форма дроби може бути правильно сферичної як кульки для підшипників кочення так і неправильної у вигляді литого або рубаного дроби. Для даного типу обробки є такі характерні ознаки:

- після численних ударів кульок по оброблюваній поверхні відбувається зменшення шорсткості;
- енергія потоку дроби достатня для поверхневого пластичного деформування матеріалу деталі, створення наклепаного шару, що в підсумку підвищує ресурс експлуатації деталей і виробів в цілому.

Для забезпечення необхідної якості поверхні, зменшення її шорсткості досить ефективна гідродробеструменева обробка [111]. Під час такої обробки зміцнення поверхні відбувається при гідродинамічному терті, коли між дробом і поверхнею завжди знаходиться шар мастильно-охолоджувальної рідини, а поверхня дробу постійно покрита рідкою плівкою. Це дозволяє навантаження в зоні контакту розподіляти найбільш рівномірно, тоді залишкові стискаючі напруження також рівномірно поширюються по глибині, знижується можливість появи мікротріщин у місці переходу від наклепаного шару до вихідного матеріалу деталі.

Однак не дивлячись на наявні переваги даний метод має значні недоліки такі, як недостатній рівень шорсткості, значна вартість скляного або металевого дробу, складність контролю процесу обробки та неможливість обробки закритих профілів лопаток, крім того при наявності тонких крайок лопаток є ризик їх пошкодження, більш стисла характеристика наведена в таблиці 2.

Комбінована електрична обробка. У сучасному машинобудуванні одним з напрямків формоутворення деталей зі складною геометрією є використання розмірної електрообробки із застосуванням твердого струмопровідного наповнювача. Даний процес може бути охарактеризований незначним локальним зніманням металу, високими вимогами до якості отриманої поверхні і обмеженим доступом інструменту в зону обробки. До об'єктів дослідження можна віднести елементи агрегатів для хімічної і нафтогазопереробної промисловості, вузли газотурбінних двигунів, що працюють в умовах знакозмінних силових і температурних навантажень, це канали складної форми, корпуси і робочі колеса відцентрових насосів і компресорів, різні гвинтові поверхні шнеків і т.п.

Актуальною проблемою є обробка деталей з складнопрофільними закритими поверхнями, що не дозволяють підвести на мінімальну відстань електрод. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є синтез електрохімічної обробки і механічного впливу гранул твердого струмопровідного

наповнювача [112] на поверхню деталі. Він дозволяє обробляти поверхні, віддалені від електрода на кілька десятків міліметрів з шорсткістю $Ra=0,4\ldots0,6$ мкм.

Даному методу притаманні якості обох технологічних процесів і його використання дозволяє отримати такі переваги як:

- зниження енергоємності процесу і зменшення технологічного часу на виготовлення деталі;

- поява можливості фінішної розмірної обробки складнопрофільних поверхонь, віддалених від електрода.

Регулюючи розмір і змінюючи матеріал гранул, вдавалося обробляти ділянки поверхні, віддалені від зрізу сопла на відстань до 100 мм. Розроблено кілька можливих технологічних схем обробки [112-115]. Для обробки фасонних поверхонь розроблений електрод-інструмент, який дозволяє рівномірно розподіляти гранули по оброблюваній поверхні. Електроліт з наповнювачем через конфузор рівномірно розподіляється по перетину потоку і надходить в сопло з каналами у вигляді концентричних кіл, через які вони потрапляють на оброблювану поверхню. При експериментальному і теоретичному вивченні процесу електрохімічної обробки із застосуванням струмопровідного наповнювача вивчений механізм впливу гранул на питому електропровідність в міжелектродному проміжку та на продуктивність процесу.

При інших розмірах наповнювач, виконаний з того ж матеріалу, навпаки, значно знижує питомий опір міжелектродного проміжку та інтенсифікує процес анодного розчинення металу заготовки.

Граничне значення лінійного розміру гранули наповнювача, при якому вона змінює характер своєї провідності, було названо «критичним діаметром» [112]. При застосуванні абразивного наповнювача для безрозмірного електрохімічного шліфування високоміцних сталей і алюмінію вдалося домогтися підвищення питомої величини металу в 50...100 разів у порівнянні з звичайною віброобробкою. При цьому застосовувалася суміш діелектричних гранул і природного кварциту.

Використання методу поділу процесу обробки на три етапи: абразивне зачищення, анодно-абразивна обробка та остаточне абразивне зачищення, дозволили отримати шорсткість поверхні $Ra=0,32\ldots0,63$ мкм, а похибка профілю доходила до 10...11% від заданих розмірів деталі. Виконані роботи [116] щодо підвищення точності обробки та збільшення її технологічних можливостей показали, що найкращі результати досягаються за умови незакріплених деталей в корпусі з абразивними гранулами і накладенням електричного струму. Найбільш широке застосування отримали сталеві і чавунні гранули, а також гранули, виготовлені з графіту, графітових композицій та мінералокерамічних гранул, що мають різну електропровідність у залежності від просторової орієнтації [112, 117]. Як видно, ефективним є комбінований вплив названих методів у частині комплексного поєднання найбільш ефективних параметрів обробки, стосовно до поверхонь складного профілю деталей з гвинтовими каналами.

Однак не дивлячись на новизну методу та його відносну універсальність застосовувати його раціонально тільки для обробки великогабаритних моноколіс закритого типу з нескладним профілем, що сприятиме проходженню абразивної маси з електролітом через канали між лопатками. Іншою причиною є обмежений розмір гранул, що може бути використаний для обробки, а це в свою чергу накладає обмеження на габаритні розміри оброблюваних деталей.

Крім цього обладнання для даної технології на даний час виготовляється тільки закордоном, що обумовлює його високу вартість та неможливість реалізації в нинішніх реаліях України, більш стисла характеристика наведена в таблиці 1.2

Електрохімічна обробка (ECM)/(PECM) — це процес видалення матеріалу з поверхні деталі за допомогою електролізу, де напруга подається між формувальним електродом (катодом) і деталлю, що обробляється (слугує анодом), через електролітичну рідину [118-119]. Видалений матеріал осідає в електролітичному розчині у вигляді гідроксиду металу.

Процес обробки відбувається без термічних і механічних навантажень, тому властивості матеріалу не порушуються, тому відсутній білий шар. Він представлений як хороша альтернатива для великих партій і матеріалів, які дуже мало піддаються механічній обробці, оскільки електрод має менше зношення. На рис.1.16 показано схему застосування методу ЕСМ при експериментальній обробці сплаву Тi60 з метою визначення ефективних параметрів обробки для отримання необхідної шорсткості поверхні [120].

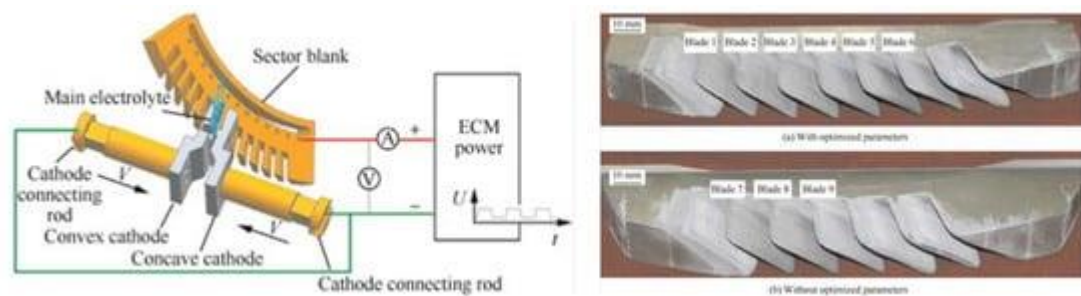


Рис.1.16 – Визначення методу електрохімічної обробки (ЕСМ) для блиску та лопаті в Ti60 блиск з використанням ЕСМ [120].

Імпульсна/точна електрохімічна обробка (РЕСМ) — це варіант ЕСМ, який поєднує імпульсну напругу з коливальним рухом катода, що забезпечує кращу точність обробки. Основна незручність цього процесу полягає в тому, що інвестиції в обладнання значні, а показники обробки низькі, близько 0,5 мм/хв [121-122]. Одним із основних застосувань цих методів ЕСМ і РЕСМ є робочі колеса компресорів турбін високого тиску.

Вагомим недоліком електрохімічного методу обробки є те, що електрод-інструмент повинен мати певну форму міжлопаткового каналу, тому ЕХО не застосовують на дослідному і одиничному виробництві [123]. Були розглянуті можливості використання універсального інструменту з керуванням траєкторії його руху при обробці моноколіс (рис.1.17,б) [124-126].

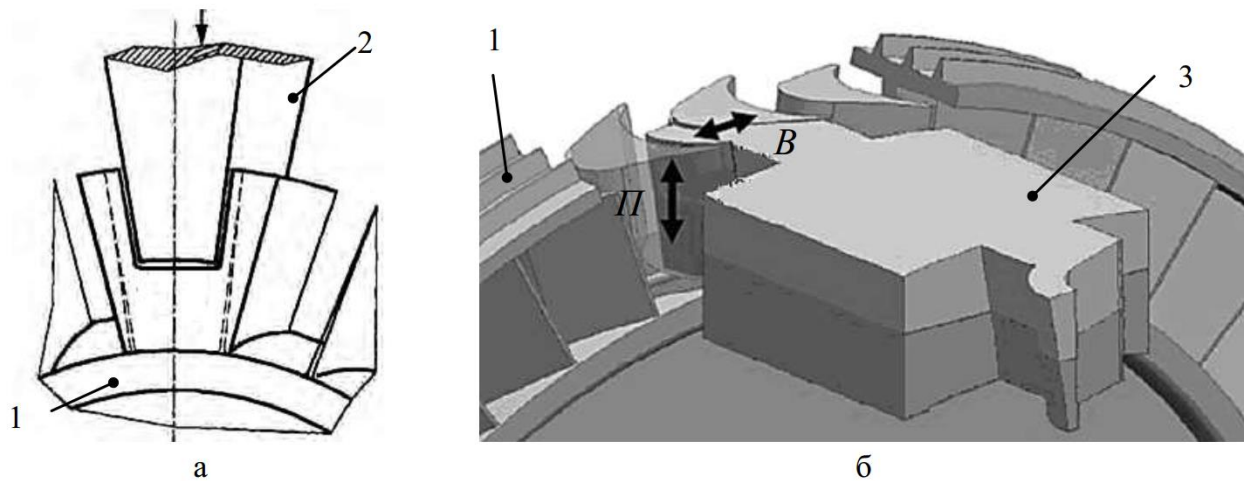


Рис.1.17 – Електрохімічна обробка:

1-деталь; 2, 3- електрод; а – спеціалізований інструмент [126];

б – універсальним інструментом [126].

Електрохімічне зняття припуску гарантує отримання поверхонь високої якості [126]. Відомо, що закордонні виробники ГТД (такі як General Electric Company, MTU Aero Engines GmbH, Volvo Aero Corporation та інш.) успішно використовують ЕХО в якості операції попереднього формоутворення міжлопаткового каналу моноколів з використанням непрофільованих електродів [127-128], так і для розмірної обробки пера лопаток профільними електродами-інструментами [129-130]. Зважаючи на відсутність силового впливу на деталь при ЕХО в її поверхневому шарі не створюються будь-які додаткові напруження, що дозволяє використовувати її на фінішному етапі виготовлення [131].

Для виготовлення моноколів електрохімічним методом обробки необхідне дороге обладнання [132], а також ефективні методики розрахунку форми електрода [133] і траєкторії його руху [134]. Крім того, при електрохімічній обробці невелика швидкість зняття матеріалу (0,01...0,05 мм / хв [135], тому її не раціонально використовувати на чорновому етапі для видалення великого обсягу матеріалу з міжлопаткового каналу осьових моноколів [136]. При цьому наголошується, що головний недолік цієї технології, є низька продуктивність чорнового прорізання міжлопаткових

каналів [137]. Вивченням факторів які впливають на точність і якість ЕХО займались деякі вчені [138]. Однак, не зважаючи на широкі технологічні можливості, ЕХО відрізняється від інших методів обробки складністю основного і допоміжного обладнання, складністю і високою вартістю пристосувань (для базування та закріплення лопаток), енергоємністю процесів, шкідливими умовами роботи персоналу та негативним впливом на навколишнє середовище [138], стисла характеристика методу наведена в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 - Порівняльний аналіз методів забезпечення кінцевої якості поверхонь лопаток моноколів закритого типу				
Метод забезпечення якості	Параметр якості	Переваги	Недоліки	Застосування для моноколів закритого типу з мінімальним розміром каналів
Фрезерування	Ra 1.6	-доступність; -висока точність; - висока продуктивність;	- низька стійкість інструменту; - висока вартість спец.інструменту; - не можлива обробка закритих профілів та нежорстких елементів; -обробка моноколів тільки відкритого типу;	Ні
Магнітно-абразивна обробка	Ra 0,32...0,2 Ra 0,26...0,11	- низька шорсткість поверхні; - екологічність; - забезпечення необхідної шорсткості з поєднанням поверхневого зміцнення; -можливість регулювання щільності та жорсткості оброблюючого інструменту;	-висока енергоємність процесу; -вибіркове застосування; -величина індукції залежить від профілю деталі; - не можлива обробка закритого профілю; - можлива обробка закритих лопаток окремо від диска, або лопаток відкритих моноколів; - неативний вплив обладнання на здоров'я людини;	Ні
Віб्रोабразивна обробка	До Ra 0,32...0,16	- обробка нежорстких деталей; -одночасна обробка групи деталей;	- велика тривалість обробки; - значний шум при роботі обладнання; - нерівномірна обробка деталей складної конфігурації; - неможливість обробки закритих поверхонь з тонкостінними елементами;	Ні
Абразивна екструзія	До Ra 0,32...0,16	- низька шорсткість поверхні; - чистова обробка отворів малого діаметру;	-значна трудомісткість роботи по підготовці еластично-абразивних сумішей; - складність видалення абразивних матеріалів з складно-профільних каналів; - висока вартість обладнання; - нерівномірна якість поверхні;	Ні

Продовження таблиці 1.2				
Метод забезпечення якості	Параметр шорсткості	Переваги	Недоліки	Застосування для моноколіс закритого типу з мінімальним розміром каналів
Турбоабразивна обробка	Ra 0,2...0,3	<ul style="list-style-type: none"> - низькі витрати енергії; - мінімальний час обробки; - простота реалізації процесу; - висока продуктивність процесу; - обробка складнопрофільних деталей; 	<ul style="list-style-type: none"> - необхідність спец.оснащення індивідуально під кожен тип деталі; - складність в обробці тонкостінних деталей; - висока вартість обладнання та витратних матеріалів; - значний рівень шуму обладнання; 	Ні
Піскоструменева обробка	Rz 150-80 Ra 0,8	<ul style="list-style-type: none"> - простота реалізації процесу; - універсальність; - значна швидкість обробки; - доступність обладнання; - можливе чистове шліфування (мікрошліфувальними порошками); - екологічність; - можливість багаторазового застосування витратних матеріалів; 	<ul style="list-style-type: none"> - нерівномірна обробка поверхні; - залишаються мікроподряпини на поверхні; - не можлива обробка точних криволінійних поверхонь; - визначення режимів обробки експериментально; - потребує додаткових досліджень та відпрацювання; - високий рівень запиленості при роботі; 	Так
Гідроабразивна обробка	Rz 40-20 Ra 6-0,25	<ul style="list-style-type: none"> - екологічність; - відсутність термічного впливу; - швидкість обробки; - можливість програмування та контролю процесу обробки; 	<ul style="list-style-type: none"> - висока вартість обладнання, оснащення та абразивних матеріалів; - нерівномірна якість та шорсткість поверхні; - висока вартість обладнання та витратних матеріалів; - потребує додаткових досліджень та відпрацювання; 	Так

Продовження таблиці 1.2				
Метод забезпечення якості	Параметр шорсткості	Переваги	Недоліки	Застосування для моноколів закритого типу з мінімальним розміром каналів
Галтування (галтовка)	До Ra 0,04	-простота процесу; - висока якість і шорсткість поверхні; - відсутність термічного впливу;	- складність призначення режимів обробки; - округлення фасок та притуплення гострих кромek; - неможлива обробка тонкостінних деталей; - неможлива обробка закритих поверхонь;	
Шліфування абразивними стрічками	Ra 1,25...0,6	- обробка криволінійних поверхонь; - висока якість поверхні; - простота реалізації процесу;	- велике зношення шліфувальної стрічки; - необхідність точного пристосування та обладнання; - можливість обробки залежить від розмірів деталей; - неможлива обробка закритих контурів деталей (канали, пази та інш.); - неможлива обробка всіх поверхонь міжлопаткового каналу;	Ні
Поверхнєве пластичне деформування	Ra 1.25	-низька шорсткість; -очищення і зміцнення поверхні; -екологічність; -простота реалізації; -можливість багаторазового застосування витратних матеріалів;	-неможлива обробка нежорстких деталей; -складність контролю обробки; визначення режимів обробки експериментально;	Ні
Електроерозійна обробка (ЕЕО)	Ra 0,6...0,3	- висока точність і якість поверхні; - можлива обробка складнодоступних місць;	-наявність дефектного шару після обробки; - необхідність складного оснащення та енергозатратного обладнання; - значний час обробки; - низька продуктивність; - відсутність універсальності; - складність програмування чистової обробки попередньо сформованих міжлопаткових каналів;	Ні

Продовження таблиці 1.2				
Метод забезпечення якості	Параметр шорсткості	Переваги	Недоліки	Застосування для моноколів закритого типу з мінімальним розміром каналів
Комбінована електрична обробка	Ra 0,6...0,4	- фінішна розмірна обробка складнопрофільних поверхонь; - зниження енергоємності; - висока продуктивність процесу;	- висока вартість спец.обладнання та оснащення; - складність підготовки процесу обробки; - визначення режимів обробки експериментально; - застосування електролітичних розчинів, що можуть чинити шкідливий вплив на екологію та здоров'я людини;	Ні
Електрохімічна обробка (ЕХО)	Ra 1,6...0,8	- відсутність впливу на оброблюваний матеріал; - відсутність наклепу, мех.напружень; - висока точність обробки (9-11 квалітет)	- складність оснащення; - робота в агресивному середовищі; - низька екологічність; - необхідність спец.дозволу на організацію виробничої ділянки.	Ні

1.5 Визначення напрямків дослідження

Широко відомі та освоєні механічні, немеханічні та комбіновані методи обробки не можуть в повній задовольнити суворі вимоги до якості складнопрофільних поверхонь закритих лопаток моноколес турбін, що піддаються екстремальним знакозмінним та ударним високочастотним навантаженням і при цьому не знижують технологічну собівартість, в більшості випадків здорожчують виробничий процес. З поміж розглянутих методів особливий особливий інтерес привертає метод абразивно-струменевої обробки. Даний метод приваблює простотою реалізації в порівнянні з іншими методами, доступність та простота обладнання та відносно низька вартість витратних матеріалів. Однак залишаються не вивчені питання теоретичного опису процесів формування заданого мікрорельєфу складнопрофільної поверхні абразивно-струменевими методами та їх науково-методичне обґрунтування. Вирішити це завдання можливо розробкою експериментального маршрутного технологічного процесу обробки та дооснащенням обладнання, що забезпечить реалізацію та контроль найбільш ефективних режимів обробки для отримання необхідних параметрів шорсткості поверхні.

Для вирішення завдання були сформовані наступні задачі:

- Розробити теоретичні основи технологічного забезпечення та принципи формування режимів обробки робочих поверхонь закритих лопаток.
- Обґрунтувати фізичну та математичну моделі технологічних підходів обробки;
- Встановити закономірності впливу режимів обробки на параметри формоутворення необхідної форми та шорсткості поверхонь лопаток.
- На основі виявлення закономірності створити технологічне забезпечення необхідних показників якості поверхні;
- Розробити новий і низько затратний технологічний процес підготовки робочих поверхонь лопаток закритого типу.

Висновки за розділом 1

1. З урахуванням конструктивних особливостей моноклі закритого типу, складності доступу інструменту, дрібносерійне або навіть одиничне виробництво, раціональним методом виготовлення в сучасних реаліях є адитивні технології такі як SLM та DMLS.

2. 3D-друк дозволяє виготовляти деталі складної конфігурації за короткий термін, однак питання забезпечення необхідної кінцевої якості поверхонь залишається актуальним, що спричинено нерівномірною шорсткістю, яка залежить від режимів друку та просторового розташування елементів виробу.

3. Аналіз літературних джерел показав, що кожен з доступних існуючих методів обробки даного типу виробів чи йому подібних має як переваги так і недоліки що обмежують їх застосування.

4. Виходячи з аналізу наукових даних, з точки зору доступності та можливості реалізації, характеру взаємодії з оброблюваною поверхнею, теоретично найбільш ефективним та перспективними методами є піскоструменева та гідроабразивна обробка, природа та сутність процесу обробки яких схожі між собою. Стисла технічна характеристика та кожного з вивчених в даному розділі методів наведена в табл.1.2.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Аналіз існуючої методики підготовки зразків

При розробці плану досліджень методу сухої абразивної обробки виникла необхідність в методиці підготовки та вивчення подібних зразків. При аналізі літературних джерел не було виявлено жодної методики у відкритому доступі стосовно оцінки шорсткості поверхонь закритих лопаток отриманих адитивним методом. Єдиною загальнодоступною інформацією, яка може слугувати для дослідження є методи оптичного контролю шорсткості та металографічний метод підготовки зразків матеріалів. Металографічний метод досить складний в реалізації та трудомісткий. Основна складність полягає в необхідності електронного мікроскопа та підготовка мікрошліфів зразків досліджуваних матеріалів. Виготовлення та підготовка мікрошліфів зазвичай складається з 5-ти основних операцій [139]:

1. Вирізка зразка (не обов'язково);
2. Закріплення зразка або монтування (не обов'язково);
3. Шліфування;
4. Полірування;
5. Травлення (виявлення мікроструктур);

Варто також зазначити, що кожна з цих операцій може виконуватись різними методами, в залежності від типу зразка, наповнювача та інш. [139].

Виходячи з цього реалізація процесу підготовки мікрошліфів вимагає необхідності спеціального обладнання, матеріалів, певної ділянки виробництва чи лабораторії, кваліфікованого персоналу та додаткових як часових так і фінансових затрат. Тому в результаті було прийнято рішення розробити нову спрощену методику з підготовки та дослідження та оцінки шорсткості поверхні лопаток моноколіс закритого типу отриманих адитивним методом.

2.2 Створення 3D-моделей зразків

Активний розвиток комп'ютерних технологій посприяв появі високопродуктивних та ефективних CAD систем, для вирішення задач проектування та конструювання. CAD системи – це програмне забезпечення, яке автоматизує роботу інженера конструктора і сприяє вирішенню завдань проектування виробів і оформлення технічної документації за допомогою ПК. Сучасні CAD дають змогу реалізувати ідею наскрізного циклу підготовки та виготовлення продукції складних промислових виробів. CAD/CAM/CAE системи успішно та активно розвиваються останніми роками, що сприяло їх класифікації на три рівні: високий, середній і низький. До високого рівня відносяться такі продукти, як Unigraphics, CATIA, ProEngineer і дають змогу оперувати досить значним набором функцій, але вони вимагають висококваліфікованих спеціалістів та сучасного комп'ютерного обладнання. Програмні продукти низького рівня (AutoCAD, DataCAM, SurfCAM) мають відносно обмежені функції, проте не потребують потужних комп'ютерів. До систем середнього рівня відносяться SolidWorks, SolidEdge тощо, що є «золотою серединою».

Вони забезпечують користувача достатнім набором функцій для розв'язання більшості задач [140]. Найбільш поширеною та економічно ефективною, з раціональної точки зору, є система SolidWorks. Пакет SolidWorks, розроблений одноіменною американською корпорацією Dassault Systèmes SE і являється додатком операційної системи Windows, за допомогою якого можна створювати 3D-моделі будь-якої складності і конфігурації [141], що можна продемонструвати на прикладі побудови 3D-моделі дослідного зразка сегменту лопаток турбіни (рис.2.1).

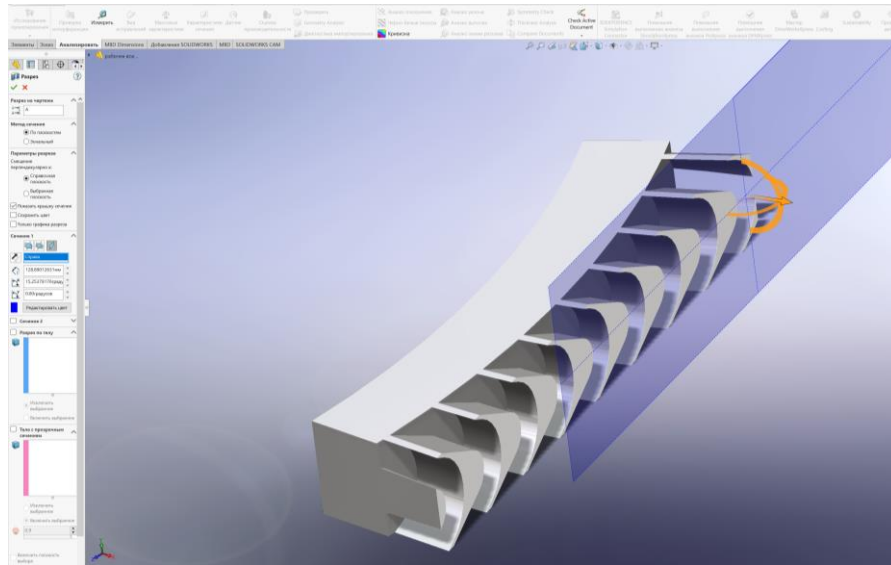


Рис.2.1 – Дослідний зразок сегменту лопаток турбіни на етапі моделювання в середовищі SolidWorks.

Основними і найбільш корисними функціями SolidWorks є:

- елементно-орієнтовне конструювання;
- парметричне конструювання;
- двонаправлена асоціативність між кресленням моделі та збіркою;
- функціональність з Windows;
- наявність бібліотечних елементів;
- підтримка ЄСКД;

Система SolidWorks містить стандартні елементи: кріпильні вироби, підшипники, сортамент прокатних сталей, зубчасті передачі тощо. Бібліотеки SolidWorks містять стандарти багатьох країн : США, Англії, Китаю, Японії та Німеччини.

Можливості SolidWorks також включають функції та необхідні модулі для візуалізації моделі близькою до реалістичної з метою кращого уявлення про роботу механізму. За допомогою одного з таких модулів PhotoWorks – можна створити фотореалістичні зображення деталей та збірок (рис.2.2). PhotoWorks надає можливість налаштовувати рендерінг фотографії в значному діапазоні можливостей, від корегування та вибору необхідної роздільної здатності до зміни формату.

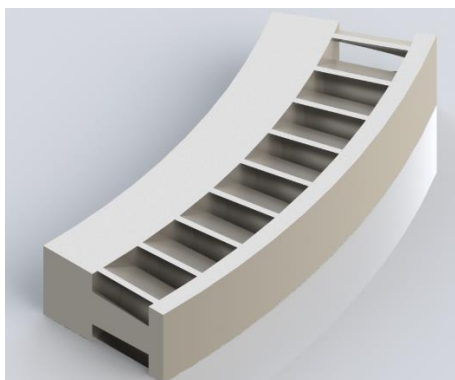


Рис.2.2 – Рендерінг зразка сегменту лопаток турбіни за допомогою PhotoWorks.

Важливим складовим елементом проектування є розрахунок: на міцність, кінематичні, гідравлічні, аеродинамічні та теплові. SolidWorks може використовуватись як база для деяких інших додатків таких як ANSYS та інші, які мають можливість виконувати вищезгадані розрахунки досить точно і без великих затрат часу.

2.3 Розробка методики підготовки зразків

Матеріалом для досліджень слугували дослідні зразки зі сплаву Inconel 718, виготовлені методом вибіркового лазерного плавлення (selective laser Melting - SLM). Матеріалом зразків слугував порошок сплаву Inconel 718 марки AMPERPRINT 0181.074 та розміру частинок 45^{+15} мкм. Хімічний склад готового виробу представлений в таблиці 2.1., контроль хімічного складу виконувався за допомогою прецизійного аналізатору «EXPERT 4L» [142].

Таблиця 2.1 - Хімічний склад Inconel 718 в зразках

Хімічний елемент	Вміст, %	Хімічний елемент	Вміст, %	Хімічний елемент	Вміст, %
Ni	52.5	Co	0.7	Ti	0.2
Cr	19.5	Mn	0.2	Si	0.2
Mo	3	Cu	0.6	C	0.08
Nb	5.1	Al	0.8	Fe	залишок

Виготовлення зразків проводилося на принтері ALT Alfa-150 оснащеним ітербієвим лазером з максимальною потужністю 500 Вт, з робочою зоною друку: $150 \times 150 \times 180$ мм. Процес друку проводили у захисній атмосфері аргону. Зразки-свідки сегментів лопаток (рис.2.3) були виготовлені у вигляді елементів робочого колеса турбіни з міркувань практичності та раціональності застосування матеріалу.

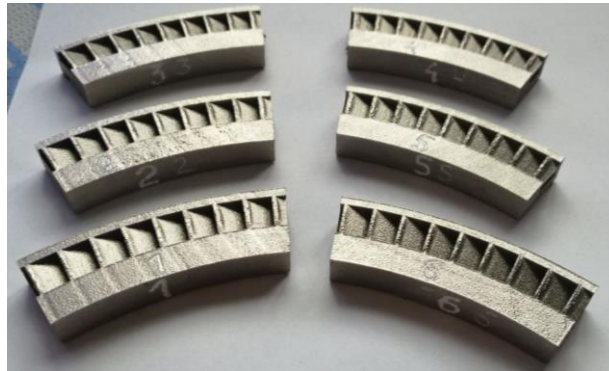


Рис.2.3 – Сегменти лопаток робочого колеса турбіни закритого типу.

Форма та профіль лопаток сегментів повністю ідентична штатному виробу, однак механічні характеристики, одна з яких це твердість, не відповідає штатному виробу, яка становить 45-47HRC. Для отримання необхідних характеристик сегментів та покращення подальшої механічної обробки лопаток було проведено декілька операцій термообробки. При проведенні першої термообробки відбувалось загартовування зразків лопаток турбіни разом зі зразками-свідками в печі СШО 144/1300 (рис.2.4) згідно режимів SAE AMS 5664 наведених в таблиці 2.2.



Рис.2.4 – Електропід СШО 144/1300.

Таблиця 2.2 - Режими ТО (Загартування по SAE AMS 5664)

Найменування операції	Температура зразків, °C	Середовище	Твердість до ТО, HRC	Твердість після ТО, HRC
Посадка в піч	25	Аргон	23	23-24
Нагрівання	1065	Аргон		
Витримка	1070	Аргон		
Охолодження	18	Вода Аргон		

Сутність другої термообробки полягала у проведенні старінні зразків лопаток турбіни закритого типу, згідно режиму SAE AMS 5664 наведеного в таблиці 2.3 та муфельній печі СНОЛ - 40/1300 (рис.2.5).



Рис.2.5 – Муфельна лабораторна піч СНОЛ - 40/1300.

Таблиця 2.3 - Режими ТО (Старіння SAE AMS 5664)

Найменування операції	Температура зразків, °C	Середовище	Твердість до ТО, HRC	Твердість після ТО, HRC
Посадка в піч	25	Повітря	23-24	47
Нагрівання	760	Повітря		
Витримка	760	Повітря		
Охолодження з піччю	650	Повітря		
Витримка	650	Повітря		

Для контролю механічних властивостей виконувались вимірювання твердості на твердомірі ТКМ2 (рис.2.6) до ТО, що становила 23HRC, та після останньої операції ТО, що забезпечувала твердість 46HRC.



Рис.2.6 – Контроль твердості зразків до ТО за допомогою твердоміра ТК-2М.

Виготовлення деталей, за технологією SLM, використовується при необхідності отримання виробів складної форми, що містить внутрішні канали криволінійного профілю чи перетину та тонкими стінками для авіа та ракетно космічної техніки, тому важливою вимогою є забезпечення стабільної та високої якості поверхонь деталей [142-144], [145-146], [147-148]. Проблема даного методу полягає в забезпечення необхідних вимог: високої якості форми та необхідної шорсткості поверхні виробів, мінімальний рівень пористості,

гаряче розтріскування, анізотропія, забезпечення необхідної мікроструктури синтезованого матеріалу [145-146].

Мікроструктура матеріалу після завершення процесу друку являє собою дисперсні, дендритні та комірчасті структури γ -фази в межах зон розплаву одиничних траєкторій руху променя, в результаті пошарового перекриття утворюється тіло деталі. Як видно з рисунку 2.7 [149], напрямок прикладення навантаження відносно напрямку побудови зразка, та його просторове положення впливає на мікроструктуру та механічні властивості [149].

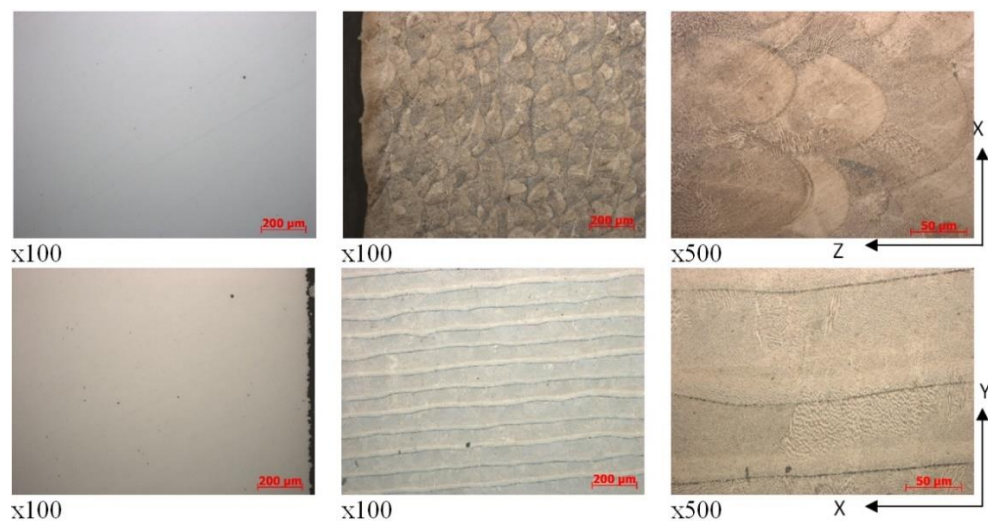


Рисунок 2.7 [149] – Мікроструктура зразків в різних площинах відносно положення, при друку в вихідному стані.

Термічна обробка Inconel 718 дозволяє отримати рівномірний комплекс механічних властивостей та складається з двох етапів: високотемпературний відпал з охолодженням до кімнатної температури і старіння. В результаті термообробки виділяються вторинні фази в металевій матриці, що сприяють зміцненню матеріалу. Старіння забезпечує виділення фаз нікель-алюміній, нікель-титан і нікель-ніобій при діапазоні температур 815-600 °C. Основним завданням термообробки є повний розчин тугоплавких компонентів при високій температурі (повний розчин в матриці), в іншому випадку старіння не забезпечить максимальної міцності.

Вивчення можливих варіантів зміни температур і тривалості витримки при обробці наведені в роботах [150-151], також вивчали можливість вилучення операції високотемпературного відпалу для виробів виготовлених з Inconel 718, за технологією SLM, враховуючи той факт, що кристалізація та охолодження при такому виробництві реалізуються з високими швидкостями [152]. Після витримки, при високій температурі, часто застосовують охолодження в воді для фіксації твердого розчину, одна для реалізації процесу потрібне додаткове обладнання. Найбільш раціональним, простим та доступним методом є охолодження на відкритому повітрі.

2.4 Методика дослідження та оцінки якості поверхні

Під шорсткістю поверхні розуміють сукупність нерівностей поверхні з відносно малим кроком. Шорсткість обробленої поверхні є результатом багатьох причин: тертя інструменту по деталі, вібрації інструменту і деталі, форми і нерівності кромek ріжучого інструменту та інших.

Шорсткість поверхні визначається в нормальному перетині, тобто перетині площиною, перпендикулярної до номінальної поверхні (рис.2.8).

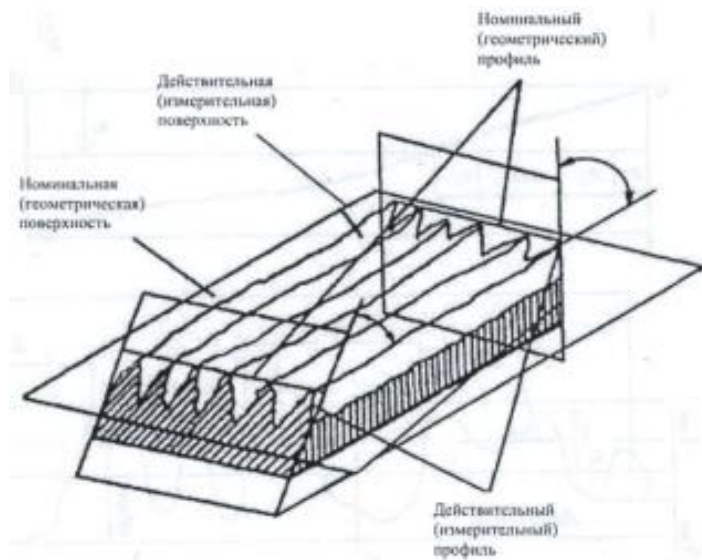


Рис.2.8 – Шорсткість поверхні.

ГОСТ 2789-73 «Шорсткість поверхні» встановлює конкретне найменування параметрів, типів нерівностей та їх напрямків, що повинні використовуватися при визначенні та оцінюванні величини шорсткості, числові значення параметрів і загальні вказівки по нормуванню. В основу стандарту покладено лінійна система середньої лінії (система М).

Базою слугує середня лінія профілю, що має форму номінального профілю і побудована так, що в межах базової довжини середнє квадратичне відхилення профілю до цієї лінії мінімальне.

Стандартом визначені наступні параметри шорсткості (рис.2.9).

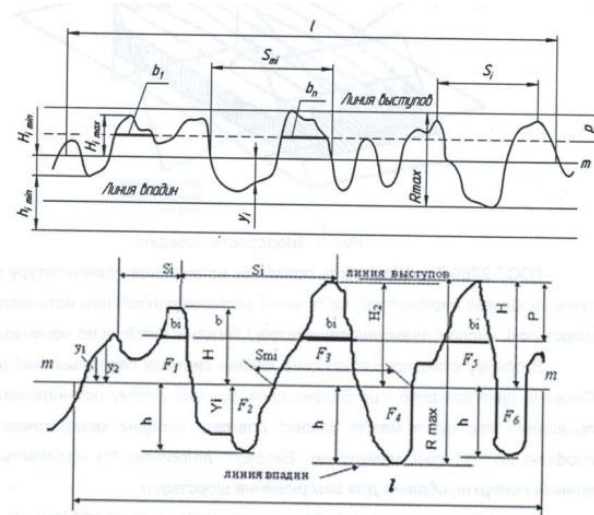


Рис.2.9 – Параметри шорсткості.

R_a – середнє арифметичне абсолютних значень відхилень профілю в межах базової довжини.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx \quad (2.1)$$

Висота нерівностей профілю по десяти точках R_z – сумарна кількість середніх арифметичних абсолютних відхилень точок п'яти найбільших мінімумів і п'яти найбільших максимумів профілю в межах базової лінії.

$$R_z = \frac{1}{5} (\sum_{i=1}^5 |H_{imax}| + \sum_{i=1}^5 |H_{imin}|) \quad (2.2)$$

де $H_{i \min}$ – відхилення п'яти найбільших мінімумів профілю.

$H_{i \max}$ – відхилення п'яти найбільших максимумів профілю.

Для середньої лінії, що має форму відрізка прямої

$$Rz = \frac{1}{5} (\sum_{i=1}^5 |h_{imax}| + \sum_{i=1}^5 |h_{imin}|) \quad (2.3)$$

де $h_{i \max}$ – відстань між п'ятьма максимумами найвищих точок до лінії, паралельній середній базовій і не перетинає профіль;

$h_{i \min}$ – відстань між п'ятьма найбільшими мінімумами точок до лінії, паралельній середній базовій і не перетинає профіль;

R_{\max} – це найбільша висота нерівностей профілю, а саме відстань між лінією виступів і лінією западин профілю в межах базової довжини. Вимоги до шорсткості поверхні повинні встановлюватися шляхом вказівки числового значення параметрів і значення базової довжини. Шорсткість поверхні визначається одним або кількома наведеними вище параметрами.

Для визначення числових значень параметрів шорсткості (кількісний метод оцінки) застосовують різні засоби вимірювання, до яких відноситься подвійний мікроскоп Линника (МІС-11), методика розрахунку шорсткості для якого наведена в п.2.5.

2.5 Опис конструкції та методика вимірювання шорсткості поверхні на подвійному мікроскопі Линника МІС-11

Інструментальний мікроскоп МІС-11 (рис.2.10) - це подвійний мікроскоп Линника дозволяє проводити вимірювання висоти нерівностей профілю плоских та циліндричних поверхонь за параметрами Rz , S , R_{\max} в межах від 0,8 до 63 мкм., тобто визначати клас чистоти поверхні з 3 по 9 включно, згідно ГОСТу № 2789-45. Ціна одного ділення барабанчика мікрометричного гвинта для переміщення столика дорівнює 0,01 мм.

На масивній основі приладу закріплена стійка, по якій переміщується кронштейн (15) з корпусом (1). У корпусі приладу змонтовані два тубуси: освітлювальний (13) і візуальний (12); розташовані під кутом 90° один до одного, переміщення тубусів здійснюється за допомогою гвинтів грубого і

тонкого налаштування (8) і (8а). Оптична схема приладу представлена на рис.2.11 Освітлювальний тубус (13) передає зображення щілини на досліджувану поверхню. Тубус може переміщуватися в осьовому напрямку за допомогою гайки (10), та фіксуватися в площині осей тубусів гвинтом (25).

Переміщення тубусів необхідно для фокусування щілини і приведення її зображення в поле зору візуального тубуса. У нижній частині тубуса встановлений об'єктив (7), а у верхній – ліхтар, яка висвітлює щілину через світлофільтр.

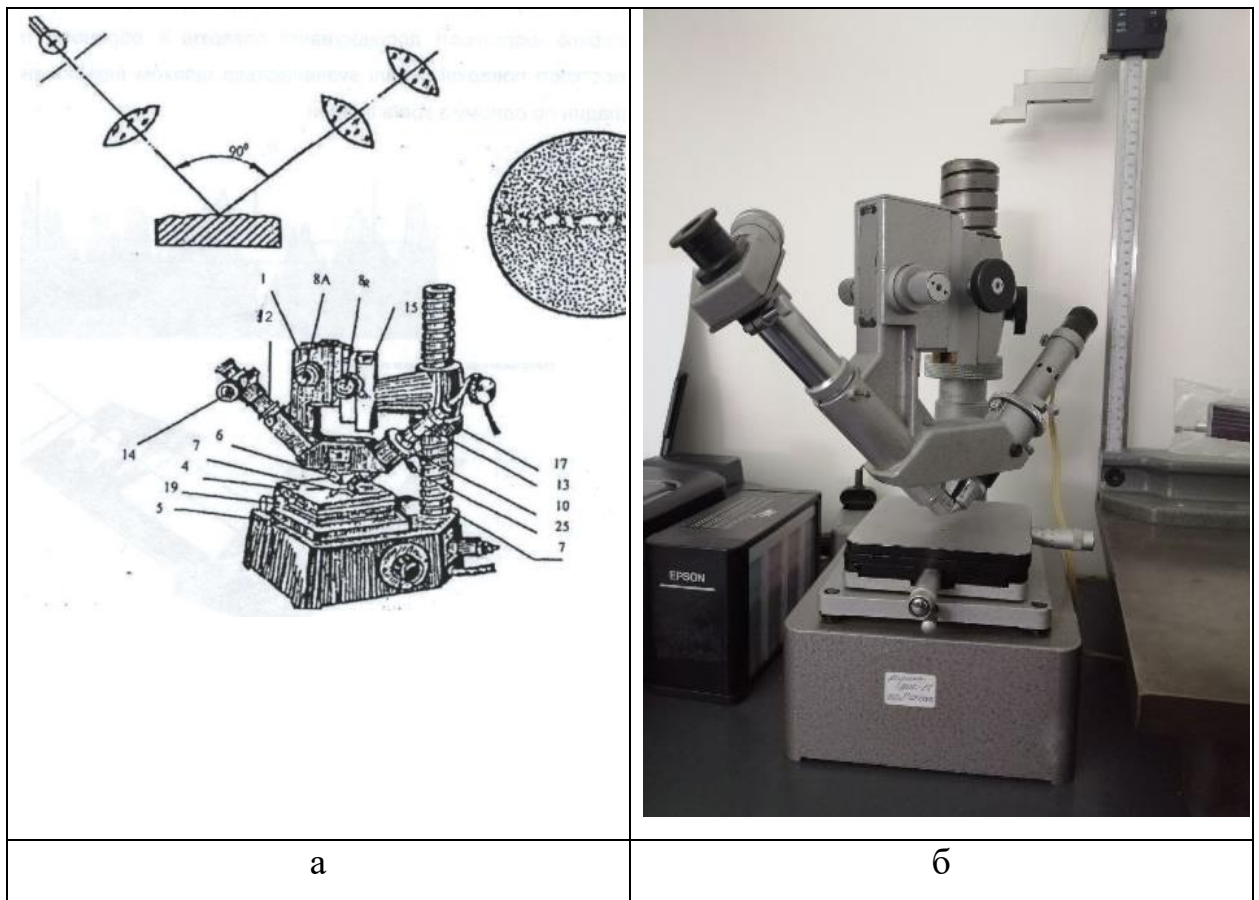


Рис.2.11 – Подвійний мікроскоп Линника МІС-11: а - оптична схема та будова мікроскопа подвійного мікроскопа МІС-11; б – загальний вигляд.

Візуальний тубус (2) слугує для спостереження і вимірювання шорсткості поверхні. У нижній частині тубуса встановлений об'єктив (6), аналогічний об'єктиву освітлювального тубуса; у верхній – гвинтовий окулярний мікрометр АМ-9.

На сітці окуляр – мікрометра розташовані дві взаємно перпендикулярні нитки перехрестя, що переміщується за допомогою барабана з ціною поділки 0,01 мм. Вибір об'єктів проводиться в залежності від величини нерівностей досліджуваної поверхні. На основі приладу встановлений столик (4), що рухається в двох перпендикулярних напрямках завдяки мікрометричним гвинтам (19). Ціна поділки гвинтів 0,01, межа переміщення 0-10 мм. Столик може обертатися і зупинятися в потрібному положенні гвинтом (5). Для виміру циліндричних деталей столик забезпечений призмою.

Робота приладу заснована на принципі світлового перетину (рис.2.12), яка полягає в тому, що на досліджувану поверхню проектується зображення вузької щілини, імітованої в освітлювальному тубусі приладу. Так як поверхня деталі має нерівності, то зображення щілини деформується, повторюючи нерівності профілю. Зображення деформованої щілини проектується об'єктом візуального тубуса на сітку, розташовану у фокальній площині окуляра.

Край щілини представляє зображення профілю шорсткості досліджуваної поверхні в обраному перетині. Параметри шорсткості поверхні деталі визначаються шляхом вимірювання висоти виступів і западин по одному з країв щілини.

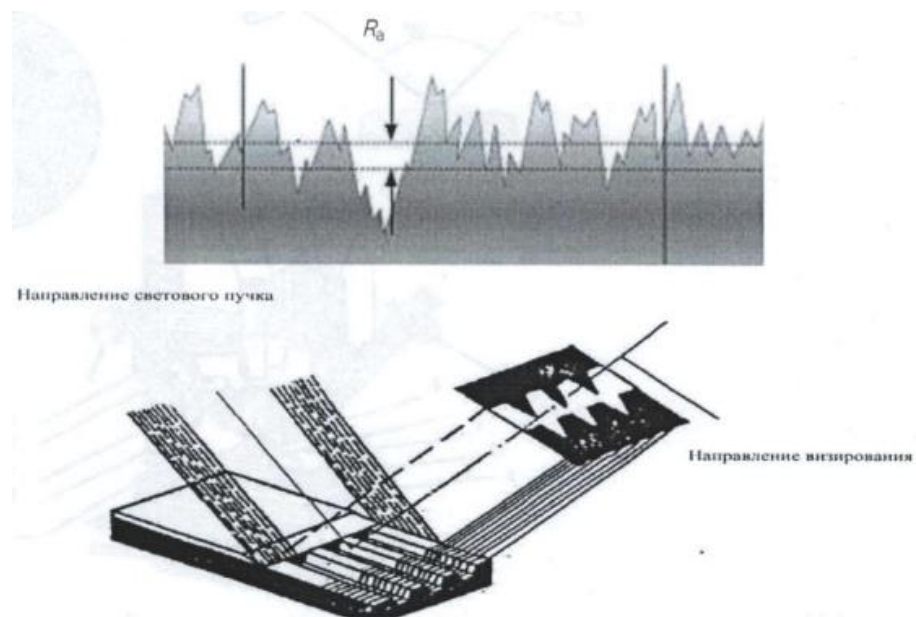


Рис.2.12 – Принцип світлового освітлення.

При вимірюваннях в залежності від орієнтовної величини шорсткості підбирають апертуру з необхідним збільшення об'єктиву, коефіцієнт якого використовується при розрахунку величини шорсткості. Дані характеристик об'єтивів та їх коефіцієнти наведені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 - Характеристики пар змінних апертур мікроскопу МІС-11

Апертура	Збільшення об'єктиву	Коефіцієнт	Межі вимірювання шорсткості поверхні ГОСТ 2789-59	Межі вимірювання шорсткості поверхні ГОСТ 2789-59
0,50	34,5×	0,141	7-9 кл.	Ra 0,63-Ra 0,1
0,37	18,0×	0,28	6-8 кл.	Ra 1,25-Ra 0,32
0,30	10,5×	0,47	5-7 кл.	Ra 2,5-Ra 0,63
0,13	5,9×	0,85	3-6 кл.	Ra 80-Ra 2.5

Схематичний та реальний вигляд зображення картини шорсткості в мікроскопі МІС-11 наведений на рис.2.13.

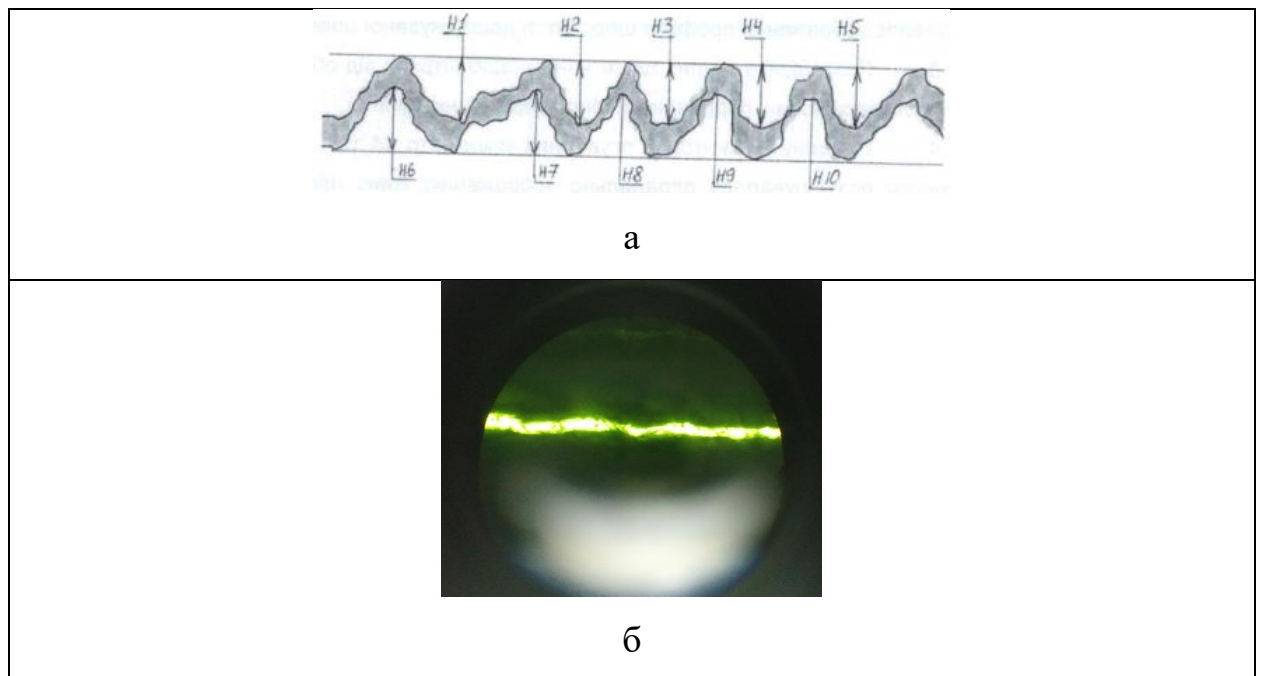


Рис.2.13 – Зображення з монокуляру МІС-11: а – схематичне зображення лінії контуру шорсткості; б – реальне зображення лінії контуру шорсткості апертура 0,13.

Приклад розрахунку для визначення класу шорсткості за допомогою мікроскопа МІС-11 виконується за формулами 2.4-2.7, на прикладі даних наведених в таблиці 2.5.

$$H_{cp} = \frac{H_1 + H_2 + H_3 + H_4 + H_5 + H_6 + H_7 + H_8 + H_9 + H_{10}}{10} \quad (2.4)$$

$$R_z = H_{cp} \cdot k \quad (2.5)$$

Перерахунок параметру R_z в R_a за формулою

$$R_a = \frac{R_z}{4} \text{ для грубих поверхонь} \quad (2.6)$$

$$R_a = \frac{R_z}{5} \text{ для більш чистих поверхонь} \quad (2.7)$$

Таблиця 2.5 - Приклад розрахунку шорсткості по 10-ти точкам найбільших вершин та найбільших впадин

H_1 , мкм	H_2 , мкм	H_3 , мкм	H_4 , мкм	H_5 , мкм	H_6 , мкм	H_7 , мкм	H_8 , мкм	H_9 , мкм	H_{10} , мкм	Апертура	k – коефіцієнт	H_{cp} , мкм	$R_z = H_{cp} \cdot k$, мкм	R_a , мкм	Клас шорсткості
10	15	30	45	35	25	30	20	15	35	0,37	0,28	26	7,28	1,456	6

Необхідні дані для визначення шорсткості на основі результатів розрахунку наведені в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 - Дані для перерахунку величин R_z в R_a та встановлення класу шорсткості поверхні по результатам проведення вимірювань.

Клас шорсткості	Позначення	R_a , мкм		R_z , мкм			Для переводу R_z в R_a
1	1 ▼	50	80 63 40	320 250 200	160		÷4
2	2 ▼	25	40 32 20	160 125 100	80		÷4
3	3 ▼	12,5	20 16 10	80 63 50 40			÷4
4	4 ▼	6,3	10 8 5	40 32 25 20			÷4

Продовження таблиці 2.6					
Клас шорсткості	Позначення	Ra, мкм		Rz, мкм	Для переводу Rz в Ra
5	5▼	3,2	5,0 4,0 2,5	20 16 12,5 10	÷4
6	6▼	1,6	2,5 5,0 1,25	10 ^{±4} 8 6,3 ^{±5}	÷4, ÷5
7	7▼	0,8	1,25 1,00 0,63	6,3 5,0 4,0 3,2	÷5
8	8▼	0,4	0,63 0,50 0,32	3,2 2,5 2,0 1,6	÷5
9	9▼	0,2	0,32 0,25 0,16	1,6 1,25 1,0 0,8	÷5
10	10▼	0,1	0,16 0,12 0,08 5	0,8 0,63 0,50 0,40	÷5
11	11▼	0,05	0,08 0,06 0,04 3	0,4 0,32 0,25 0,20	÷5
12	12▼	0,02 5	0,04 0,03 0,02 2	0,20 0,16 0,12 0,10 5 0	÷5
13	13▼	0,01 2	0,02 0,01 0,01 0 6 0	0,10 0,08 0,06 0,05 0 0 3 0	÷5
14	14▼		0,01 0,00 0 8	0,05 0,04 0,03 0 2	÷5

2.6 Рекомендації з підбору та підготовки абразивних матеріалів

При виборі абразивних матеріалів для піскоструменевого обладнання варто враховувати з якого матеріалу він виготовлений, яка фракція частинок і якими характеристиками вони володіють. Розмірність абразивних матеріалів називають фракціями, поділ на які реалізують методом просіювання на спеціальних ситах, номер сита вказує на розмір зерна. В нормативній та технічній документації на абразивний матеріал я наступні параметри: гранична фракція, найбільш крупна фракція, базова фракція, комплексна фракція та найбільш дрібна фракція та їх співвідношення у відсотках. Фракційний склад матеріалу знаходиться частіше всього в інтервалі від 0,125 до 4 мм і його вибір володіє особливим значенням при підборі абразиву.

Вибір фракції залежить від матеріалу поверхні, діаметру сопла та величини тиску в обладнанні. Твердість - здатність абразивних матеріалів не піддаватися деструктивним процесам при втисканні в нього іншого матеріалу з більш високою твердістю, на спеціалізованому обладнанні.

Ступінь твердості абразивного матеріалу описується за шкалою Мооса, поділяючи матеріали на десять рівнів, в якості еталонів використовується природний матеріал. До 1-го рівня належать м'які матеріали співвідносні за твердістю з тальком, до 2-го - гіпсу, 3-му рівню – кальциту, 4-му флюориту, 5-му - апатиту, 6-му – польовому шпату, 7-му – кварцу, 8-му класу – топазу, 9-му класу корунду та 10-й рівень – алмазу. Абразивні властивості матеріалу визначаються площею оброблюваної поверхні за одиницю часу. Механічна стійкість абразивних матеріалів проявляється у здатності витримувати механічні навантаження, не піддаючись руйнуванню. Вона визначається рівнем міцності при стисканні, що визначається дослідним шляхом, за допомогою роздавлювання зерна абразиву з фіксацією параметрів навантаження під час початку його руйнування.

Можливість абразивного порошку не змінювати своїх основних властивостей при контакті з водою, а також з розчинами лугів, кислот та різних розчинників, характеризують її хімічну стійкість. Критерії вибору абразивних матеріалів:

- Товщина покриття або припуску на обробку. Чим більша величина, тим більш крупна повинна бути фракція абразиву.

- Твердість матеріалу. Чим більша твердість матеріалу, який потрібно очистити, тим міцніше повинен бути абразив.

У випадку коли необхідно отримати гладку поверхню навіть без незначних дефектів, обирають абразив з найменшою фракцією. Крупна фракція застосовується для нанесення сітки подряпин для підсилення адгезії з захисними покриттями. Швидкість роботи піскоструменевого обладнання . на високій швидкості частинки м'якого абразиву будуть швидко руйнуватися і ефективність роботи залишиться низькою. Також при великій швидкості менш

результативним буде використання частинок круглої форми, в порівнянні з частинками з гострими краями.

Важливою умовою при виборі якісного абразиву є можливість його повторного використання і мінімальна кількість пилу в фракції.

По техніці безпеки забороняється застосовувати пісок без засобів індивідуального захисту та спеціальних пилеуловлювачів. Оскільки при ударах об поверхню абразив все одно розбивається в пилевидну фракцію. Для забезпечення належної якості варто добре просушити та просіяти абразив. Перед завантаженням в піскоструменеве обладнання він повинен бути повністю сухим, інакше обладнання можна зіпсувати. Допустимий рівень вологості визначається шляхом стиснення матеріалу рукою – він повинен вільно сипатися скрізь пальці, або застосовувати спеціальні пристрої для замірювання вологості в залежності не тільки від фракції а й від типу абразивного матеріалу та фізико-хімічних властивостей.

2.7 Ієрархія абразивних матеріалів за шкалою Мооса

Спеціальний метод визначення міцності абразивних матеріалів був запропонований німецьким мінералогом Фрідріхом Моосом у 1811 році. Цей метод легко застосовується на практиці в багатьох лабораторіях. Згідно його методики міцність матеріалу – це здатність поверхні абразивного матеріалу чинити опір при спробі завдання механічних рисок та подряпин іншим матеріалом. Методика запропонована Моосом полягає у формулюванні умовної шкали еталонних мінералів для оцінки міцності матеріалів шляхом дряпання, в класичному вигляді яка містить десять речовин природнього походження, що розміщені за зростанням міцності, наведена в таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 - Класична шкала міцності природніх речовин за Моосом [154].

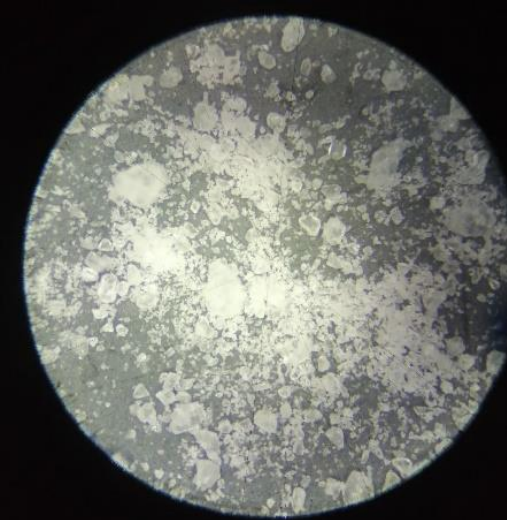

Мінерал-еталон	Міцність	Мінерал-еталон	Міцність
Тальк	1	Ортоклаз	6
Гіпс	2	Кварц	7
Кальцит	3	Топаз	8
Флюорит	4	Корунд	9
Апатит	5	Алмаз	10

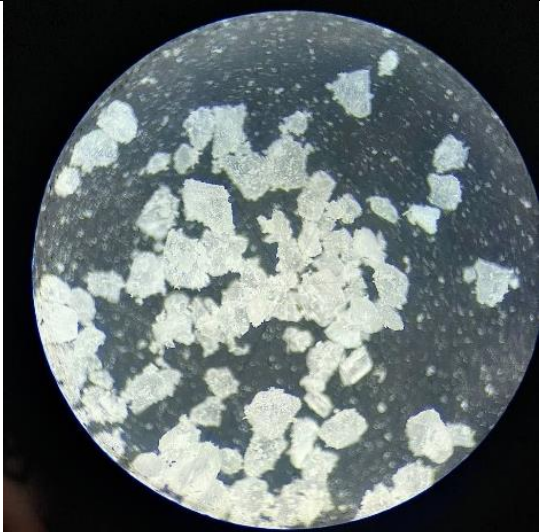
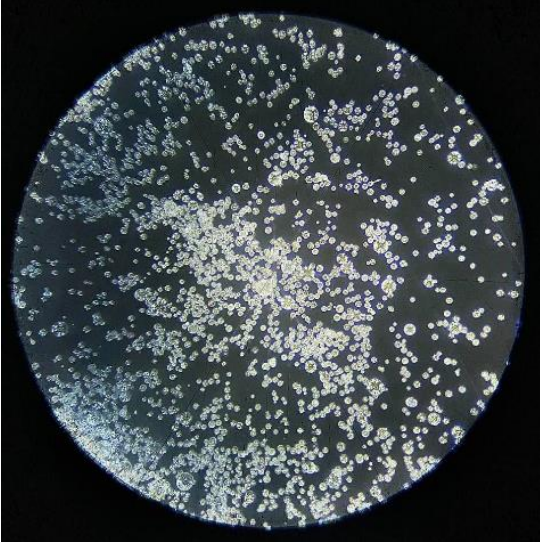
Мінералогічна шкала, згідно методики Мооса, складається з 10-ти мінералів природнього походження, кожен з яких має певний коефіцієнт міцності. Визначення міцності інших матеріалів, не наведених даною шкалою, здійснюється завдяки даному набору матеріалів-еталонів шляхом їх натиску на поверхню досліджуваного матеріалу. У випадку коли, матеріал-еталона залишає подряпину на поверхні речовини, що досліджується, то її відносна міцність нижче, ніж аналогічний показник матеріалу-еталона. Варто зазначити, що розподіл міцності за шкалою є нелінійним. Тому дана шкала дозволяє лише розмістити матеріали в порядку зростання міцності.

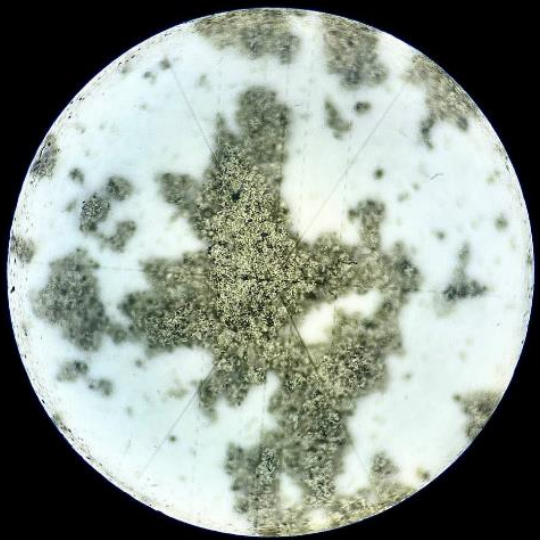
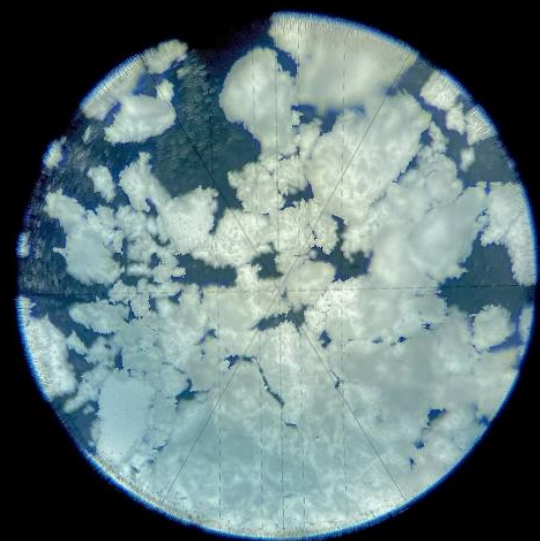
Простота і зручність даної методики полягає в тому, що при визначенні твердості досліджуваного матеріалу можна застосовувати будь-які підручні засоби, такі як ніготь (міцність за шкалою Мооса 2,5), ніж (5,5) або скло (5,5).

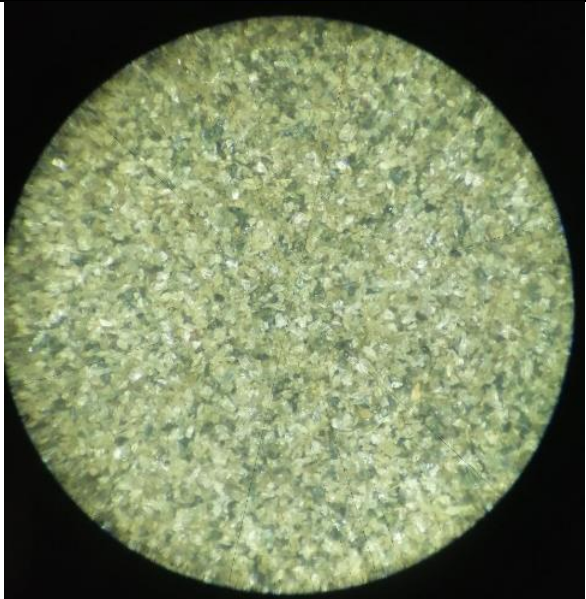
У більшості випадків, значення коефіцієнта міцності матеріалу, який подрібнюється в кульових млинах, знаходиться в інтервалі від 6 до 9 за шкалою Мооса [153]. Для даного дослідження було підібрано нами певний перелік абразивних матеріалів, що на думку автора можуть забезпечити мінімальну якість обробки, при цьому бути доступними та дешевими. Обрані матеріали були розташовані в порядку зростання твердості за моделлю Мооса та наведені в таблиці 2.8.

Таблиця 2.8 - Характеристика застосовуваних абразивних матеріалів

Найменування	Твердість по Моосу	Походження	Застосування	Фракція, мкм	Загальний вигляд (збільшено ×50 крат)
N_2CO_3	0,4-1,3	Штучне	<ul style="list-style-type: none"> - неінвазивного очищення алюмінію, сталі, дерева, скла; - реставрація виробів з каменю, реставрація кузовів автомобілів. 	100-300	
Горіхова крихта	2,5-4,0	Природне	<ul style="list-style-type: none"> - видалення корозії та нагару з автомобільних деталей та електрообладнання; - видалення задир і очищення без міни розмірів; - очищення деталей турбін; - очищення пресформ; - зняття фарби та написи на стінах. 	500	

Продовження таблиці 2.8					
Найменування	Твердість по Моосу	Походження	Застосування	Фракція, мкм	Загальний вигляд (збільшено ×50 крат)
Кальцит	2,75-3,5	Природне	<ul style="list-style-type: none"> - будівництво; - хімічне виробництво; - виробництво оптичних приладів; - лакофарбове виробництво; - харчова промисловість; - сільське господарство; - косметологія; - медицина; 	130	
Скляні кульки	6-7	Штучне	<ul style="list-style-type: none"> - «м'яке» очищення поверхонь оброблюваних деталей; - фінішна обробка поверхонь з нержавіючої сталі, бронзи, міді, алюмінію та інших матеріалів; - підготовка поверхонь перед нанесенням покриттів; - очищення зварних швів від залишку шлаку; - зміцнююча обробка металу; - оздоблювальне матування різного металу, скла; - зняття корозії зі зброї та снарядів в оборонній промисловості; - очищення деталей після термохімічної обробки; 	50-150	

Продовження таблиці 2.8					
Найменування	Твердість по Моосу	Походження	Застосування	Фракція, мкм	Загальний вигляд (збільшено ×50 крат)
CaO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃ -Fe ₂ O ₃	7	Штучне	- будівельні суміші;		
Маршаліт	7	Природне	- наповнювач для бетону; - притиральні пасти та шліфувальні порошки; - очищувальні пасти та миючі засоби; - керамічна промисловість; - вогнетривкі вироби; - металургія;	50	

Продовження таблиці 2.8					
Найменування	Твердість по Моосу	Походження	Застосування	Фракція, мкм	Загальний вигляд (збільшено ×50 крат)
Електрокорунд 14А	8-9	Штучне	<ul style="list-style-type: none"> - виготовлення абразивних інструментів (кругів, стрічок та інш.); - сипучі матеріали використовуються як наповнювач в піскоструменевих апаратах; - вогнетривких виробів; - виготовлення абразивних паст; - галтувальні тіла; - зміцнюючий компонент для бетону; 	60	

2.8 Опис та будова обладнання абразивно-струменевої обробки

Основним інструментом даного експериментального дослідження слугувало піскоструменеве обладнання, в комплектність якого, входить компресор для накопичення стисненого повітря (рис.2.14), технічні характеристики якого наведені в таблиці 2.9 та камери струменевого очищення (КСО) з абразивно-струменевим апаратом (рис.2.15).



Рис.2.14 – Компресор Aircast СБ4/Ф-500.LT100-11,0.

Таблиця 2.9 - Технічні характеристики компресора Aircast СБ4/Ф-500.LT100-11,0.

Тип компресора	Повітряний, поршньовий з пасовою передачею
Потужність двигуна	11кВт
Напруга	380 В
Об'єм ресивера	500 л.
Розташування ресивера	Горизонтальне
Циліндри/ступені	4/2
Тиск	10 бар
Продуктивність	Вхід 1700 л/хв
	Вихід 1340 л/хв
Формфактор	Стационарний
Габарити	2000×610×1250
Маса	365 кг.



Рис.2.15 – Камера струменевого очищення: 1-камера, 2-вікно, 3-шкаф керування, 4-шибер, 5-освітлення, 6-кришка завантажування, 7-8-рукав захисний, 9-апарат абразивно-струменевий, 10-сепаратор циклонний, 11-вентилятор витяжний 3кВт, 12-клапан електромагнітний, 13-рукав Ø19/33, 14-кран шибєрний, 15-вентиль.

2.9 Вибір програмного забезпечення для моделювання процесу обробки в середовищі ANSYS

Раціональним підходом при пошуку конструктивних рішень є моделювання теплофізичних процесів, що протікають в закритих лопатках турбін ТНА при проходженні абразивного струменя, що дозволить кількісно оцінити взаємодію абразивних частинок з робочими поверхнями лопаток. Розвиток методу кінцевих елементів обумовлений взаємозв'язком трьох факторів: наявність високопродуктивної обчислювальної техніки, можливістю розробки математичних моделей дослідження різноманітних явищ, що близькі за сутністю до реальних процесів з максимально можливою точністю [154]. Починаючи з 60-х років до сьогодні розроблена значна кількість програмного забезпечення призначених для наближеного вирішення різних завдань в області механіки деформованого тіла, гідродинаміки, акустики, електротехніки та інш. Найбільше поширення з них набули ABAQUS, ADINA, ANSYS, MARC, MSC/NASTRAN та інш. У кожній програмі є свої сильні та слабкі сторони при розрахунку конкретної конструкції.

До критеріїв, що допомагають зробити вибір, необхідно віднести такі фактори:

- програма широко використовується;
- у програмі використовуються новітні наукові досягнення;
- програма комерційно цілком доступна;
- докладна і зрозуміла документація.

З поміж усього різноманіття програмних продуктів вибір зупинився на програмному комплексі ANSYS CFX, виходячи з раціональної та практичної точки зору є «золотою серединою» з існуючих та доступних, на сьогоднішній день, інструментів чисельного моделювання процесів гідро- та газодинаміки їх [155-156].

Висновки за розділом 2

В другому розділі дисертаційної роботи ключовим напрямком якого був вибір матеріалів та методики дослідження, було вирішено ряд завдань, а саме визначено методики:

- підготовки зразків на прикладі металографічного дослідження;
- підготовка зразків та їх відповідність фізико-механічним властивостям готового виробу, що включають проведення термообробки з послідуєючим контролем твердості;
- розроблена методика дослідження якості та шорсткості поверхні лопаток під конкретний тип конструкції робочого колеса турбіни, а саме закритий (з бандажем);
- виконано початкове вимірювання шорсткості поверхні закритих лопаток та отримані конкретні числові значення;
- обрано метод контролю якості та шорсткості поверхні з необхідним для цього обладнанням, а також обладнання що застосовуватиметься для підготовки та обробки зразків;
- на основі рекомендацій було обрано конкретний перелік абразивних матеріалів упорядкований згідно класифікації Мооса та наведені в таблиці 2;
- з поміж наявних та доступних продуктів програмного забезпечення призначених для аналізу та моделювання було обрано ANSYS CFX.

3 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СУХОЇ АБРАЗИВНО-СТРУМЕНЕВОЇ ОБРОБКИ ПОВЕРХОНЬ ЛОПАТОК ЗАКРИТОГО ТИПУ МЕТОДОМ КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ В ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ ANSYS CFX

Формулювання завдання. Розрахункова газодинаміка займається вивченням та розробкою розрахунків актуальних напрямків, серед яких рухів в'язкої рідини (газу), вивчення протікання процесів в газах з фізико-механічними та фізико-термічними параметрами та їх змінами, дослідженням розподілу твердих елементів в двофазних середовищах. Завдання газової динаміки є вирішення систему з чотирьох незалежних рівнянь Нав'є-Стокса (3.1-3.11): нерозривності (збереження маси), кількості руху (збереження імпульсу) та енергії (збереження енергії), рівняння стану.

Система диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса мають вигляд кінцевої математичної моделі поведінки рідини (газу), що описує в деталях практично весь спектр течій, а саме:

Рівняння нерозривності, що відповідає закону збереження маси:

$$-\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z)}{\partial z} = 0 \quad (3.1)$$

Де V_x, V_y, V_z – компоненти вектора швидкості в напрямках x, y і z відповідно; - 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:

$$-\frac{\partial \rho V_x}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y V_x)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z V_x)}{\partial z} = \rho g_x - \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \mu_\varepsilon \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu_\varepsilon \frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \mu_\varepsilon \frac{\partial V_x}{\partial z} + T_x \quad (3.2)$$

$$-\frac{\partial \rho V_y}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x V_y)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z V_y)}{\partial z} = \rho g_y - \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \mu_\varepsilon \frac{\partial V_y}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu_\varepsilon \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \mu_\varepsilon \frac{\partial V_y}{\partial z} + T_y, \quad (3.3)$$

$$- \frac{\partial \rho V_z}{\partial t} + \frac{\partial (\rho V_x V_z)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho V_z V_y)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho V_z V_z)}{\partial z} = \rho g_z - \frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \mu_\varepsilon \frac{\partial V_z}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu_\varepsilon \frac{\partial V_z}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \mu_\varepsilon \frac{\partial V_z}{\partial z} + T_z, (3.4)$$

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 вузьких втрат в напрямках x, y і z відповідно.

$$- T_x = \frac{\partial \rho}{\partial x} \mu + \frac{\partial (\rho V_x)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu + \frac{\partial V_y}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \mu \frac{\partial V_z}{\partial x} (3.5)$$

$$- T_y = \frac{\partial \rho}{\partial x} \mu + \frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \mu \frac{\partial V_z}{\partial y} (3.6)$$

$$- T_z = \frac{\partial}{\partial x} \mu + \frac{\partial V_x}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial V_y}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \mu \frac{\partial V_z}{\partial z} (3.7)$$

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

$$- \mu_\varepsilon = \mu - \mu_t (3.8)$$

Модель турбулентності описується завдяки усередненим рівнянням Нав'є-Стокса (RANS), що представляють собою середні величини потоку, при цьому моделюють ефекти турбулентності без необхідності врахування турбулентних флуктуацій. Модель, основа яких базується на рівняннях RANS, дозволяє знизити обсяг обчислень в порівнянні з прямим чисельним моделюванням, що традиційно використовується для інженерних розрахунків.

Вирішення завдання. Для проведення розрахунків використовується модель турбулентності k_ε – загальна модель для середніх характеристик потоку при турбулентному режимі [157]. Орієнтація даної моделі вказує на механізми, які впливають на турбулентну кінетичну енергію, основним припущенням якої є те, співвідношення між напругою Рейнольдса і середня швидкість деформації однакова в усіх напрямках [158], модель якої наведена у вигляді комплексу рівнянь що застосовуються до значної кількості турбулентних складових [159].

Для турбулентної кінетичної енергії k [159]:

$$- \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + 2\mu_t E_{i,j} E_{i,j} - \rho \varepsilon \quad (3.9)$$

- Для розсіювання ε :

$$- \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.10)$$

Де u_i – являє собою компонент швидкості у відповідному напрямку;

- E_{ij} – компонент швидкості деформації;

- μ_t – представляє турбулентні в'язкості;

$$- \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.11)$$

- Рівняння також складаються з деяких регульованих констант σ_k , σ_ε , $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$.

$$- C_\mu = 0.09\sigma_k = 1.00\sigma_k = 1.00\sigma_\varepsilon = 1.30\sigma_\varepsilon = 1.30C_{1\varepsilon} = 1.44C_{1\varepsilon} = 1.44C_{2\varepsilon} = 1.92C_{2\varepsilon} = 1.92$$

В процесі виконання оцінювального розрахунку технологічних параметрів обробки проведено моделювання потоку суміші повітря з частками абразивного матеріалу через канал між лопатками за допомогою сопла спеціальної конструкції. При моделюванні використовували програмний комплекс ANSYS CFX, як один з найбільш потужних на сьогоднішній день, інструмент чисельного моделювання газодинамічних процесів [160-161]. Сутність розрахунку полягала в аналізі полів розподілу швидкостей основного газу при температурах реального процесу, величину ерозії оброблюваної поверхні частками абразивного матеріалу та її швидкість а також зміну швидкості частинок при різних кутах обробки [162-163].

Проведення дослідження. Об'єктом дослідження слугував сегмент робочого колеса турбіни закритого типу спільно з соплом, через яке здійснювалась подача абразивного струменю в середину каналу. Напрямок подачі струменя співпадає з віссю міжлопаткового каналу сопла (рис.3.1).

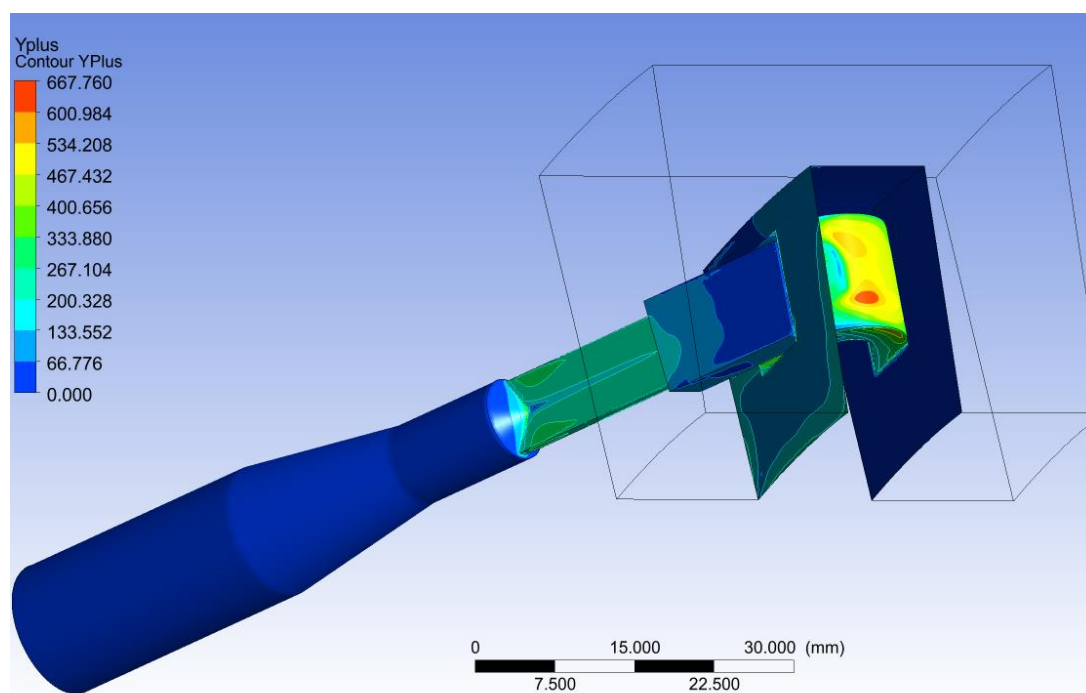


Рис.3.1 – Моделювання процесу обробки.

Моделювання здійснювалося з урахуванням реальних умов обробки за такими параметрами:

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

Розрахункова модель та граничні умови. Розрахункова модель містить 3D-моделі збірки сегменту лопаток та сопла (рис.3.1) з накладанням граничних умов. Розрахункова область дослідження поділена на кінцеві обсяги зі згущенням сітки з призматичним пристінковим шаром, з середньою загальною кількістю елементів від 2 млн.

Завершальним етапом моделювання програми є підготовка звітності результати, в конкретно визначеній формі, що відповідають конкретним вхідним даним.

На наведених нижче рисунках показані кольорові спектри розподілу швидкості абразивного струменя в різних частинах міжлопаткових каналів. Шкала змінюється від синього (мінімум) до червоного (максимум), до того ж чисельне моделювання дозволяє вирахувати числові швидкості та ерозії на різних частинах зони обробки. Поперечний зріз картини швидкості потоку по цій довжині робочого простору камери показаний на рис.3.2, межі зміни швидкості від 0 до 610 м/с.

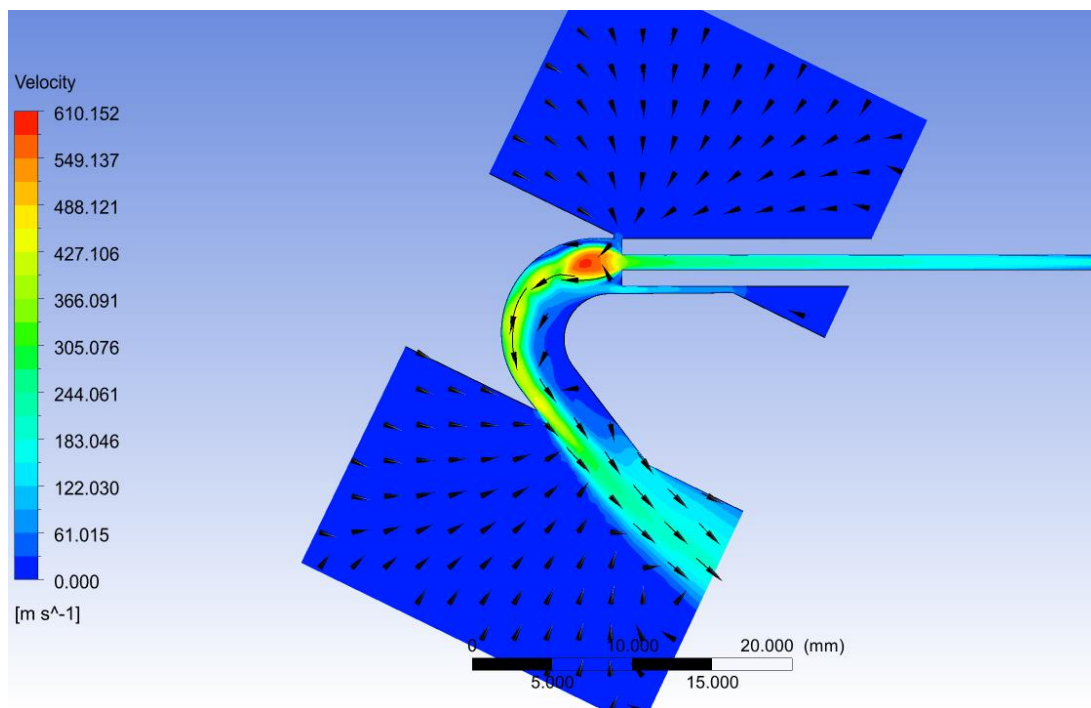


Рис.3.2 – Картина швидкості абразивних часток.

В зоні входу струменя, між соплом та кромкою лопатки, виявлена незначна ежекція, що частково впливає на швидкість абразивних частинок, однак враховуючи прозір між соплом і кромкою, а також швидкості потоку, даний фактор не спричиняє суттєвого впливу на обробку. Напрямок лінії течій (рис.3.3) абразивних часток, в потокові повітря, вказують на взаємодію з конкретними робочими поверхнями каналу лопаток, що є підтвердженням правильності вибору геометричних та технологічних параметрів сопла.

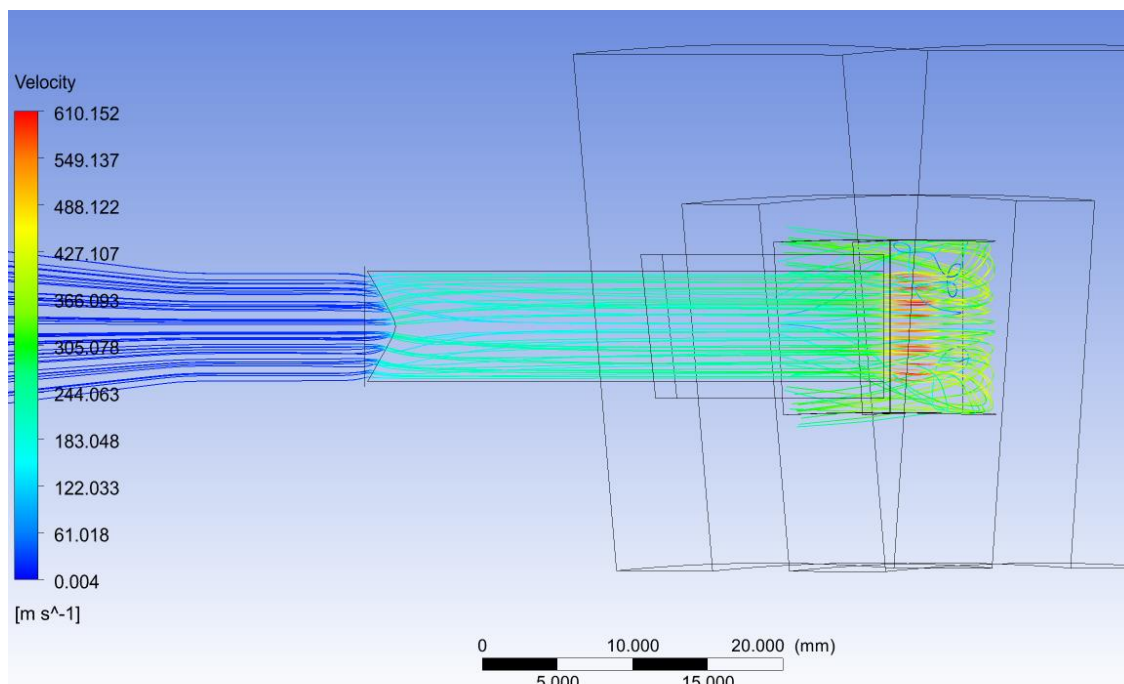


Рис.3.3 – Лінії току абразивних частинок.

Крім вище перелічених параметрів чисельне моделювання визначити числові значення швидкості (рис.3.4 та 3.5) абразивних частинок та їхній ерозійний вплив на поверхню, за визначених граничних умов та параметрів.

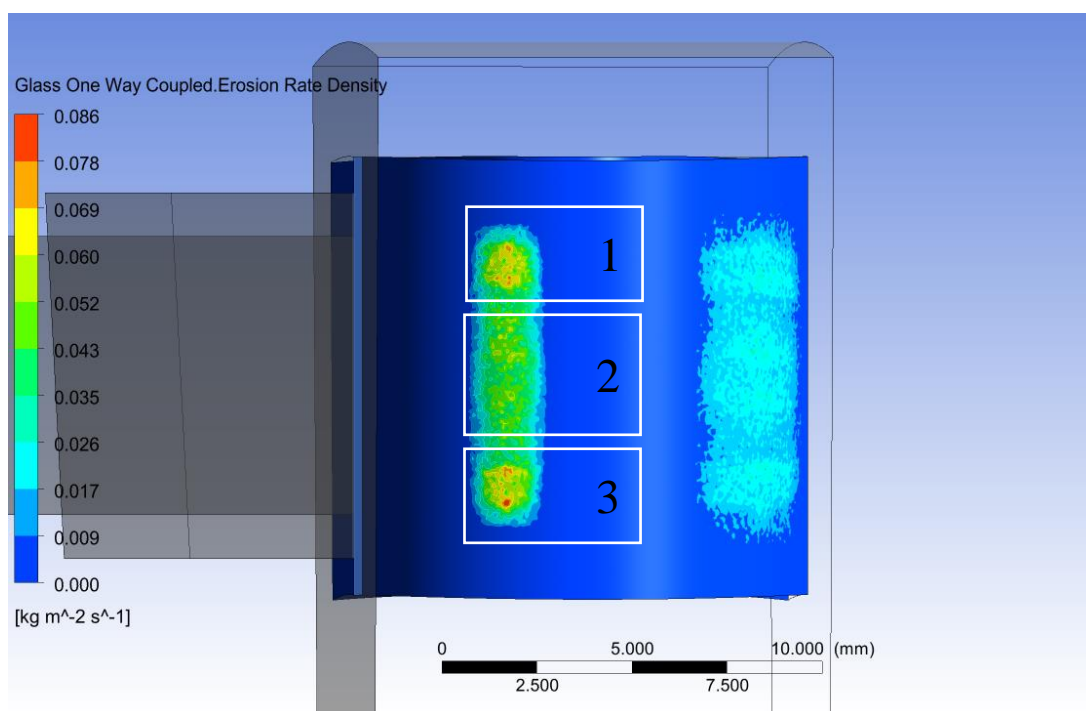


Рис.3.4 – Зони різної інтенсивності ерозії, $\text{кг}/\text{м}^2/\text{с}$.

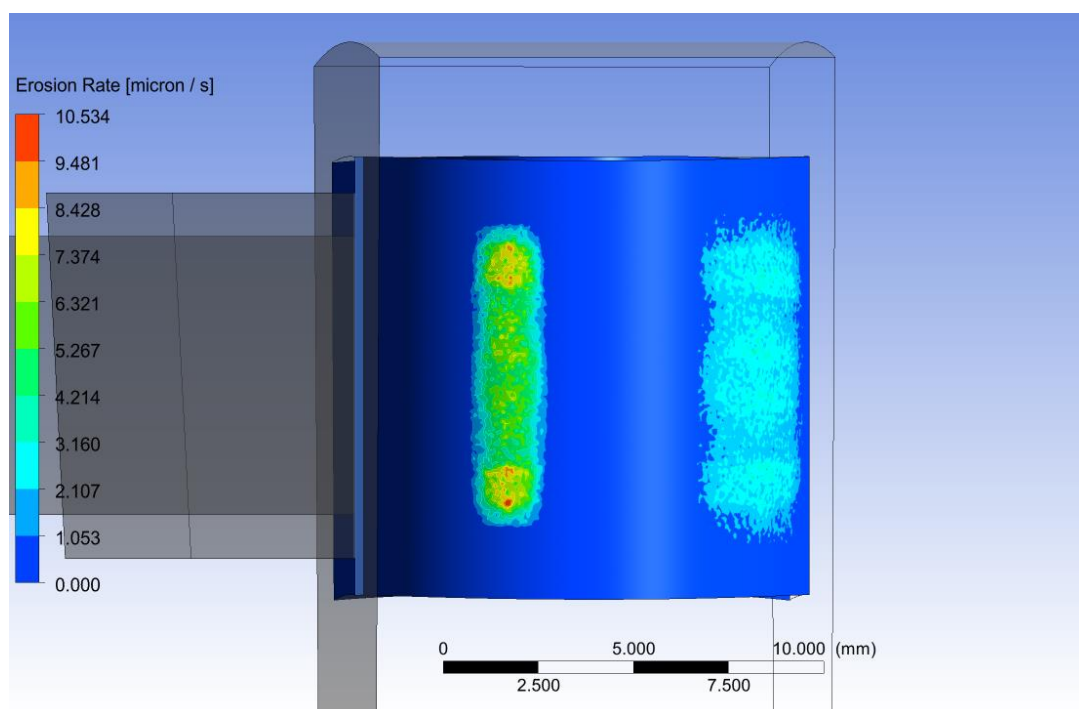
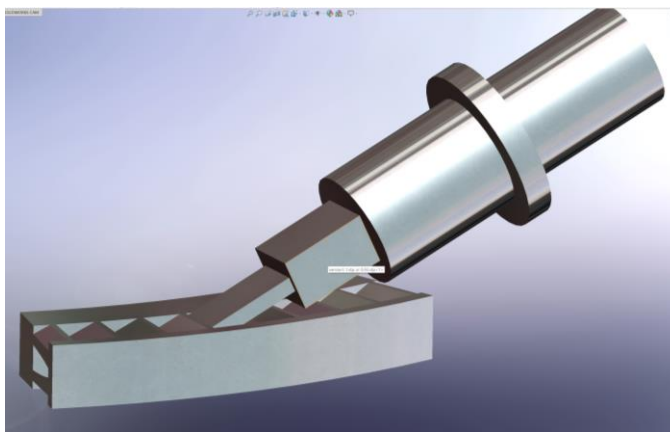


Рис.3.5 – Швидкість ерозії, мкм/с.

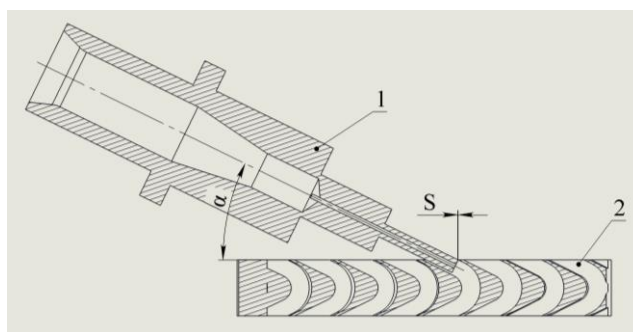
Як видно з (рис.3.4) форма зони взаємодії абразивних частинок максимально повторює форму поперечного перерізу каналу сопла та близька до числового значення його площі. Кольоровий спектр інтенсивності ерозії показав її нерівномірність на протяжності всієї зони обробки, максимальні значення інтенсивності якої по краях, як показано зона 1 та 3, а відносно рівномірна в середині – зона 2. Нерівномірність ерозії спричиняє нерівномірну шорсткість та зміну форми поверхні, а також ускладнює контроль процесу обробки. Отримані дані, дозволяють зробити припущення, що нерівномірність ерозії виникає з декількох причин: неоднорідна фракція абразивного матеріалу та особливість форми сопла, що спричиняє зростання інтенсивності ерозії по краях зони обробки, або неефективне просторове положення сопла відносно лопаткового каналу. З причин відсутності конкретної відповіді виникнення даної проблеми, було виконано повторний аналіз отриманих даних, що дозволив та знайти шляхи вирішення.

3.1 Дослідження явища нерівномірної ерозії

Для глибокого аналізу явища «нерівномірності ерозії» було прийнято рішення збільшити кількість розрахункових випадків. В кожному розрахунковому випадку змінюється просторове положення сопла відносно каналу лопатки, незмінними залишається тільки геометричні параметри сопла та відповідно каналу лопаток. Враховуючи геометричні параметри каналу (рис.3.6) сопло можливо розташувати відносно каналу лопаток тільки під кутами α від $26^\circ \dots 40^\circ$ за зазором між кромкою лопатки та соплом S від 0 до $6 \pm 0,5$ мм.



а



б

Рис.3.6 – Рендерінг – а; б – розташування сопла в каналі 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:

Блок 1

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 $S=0$;

Блок 2

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 $S=2$;

Блок 3

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 $S=4$;

Блок 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 блок відрізняється величиною зазору між кромкою лопатки та соплом, даний розподіл повинен показати зміну фізичних та технологічних параметрів залежно від кута α . Картина інтенсивності ерозії блоку 1 наведена на рис.3.7-3.10.

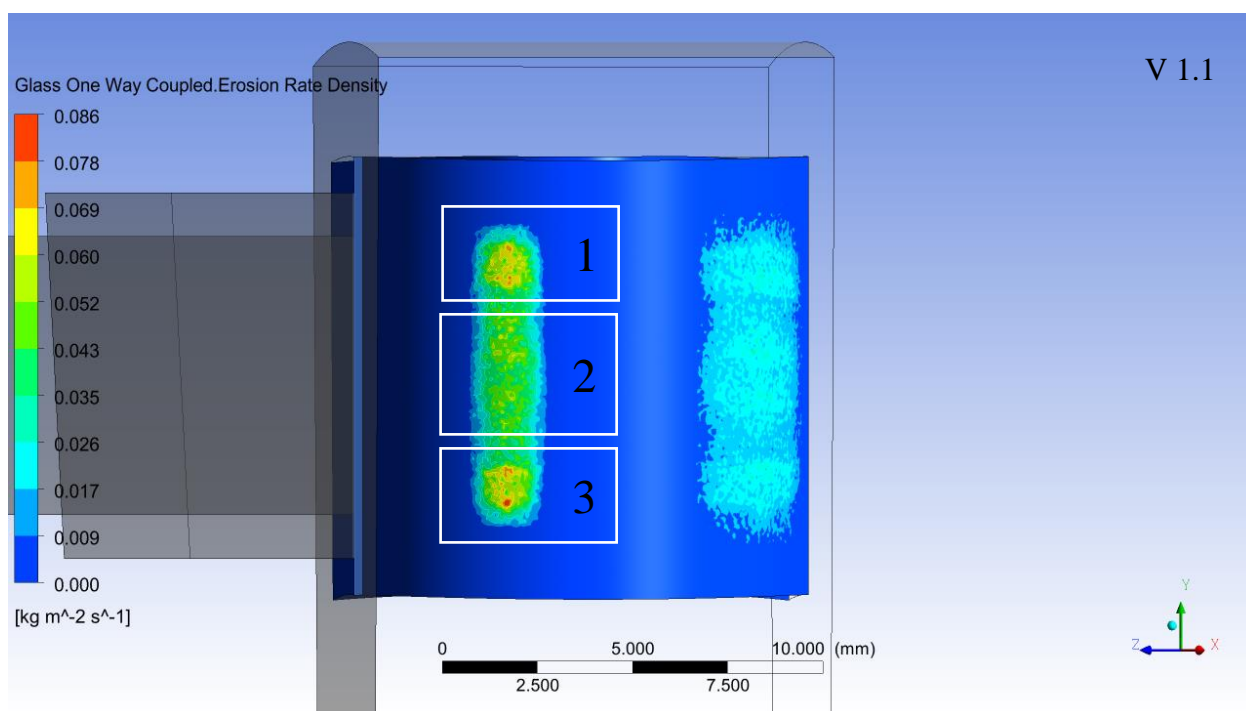


Рис.3.7 – Інтенсивність ерозії, варіант 1.1.

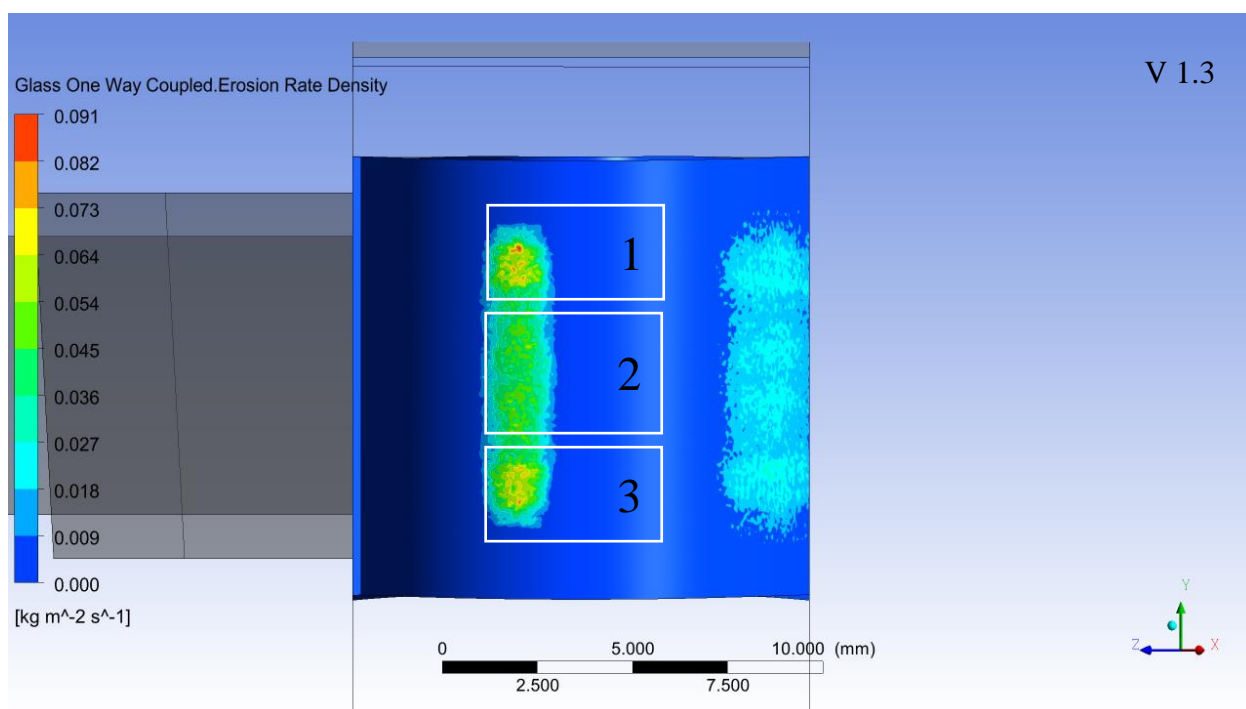


Рис.3.8 – Інтенсивність ерозії, варіант 1.3.

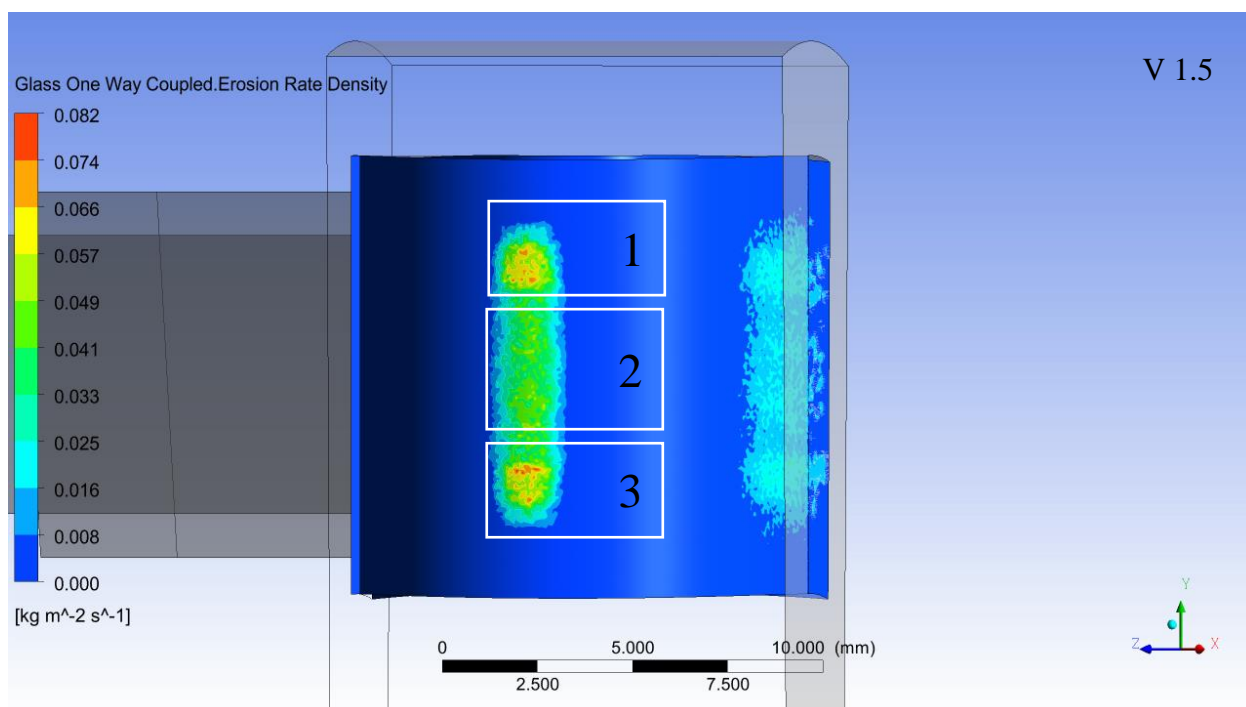


Рис.3.9 – Інтенсивність ерозії, варіант 1.5.

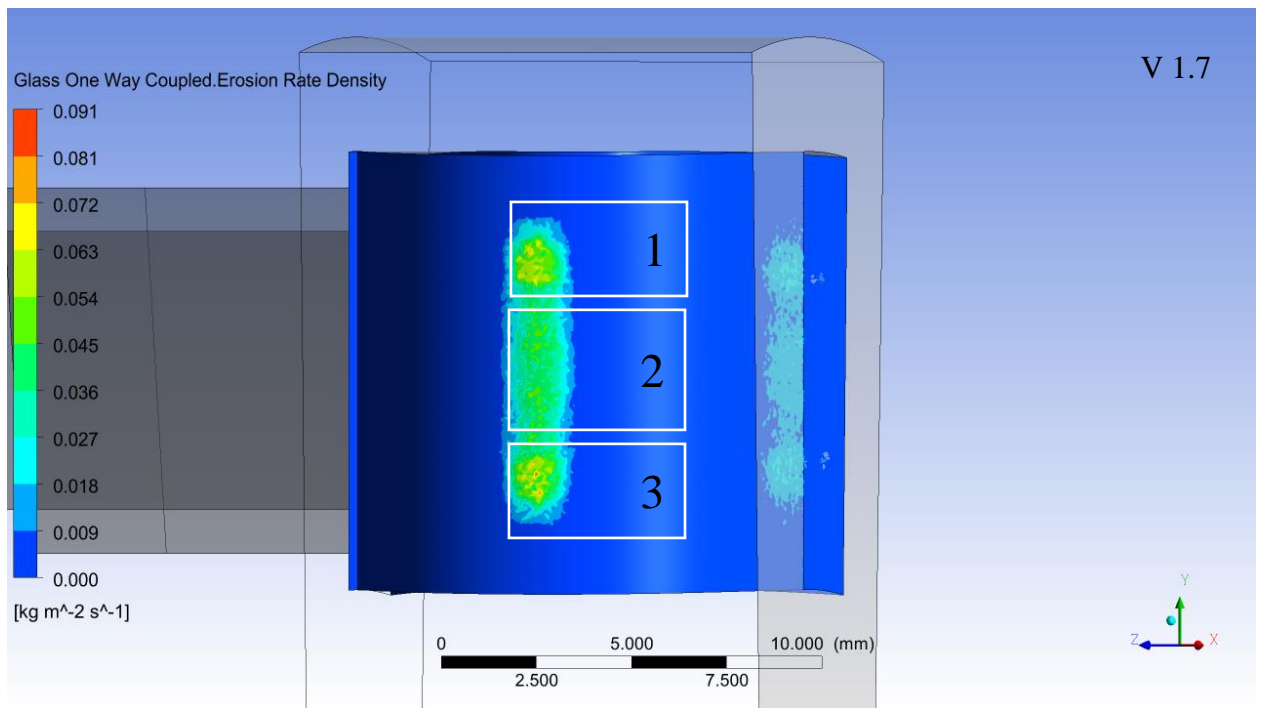


Рис.3.10 – Інтенсивність ерозії, варіант 1.7.

Візуально аналізуючи варіанти 1.1-1.7 можна зробити попередній висновок, що не зона 2 (рис. 3.7-3.10) не зазнає кардинальних змін при зміні кута α , чого не можна сказати про зони 1 та 3. Виходячи з цього виникає завдання виявлення причин нерівномірного розподілу інтенсивності.

Для глибокої оцінки нерівномірності ерозії до аналізу було задіяно додатковий об'єм даних.

3.2 Аналіз швидкостей ерозії та величин їх ділянок вздовж горизонтальної утворюючої лінії

Програмний комплекс ANSYS R18 по закінченню дослідження та моделювання формує спеціальний файл звітності, що включає в себе графіки інтенсивності ерозії по декількох площинах, швидкість ерозії, напруження на стінках внаслідок взаємодії абразивних частинок з різною масою, та інш. Для поглибленого вивчення аналізувалися графіки швидкості ерозії вздовж

горизонтальної утворюючої лінії (рис.3.11) на прикладі розрахункового варіанту 1.1.

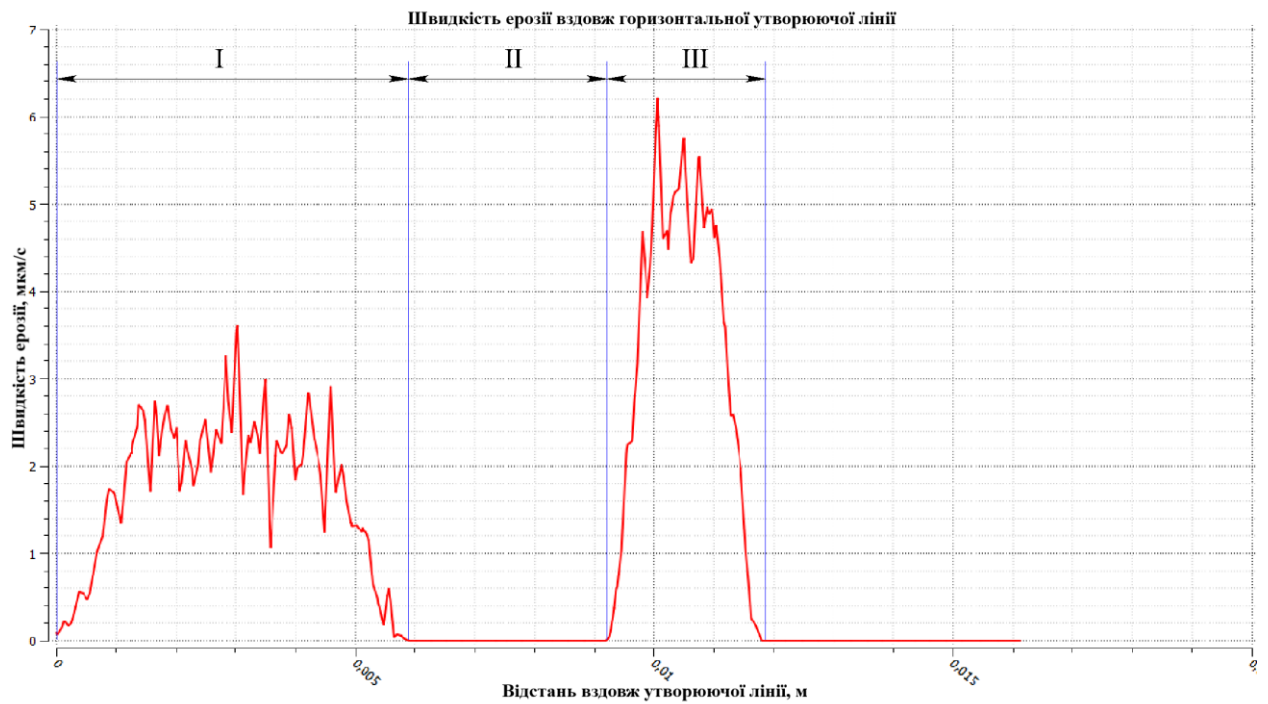


Рис.3.11 – Зміна швидкості ерозії вздовж горизонтальної утворюючої лінії, варіант 1.1 – кут α 26° відстань $S=0$ мм.

Даний графік показує не тільки швидкості ерозії але і зони контакту абразивних частинок на певній довжині ділянки, тобто дуги каналу лопатки. На рис.3.11 показаний графік нерівномірного розподілу швидкостей в зоні обробки. Як видно з графіку між кривими є рівна ділянка поверхні, так би мовити «нейтральна зона». Для зручності аналізу область дослідження графіку поділена на I, II-«нейтральну» та III-зону. Для розуміння їх розташування в жолобі лопатки ці зони показані на рис.3.12, з якого видно що зона II «нейтральна» це певна частина дуги каналу лопатки, з якою не контактує абразивний потік.

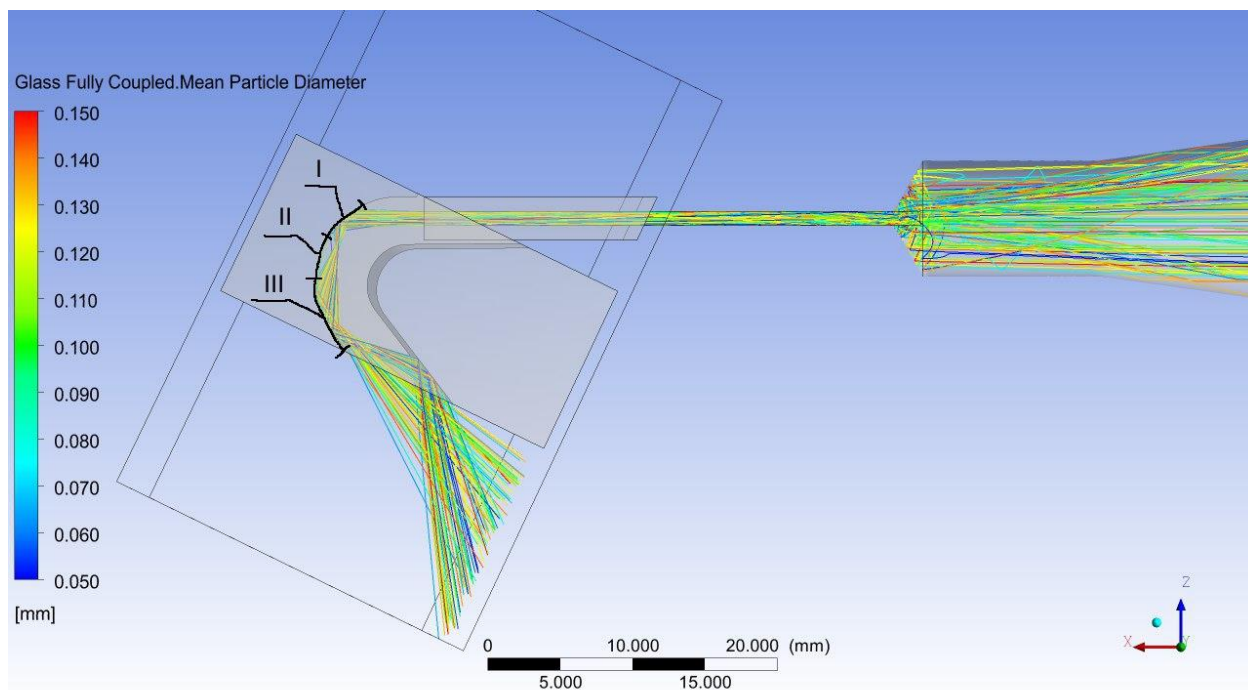


Рис.3.12 – Лінії траєкторій частинок залежно від розміру, варіант 1.1.

Наявність шкали на графіку дозволяє чисельно визначити величину тієї чи іншої зони та порівняти її у відсотковому відношенні до довжини каналу лопатки (рис.3.13) що становить 16,42 мм.

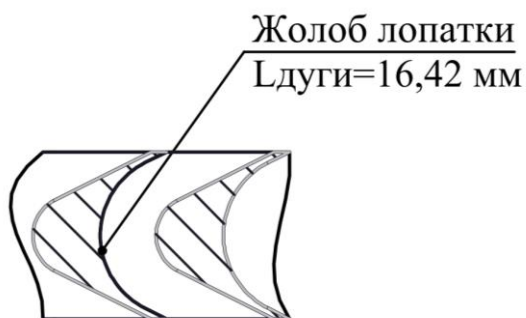


Рис.3.13 – Зріз профілю дуги жолоба лопатки.

Порівняння цих даних отриманих з інших розрахункових варіантів дозволить виявити можливу динаміку чи закономірність зміни ділянок контакту та обрати найбільш ефективний варіант обробки. Для цього було отримано графіки швидкостей ерозії по 16-м розрахунковим варіантам, що наведений нижче на рис.3.14-3.28.

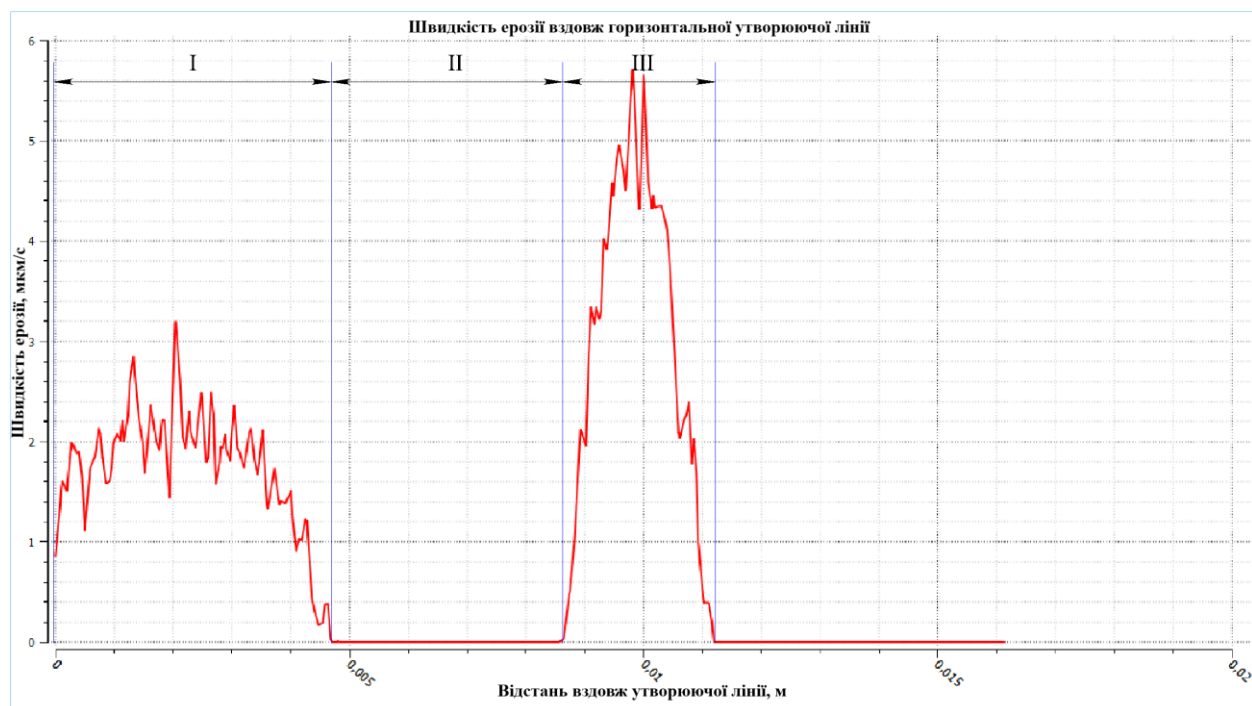


Рис.3.14 – Зміна швидкості ерозії вздовж горизонтальної утворюючої лінії,
варіант 1.3 – кут α 30° відстань $S=0$ мм.

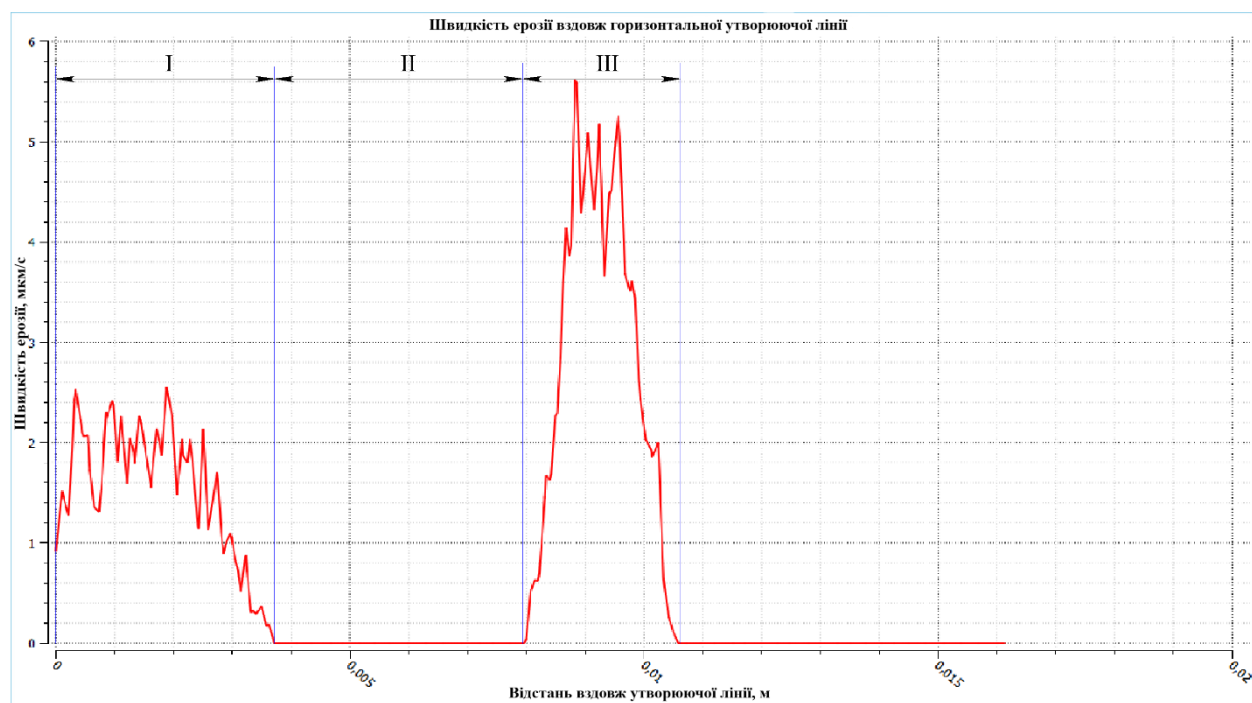


Рис.3.15 – Зміна швидкості ерозії вздовж горизонтальної утворюючої лінії,
варіант 1.5 – кут α 34° відстань $S=0$ мм.

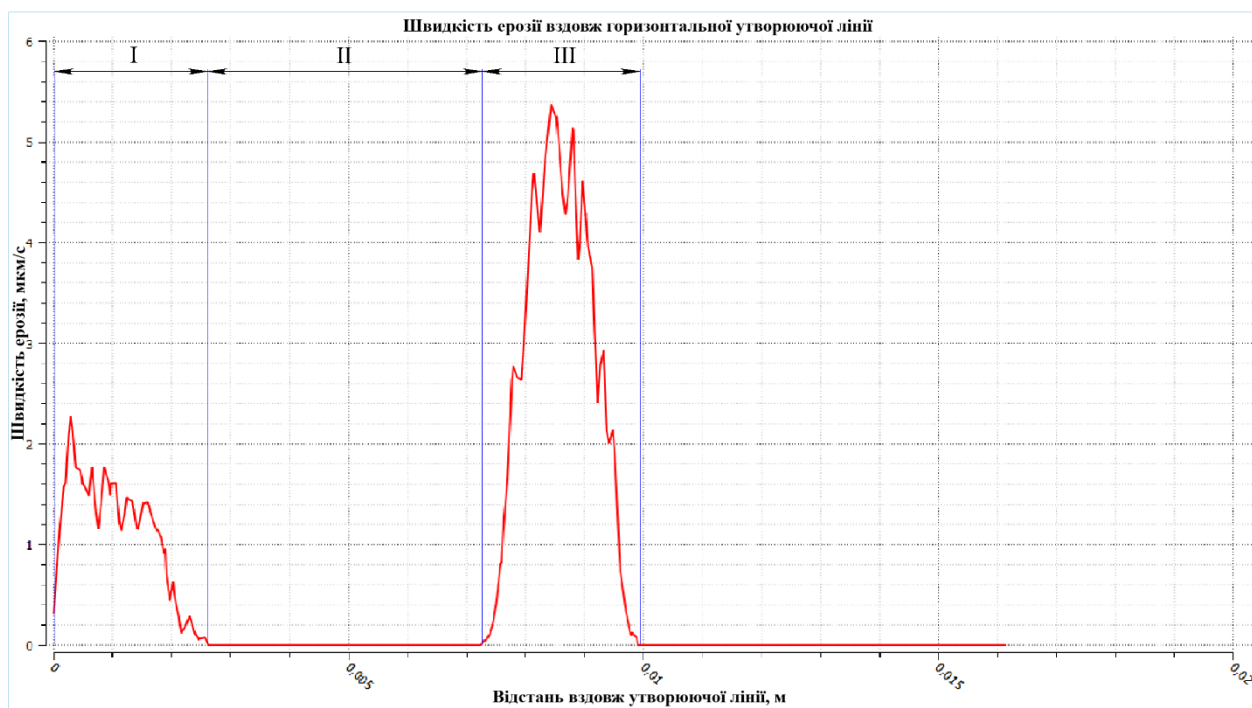


Рис.3.16 – Зміна швидкості ерозії вздовж горизонтальної утворюючої лінії,
варіант 1.7 – кут α 38° відстань $S=0$ мм.

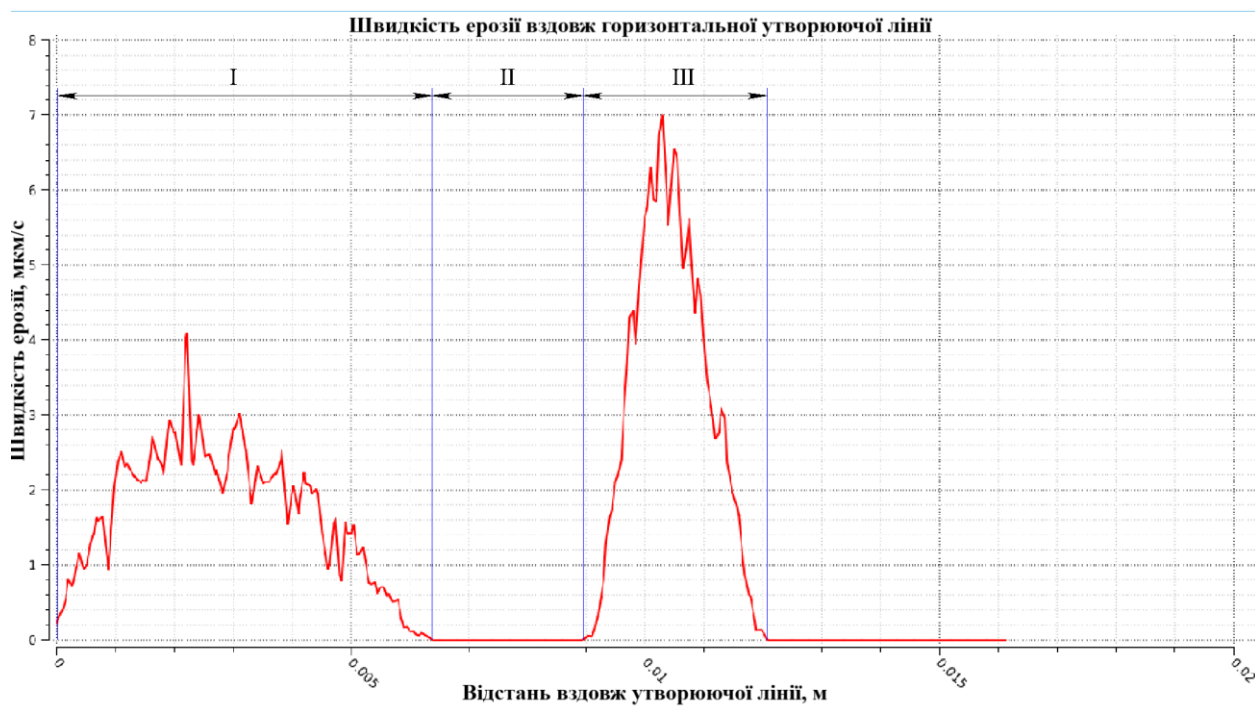


Рис.3.17 – Зміна швидкості ерозії вздовж горизонтальної утворюючої лінії,
варіант 2.1 – кут α 26° відстань $S=2$ мм.

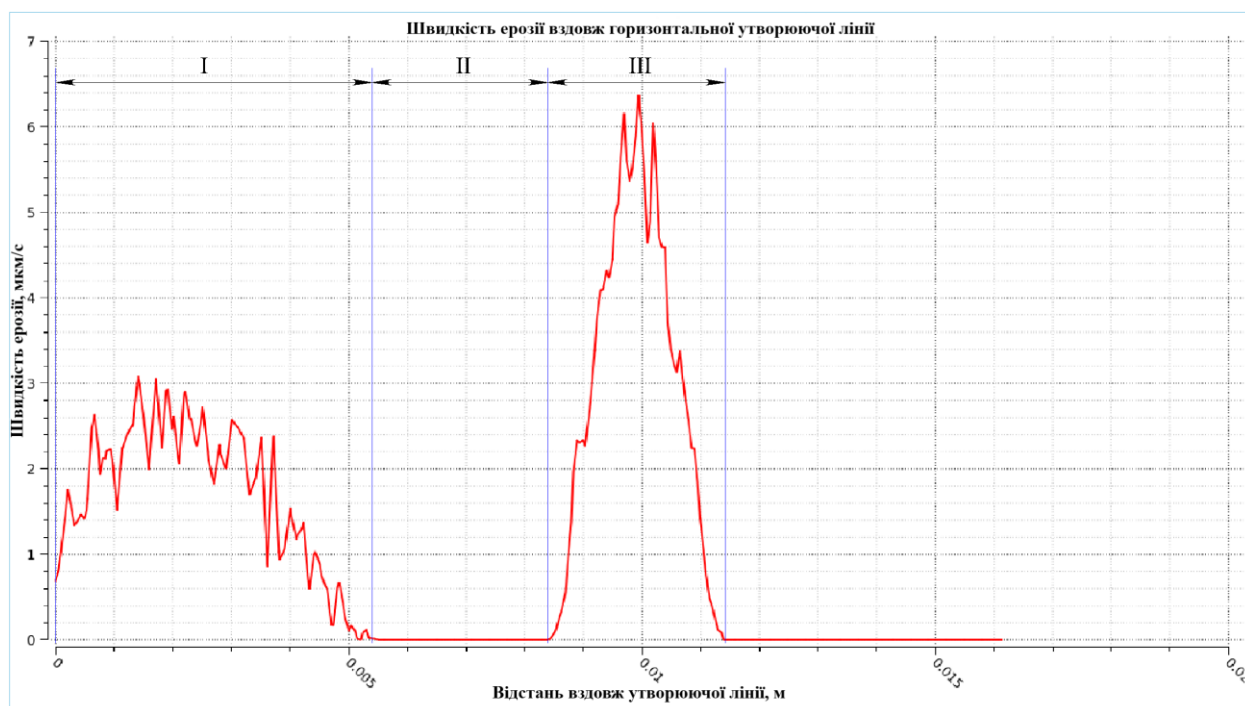


Рис.3.18 – Зміна швидкості ерозії вздовж горизонтальної утворюючої лінії,
варіант 2.3 – кут α 30° відстань $S=2$ мм.

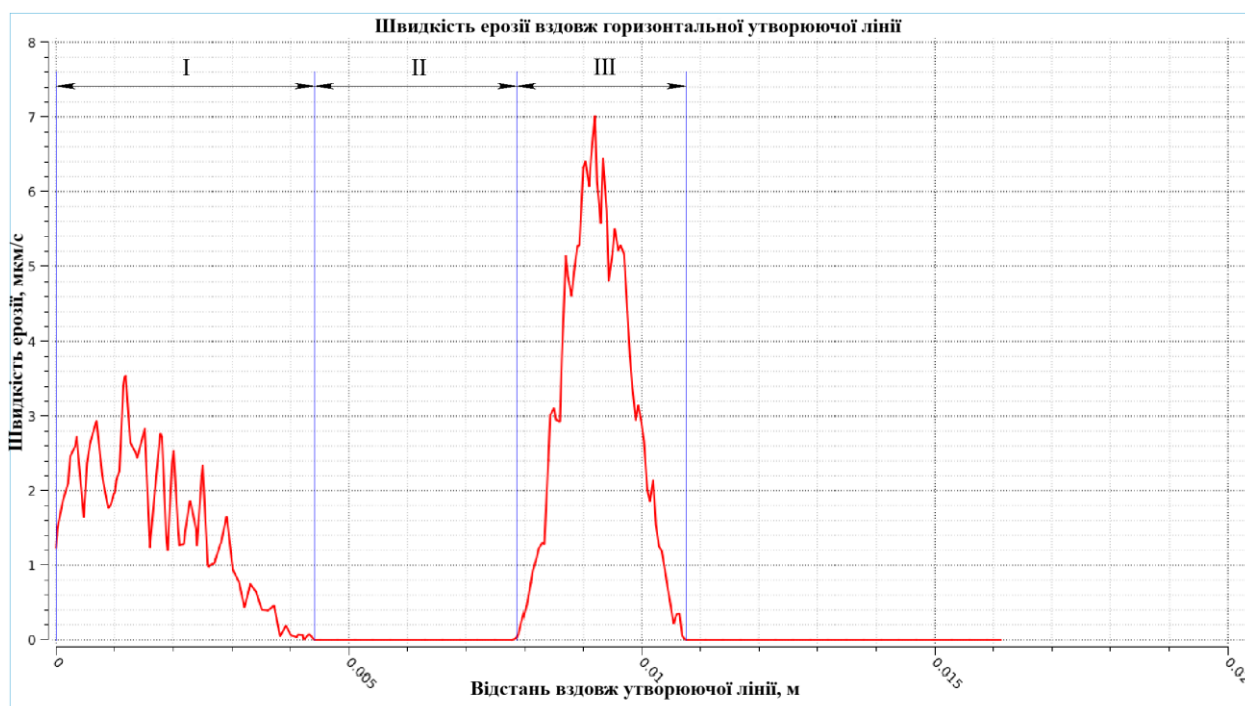


Рис.3.19 – Зміна швидкості ерозії вздовж горизонтальної утворюючої лінії,
варіант 2.5 – кут α 34° відстань $S=2$ мм.

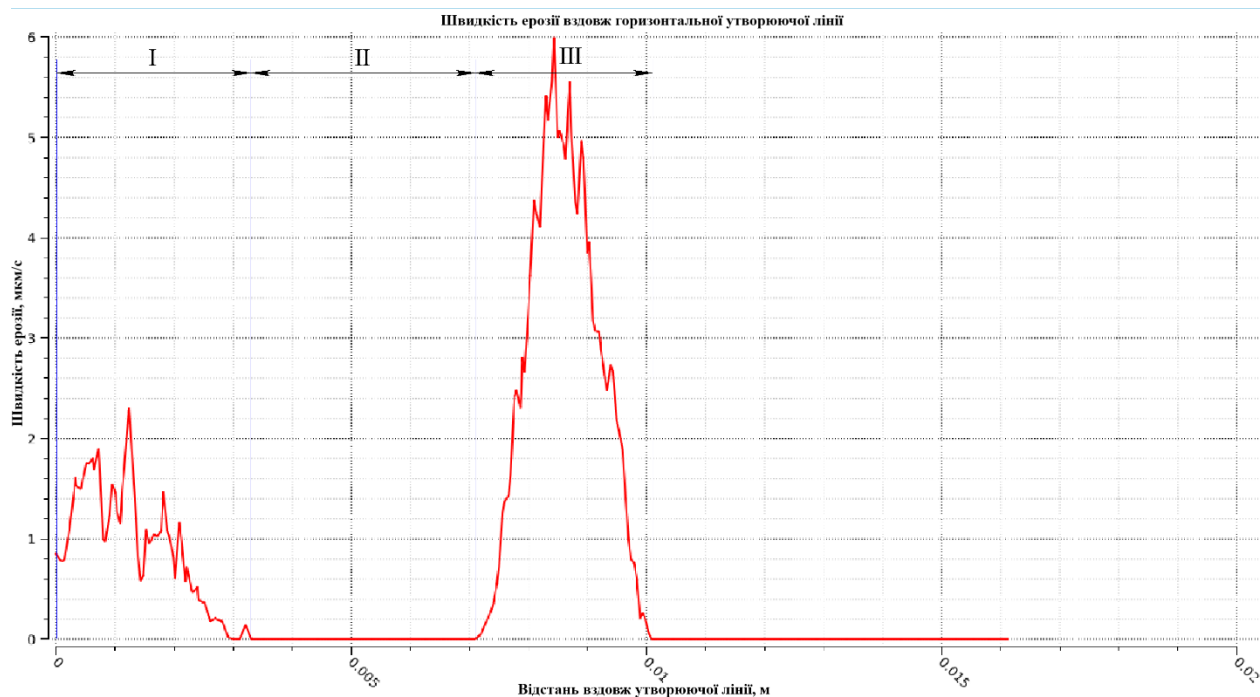


Рис.3.20 – Зміна швидкості ерозії вздовж горизонтальної утворюючої лінії, варіант 2.7 – кут α 38° відстань $S=2$ мм.



Рис.3.21 – Зміна швидкості ерозії вздовж горизонтальної утворюючої лінії, варіант 3.1 – кут α 26° відстань $S=4$ мм.

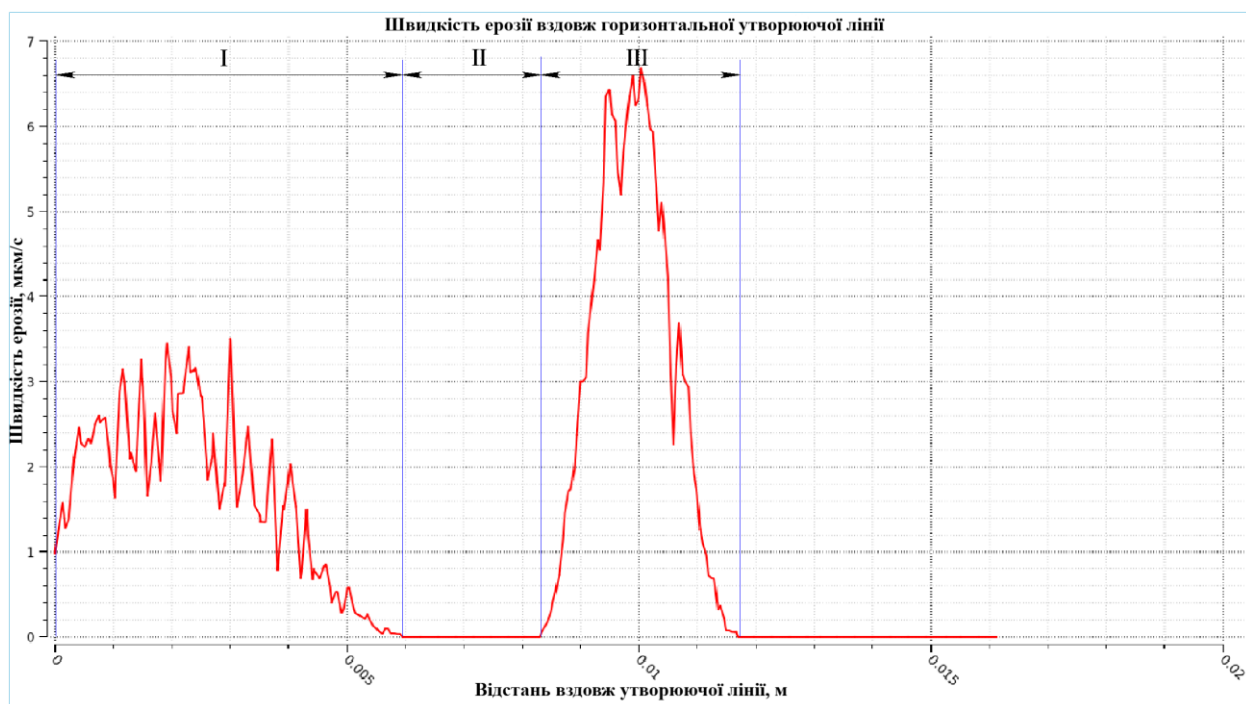


Рис.3.22 – Зміна швидкості ерозії вздовж горизонтальної утворюючої лінії,
варіант 3.3 – кут α 30° відстань $S=4$ мм.

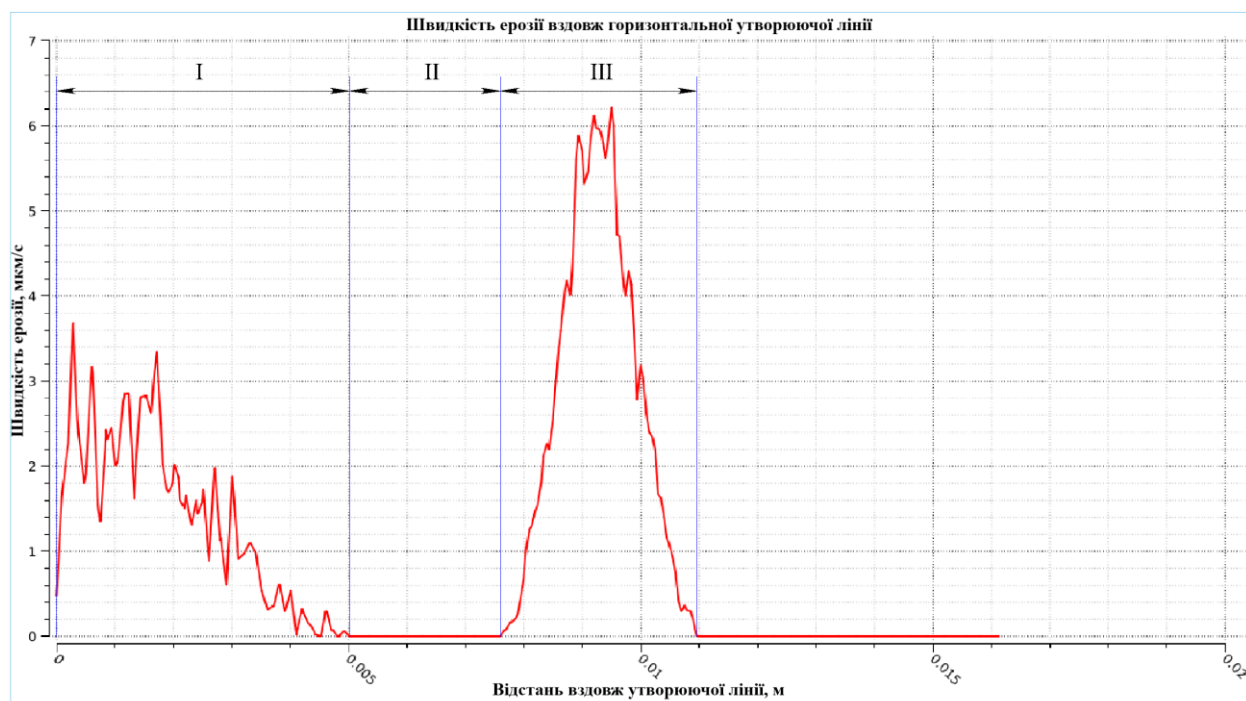


Рис.3.23 – Зміна швидкості ерозії вздовж горизонтальної утворюючої лінії,
варіант 3.5 – кут α 34° відстань $S=4$ мм.

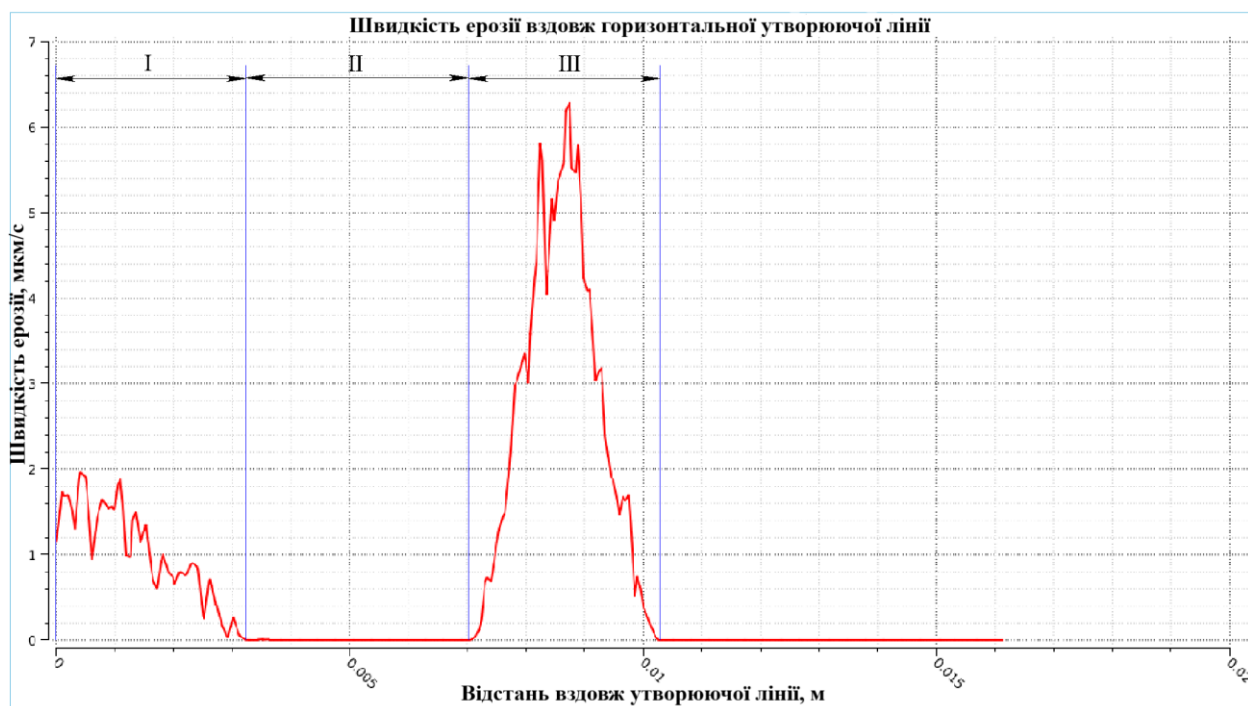


Рис.3.24 – Зміна швидкості ерозії вздовж горизонтальної утворюючої лінії,
варіант 3.7 – кут α 38° відстань $S=4$ мм.

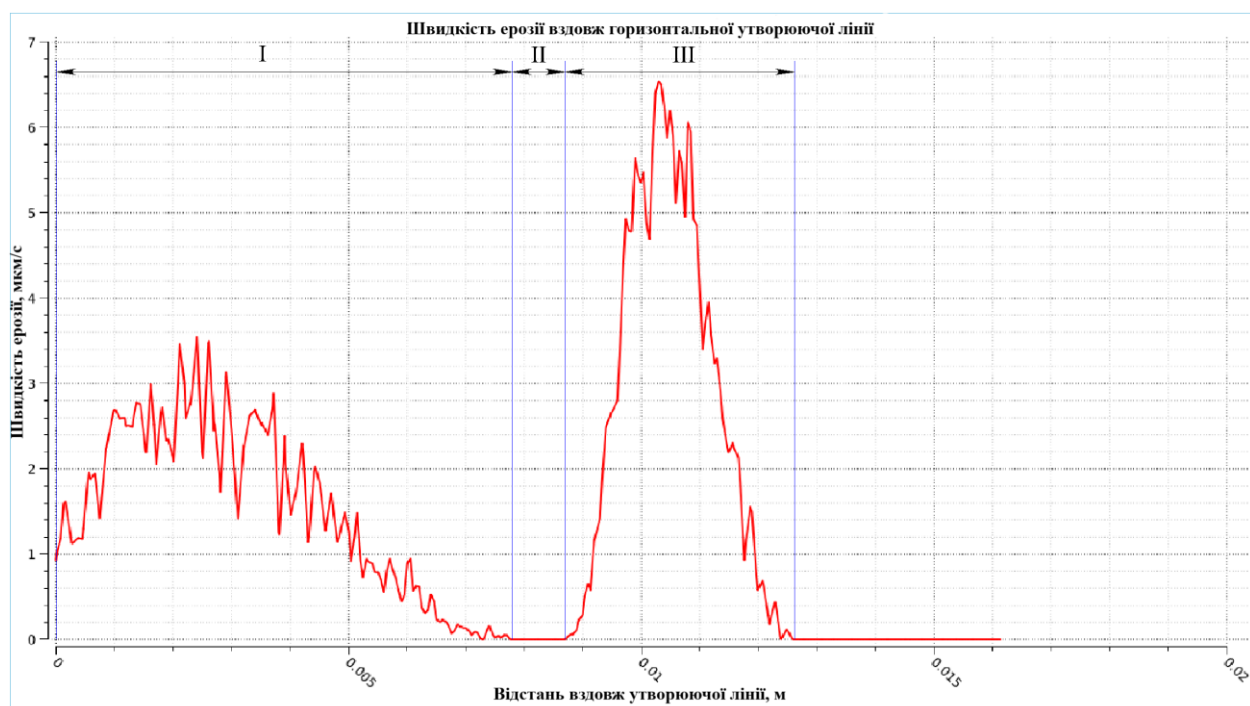


Рис.3.25 – Зміна швидкості ерозії вздовж горизонтальної утворюючої лінії,
варіант 4.1 – кут α 26° відстань $S=6$ мм.

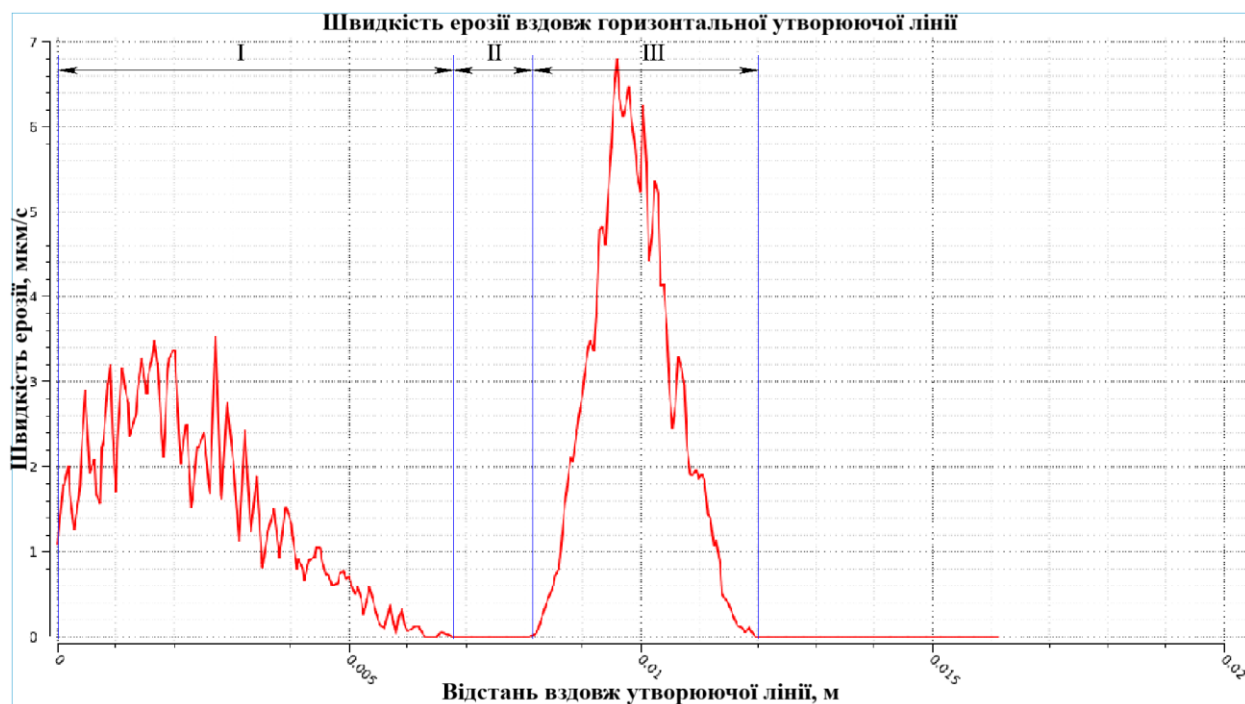


Рис.3.26 – Зміна швидкості ерозії вздовж горизонтальної утворюючої лінії,
варіант 4.3 – кут α 30° відстань $S=6$ мм.

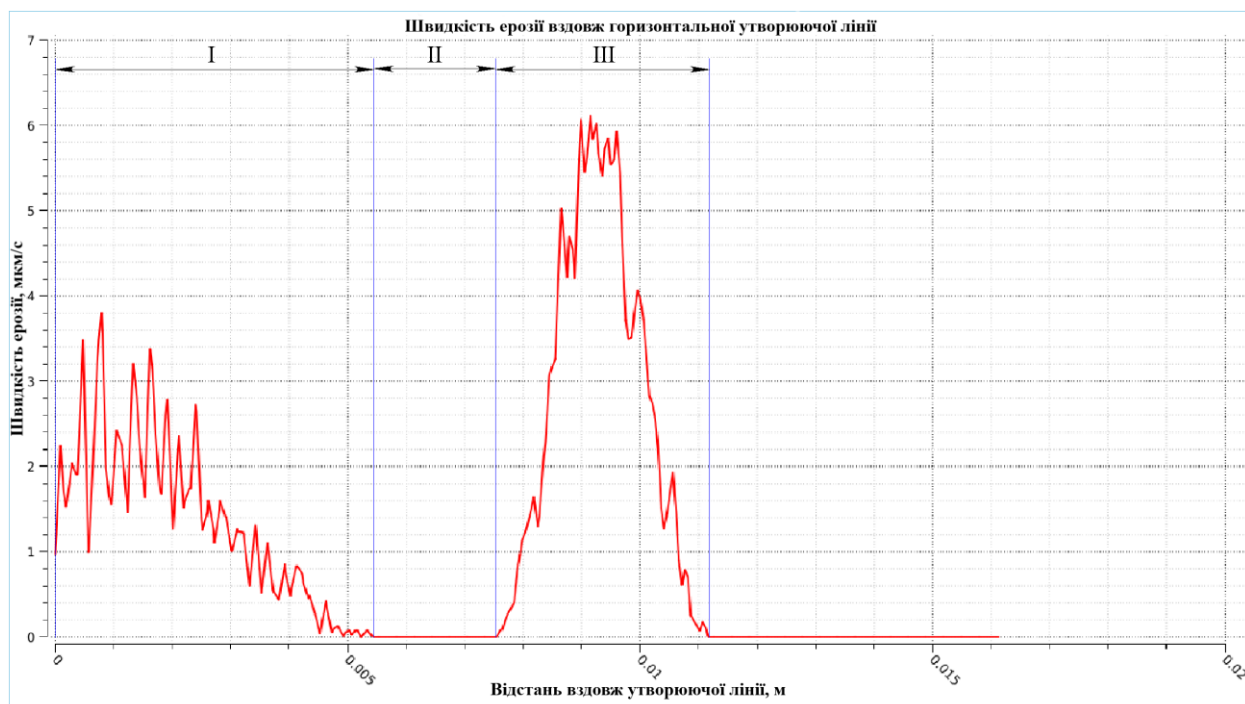


Рис.3.27 – Зміна швидкості ерозії вздовж горизонтальної утворюючої лінії,
варіант 4.5 – кут α 34° відстань $S=6$ мм.

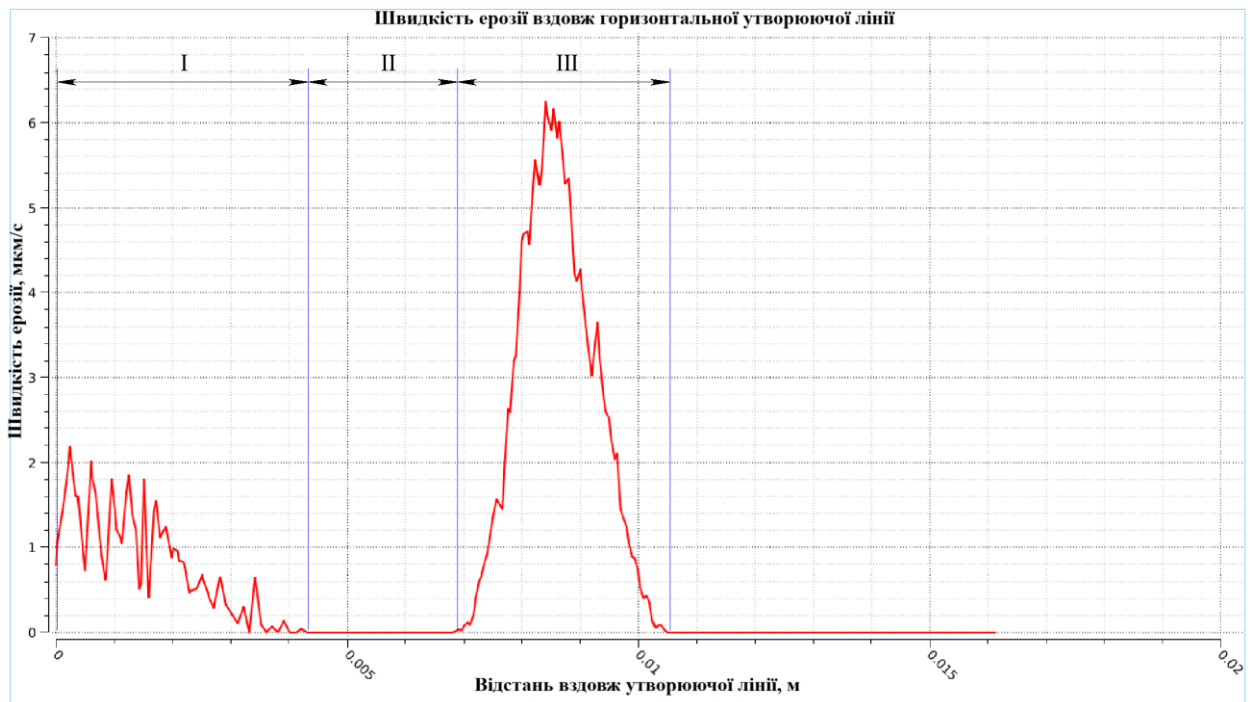


Рис.3.28 – Зміна швидкості ерозії вздовж горизонтальної утворюючої лінії, варіант 4.7 – кут α 38° відстань S=6 мм.

Аналізуючи дані та характер графіків (рис.3.11, 3.14-3.28) окремо по блокам, наприклад блок 1, що включає в себе варіанти з 1.1 по 1.7, спостерігається плавна динаміка зміни величин певних ділянок зон обробки. Для цього отримані величини ділянок наведені на рис.3.29-3.32.

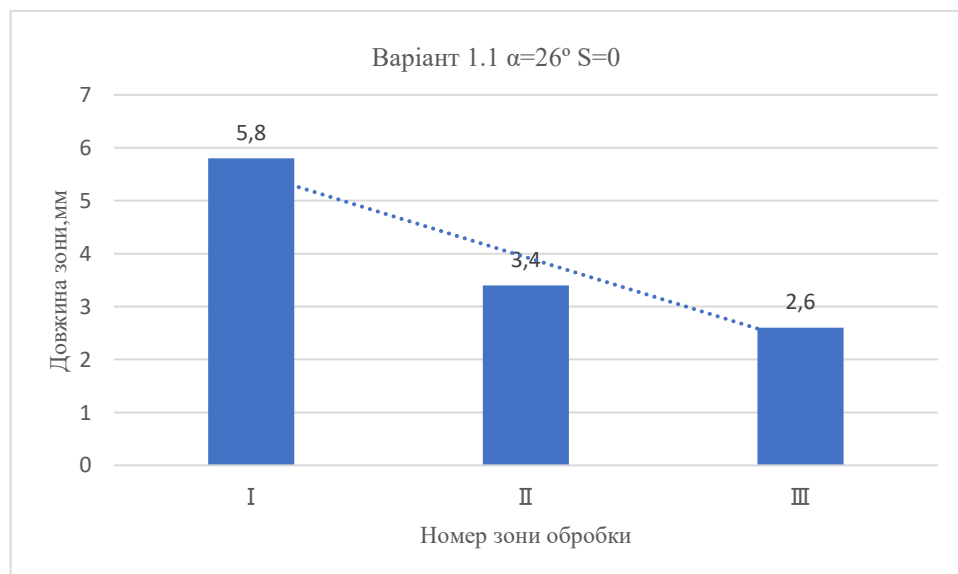


Рис.3.29 – Обчислення довжин ділянок контакту та «нейтральної зони».

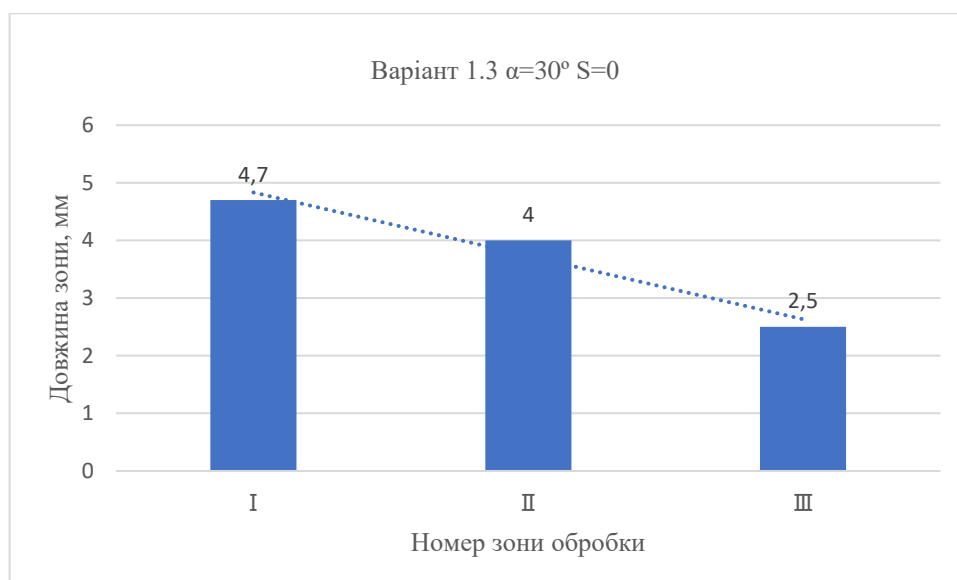


Рис.3.30 – Обчислення довжин ділянок контакту та «нейтральної зони».

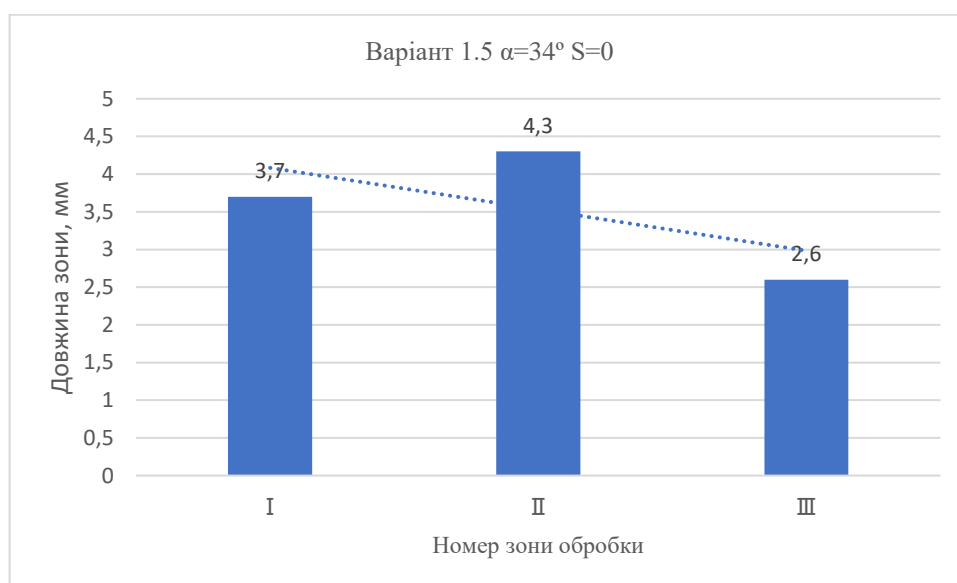


Рис.3.31 – Обчислення довжин ділянок контакту та «нейтральної зони».

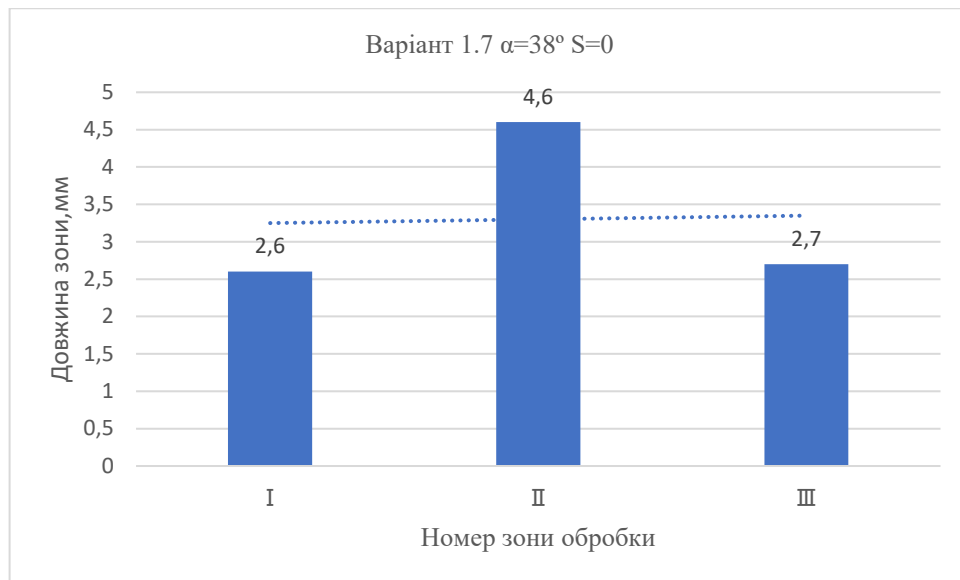


Рис.3.32 – Обчислення довжин ділянок контакту та «нейтральної зони».

Як видно з графіків при збільшенні кута положення сопла відносно лопатки величина зони I зменшується з 5,8 мм (рис.3.29) до 2,6 мм (рис.3.32). Аналіз «нейтральної зони» II показав зворотну тенденцію, яка свідчить про зростання від 3,4 мм (рис.3.29) до 4,6 мм (рис.3.32). Що стосується III-ї зони, тенденція до зростання чи спадання мало виражена, іншими словами умовно стабільна. На основі аналізу рис. рис.3.29-3.32 можна зробити висновок, що динаміка III-ї зони обумовлена формою профілю міжлопаткового каналу. Динаміку зміни зони I зображено на графіку (рис.3.33).

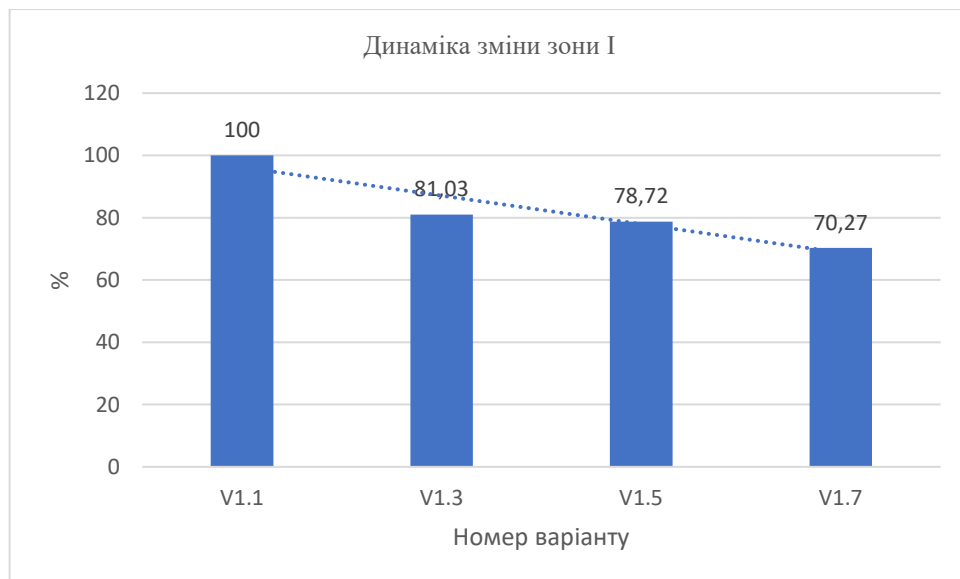


Рис.3.33 – Динаміка зміни зони I в залежності від збільшення кута обробки.

Якщо аналізувати інші блоки, що включають в себе варіанти з 2.1-4.7, то там спостерігається аналогічна тенденція до змін зони I та II при збільшенні кута α , за винятком варіанту 3.1, в якому з'явилося одразу дві «нейтральні» зони. На думку автора дане відхилення від загальної динаміки особливістю розташування сопла відносно каналу лопатки, що передбачає $\alpha=26^\circ$ та зазор $S=4$ мм. Однак якщо проаналізувати тенденцію зміни II зони по всіх варіантах, на прикладі графіку (рис.3.34), що показує мінімальне значення 0,9 мм згідно з варіантом 4.1 та максимальне 4,6 мм варіанту 1.7 відповідно.

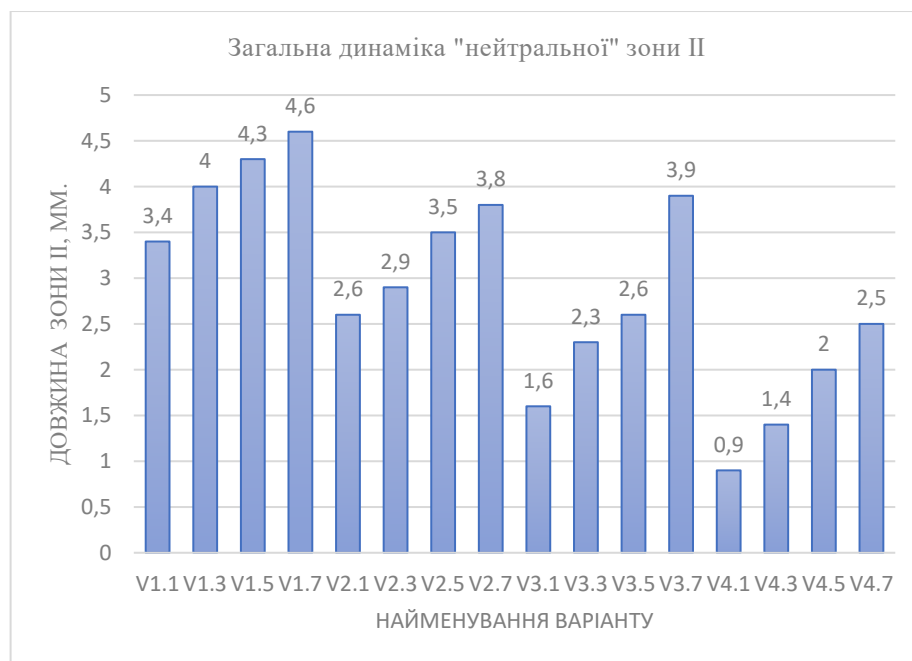


Рис.3.34 – Динаміка зміни нейтральної зони.

Візуально аналізуючи варіант 4.1 та порівнюючи його з іншими, були виявлені деякі позитивні моменти, а саме це найменша «нейтральна зона» та найбільша сумарна довжина ділянки абразивного впливу, крім того аналізуючи сумарну зону обробки по всі варіантах (рис.3.35) видно що варіант 4.1 має найбільше значення.

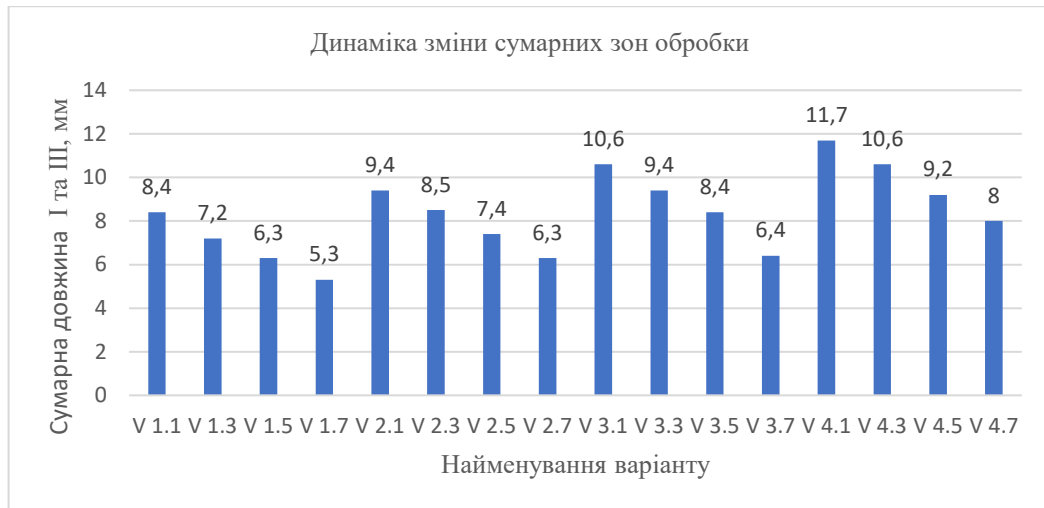
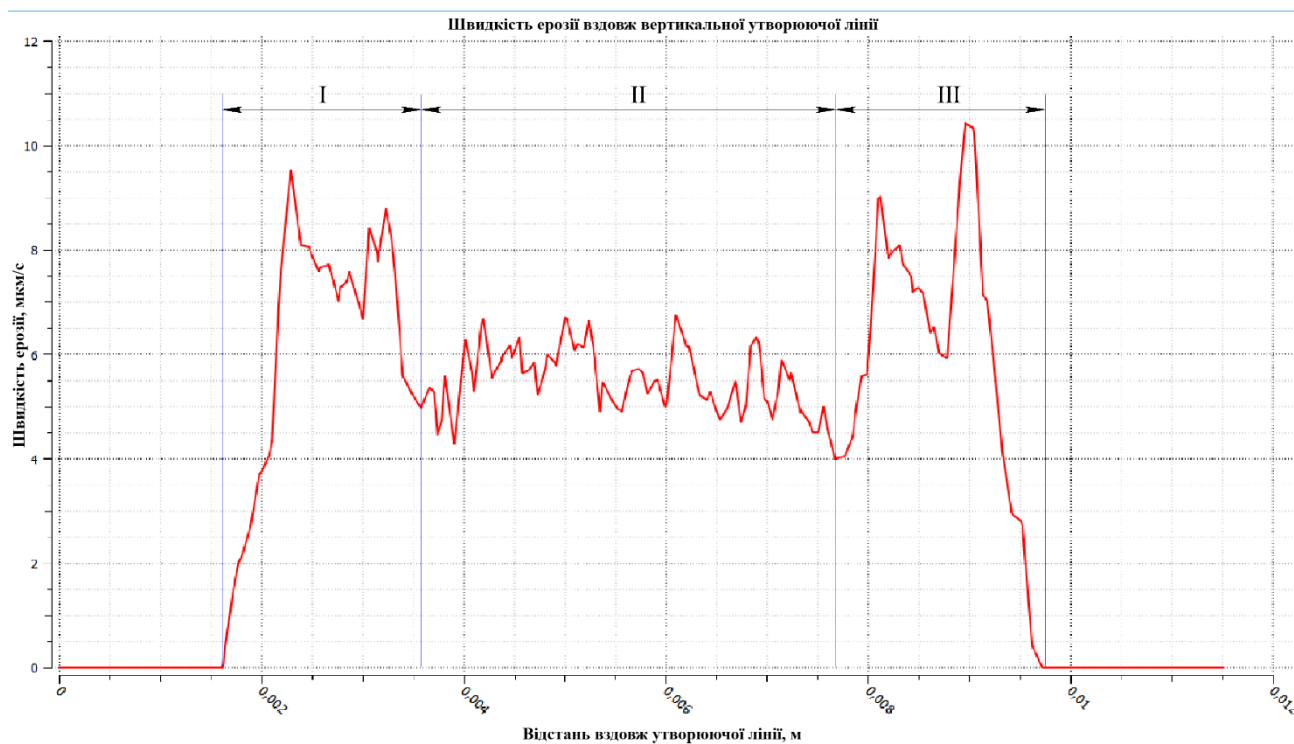


Рис.3.35 – Динаміка сумарних зон обробки.

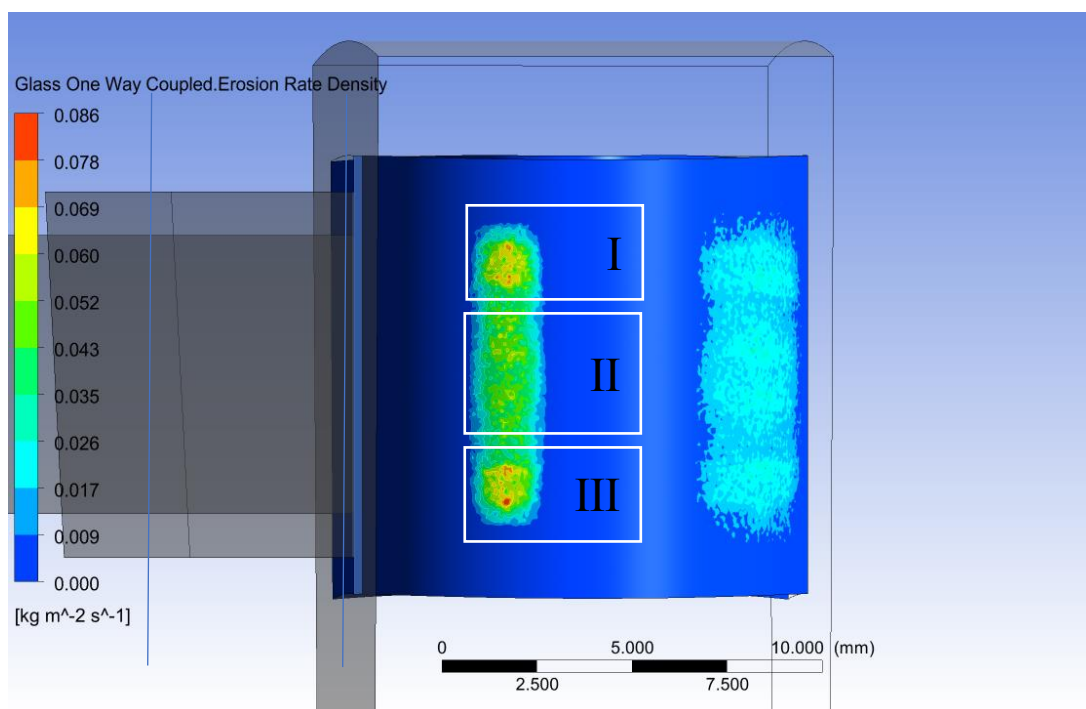
На графіках зони I та II це ділянки зон обробки, якщо їх довжину оцінити сумарно та порівняти з іншими варіантами (див.рис.3.35), то впливає, що найвищий показник має варіант 4.1. Виходячи з даних графіків (див.рис.3.34-3.35) можна впевнено зробити висновок що режим обробки за умов варіанту 4.1 ($\alpha=26^\circ$ та зазор $S=6$ мм) є найбільш ефективним, за таких умов довжина зони обробки складає 71,25 % від всієї довжини профілю каналу лопатки.

3.3 Аналіз швидкостей ерозії та величини їх ділянок вздовж вертикальної утворюючої лінії

При аналізі графіку швидкості ерозії варіанту 1.1 ($\alpha=26^\circ$ та $S=0$ мм) вздовж вертикальної утворюючої лінії спостерігається дві симетричні зони I та III де спостерігається пікові значення швидкостей ерозії (рис.3.36а). Порівнюючи графік зі спектральною зоною обробки (рис.3.36б), виділення зон I та III як на графіку так і на спектрі, свідчить про те, що в цих зонах ерозія відбувається більш інтенсивно ніж в II, внаслідок чого виникає нерівномірна шорсткість та форма рельєфу поверхні та навіть пошкодження лопатки при обробці, свідченням чого є різниця спектру зон обробки.



а



б

Рис.3.36 – Інтенсивність ерозії вздовж вертикальної утворюючої лінії, варіант 1.1: а – графік, б – спектр зон обробки.

Виникнення даного явища не дозволить отримати рівномірну поверхню та забезпечити необхідний рівень шорсткості. Було поставлено завдання

знайти причину виникнення даного явища та знаходження шляхів його усунення.

3.4 Вирішення завдання

Високий рівень ерозії в I та III зоні, представлений на рис. 3.36а і 3.36б, є результатом моделювання обробки варіанту 1.1 за умовами якого, сопло розташовується по відношенню до каналу лопатки під кутом $\alpha=26^\circ$ та з гарантованим зазором між кромкою лопатки та соплом що становить $S=0$ мм. Для пошуку шляхів вирішення проблеми нерівномірності ерозії необхідно проаналізувати графіки інших 15-ти варіантів та проаналізувати наявність будь-якої динаміки або закономірності, що могли б пояснити причину виникнення цього явища. Аналіз швидкості ерозії вздовж вертикальної утворюючої лінії варіантів 1.3-4.7 представлений нижче на рис. 3.37-3.51.

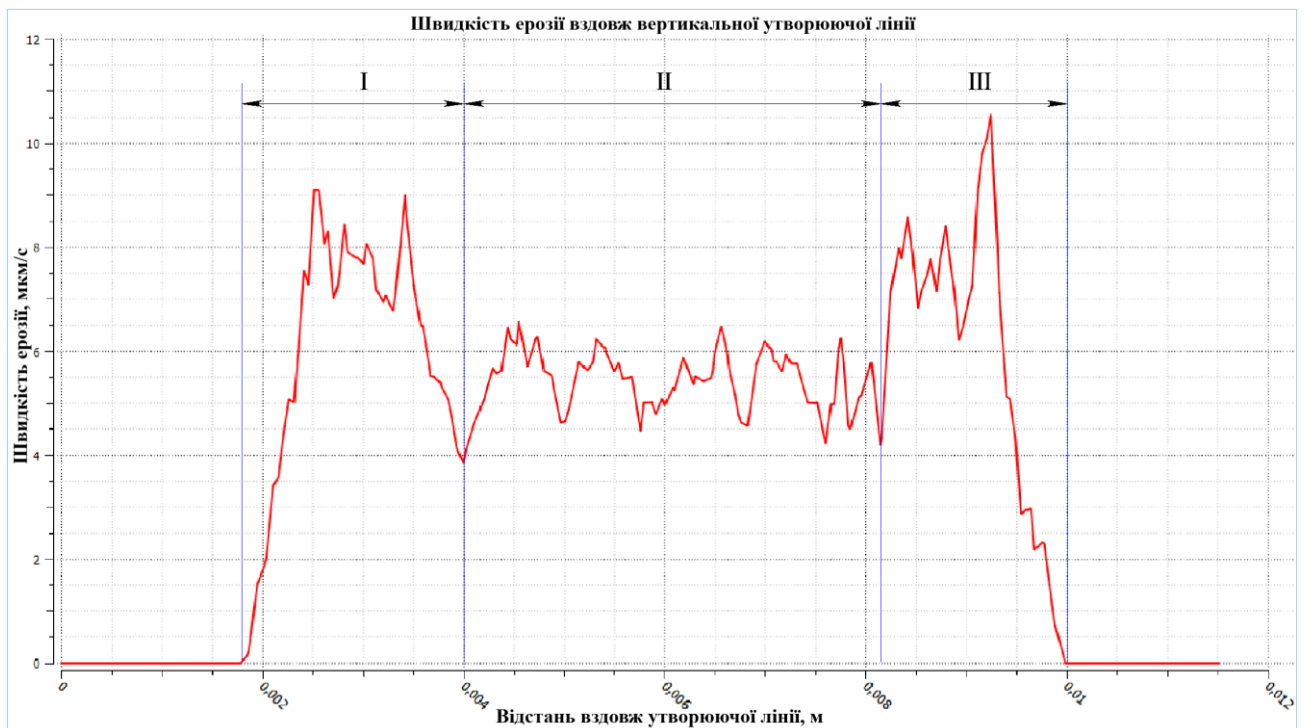


Рис.3.37 – Зміна швидкості ерозії вздовж вертикальної утворюючої лінії, варіант 1.3: $\alpha=30^\circ$ і $S=0$ мм.

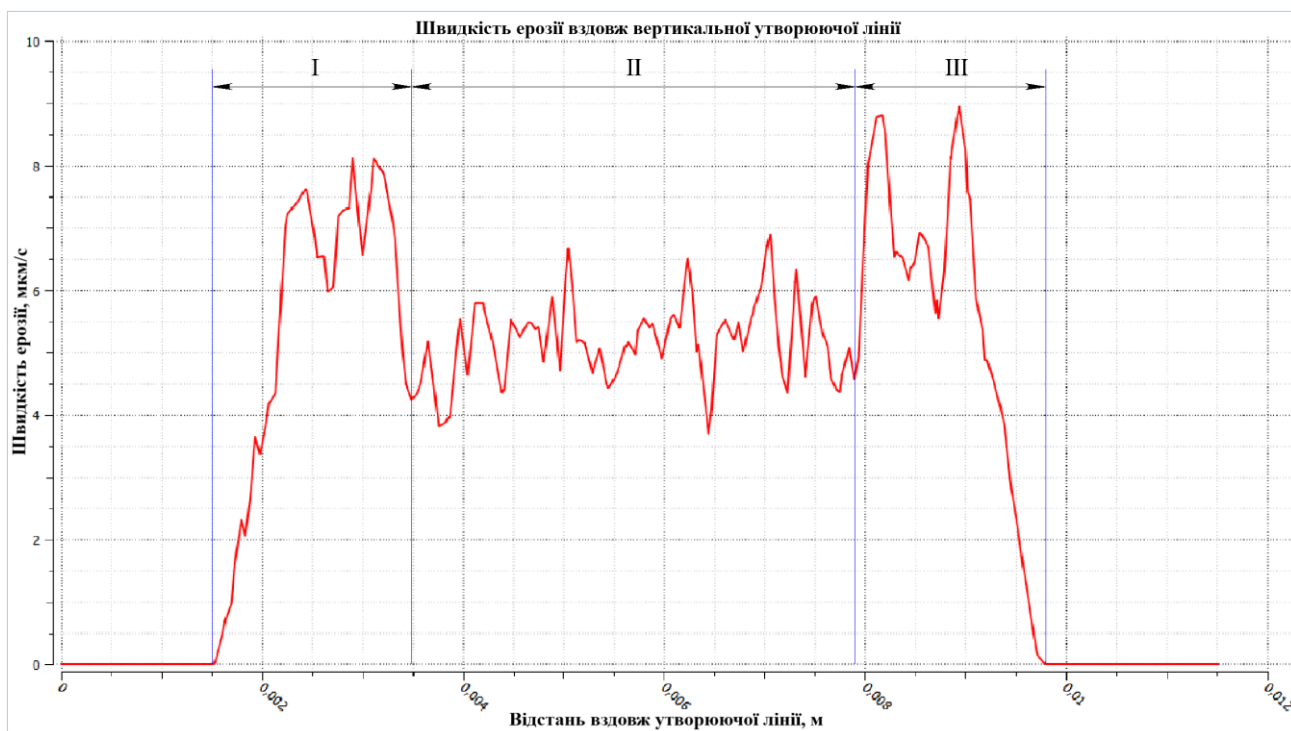


Рис.3.38 – Зміна швидкості ерозії вздовж вертикальної утворюючої лінії,
варіант 1.5: $\alpha=34^\circ$ і $S=0$ мм.



Рис.3.39 – Зміна швидкості ерозії вздовж вертикальної утворюючої лінії,
варіант 1.7: $\alpha=38^\circ$ і $S=0$ мм.

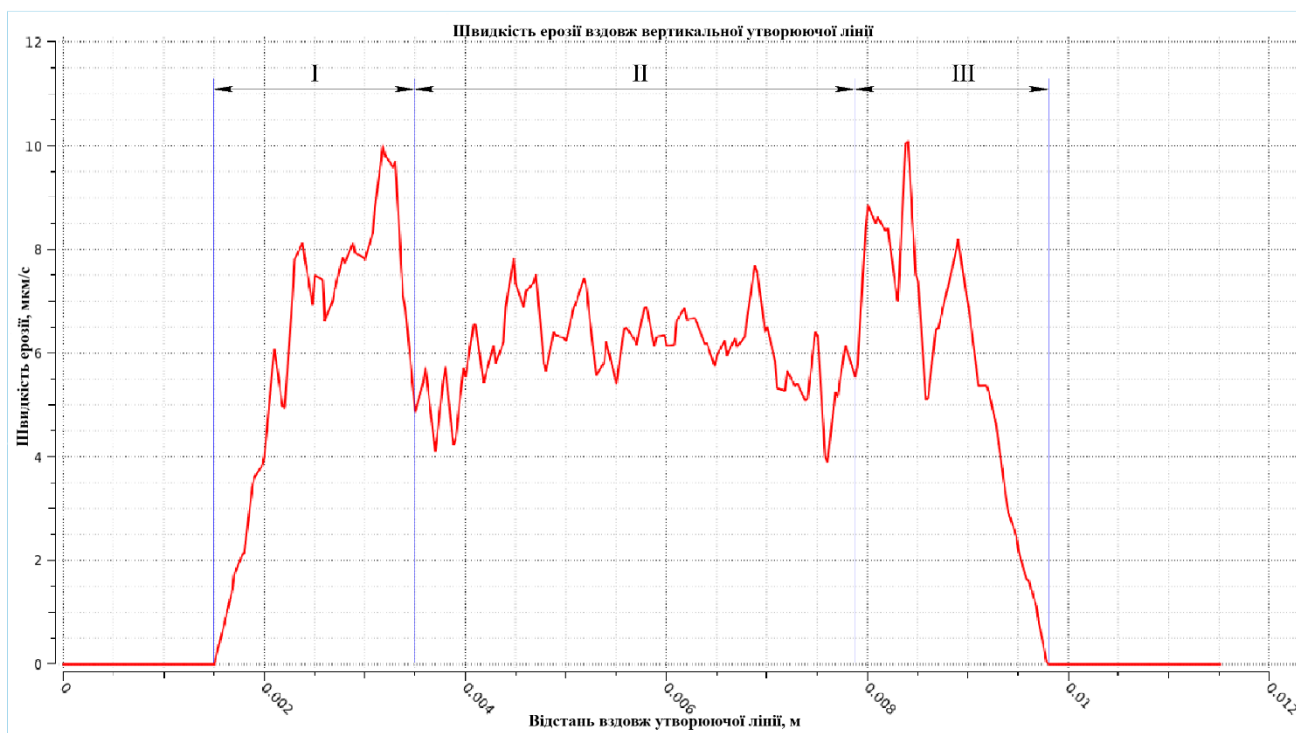


Рис.3.40 – Зміна швидкості ерозії вздовж вертикальної утворюючої лінії,
варіант 2.1: $\alpha=26^\circ$ і $S=2$ мм.

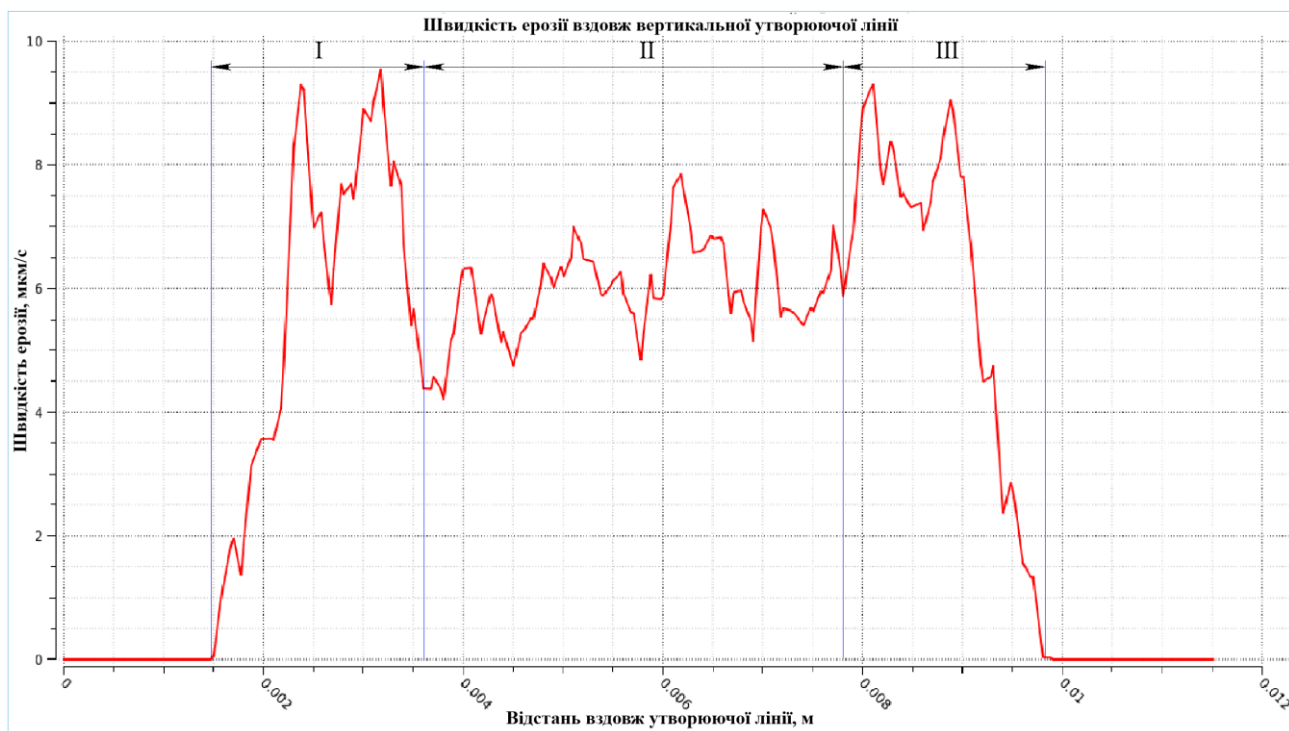


Рис.3.41 – Зміна швидкості ерозії вздовж вертикальної утворюючої лінії,
варіант 2.3: $\alpha=30^\circ$ і $S=2$ мм.

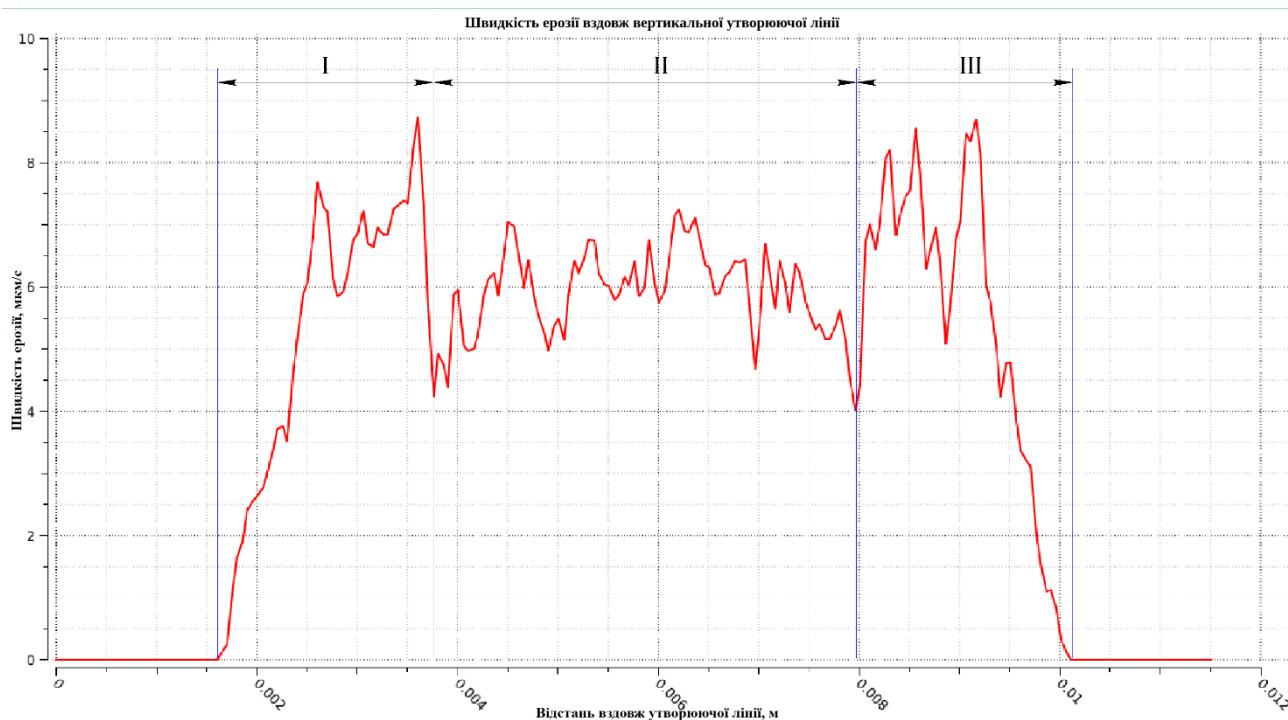


Рис.3.42 – Зміна швидкості ерозії вздовж вертикальної утворюючої лінії,
варіант 2.5: $\alpha=34^\circ$ і $S=2$ мм.

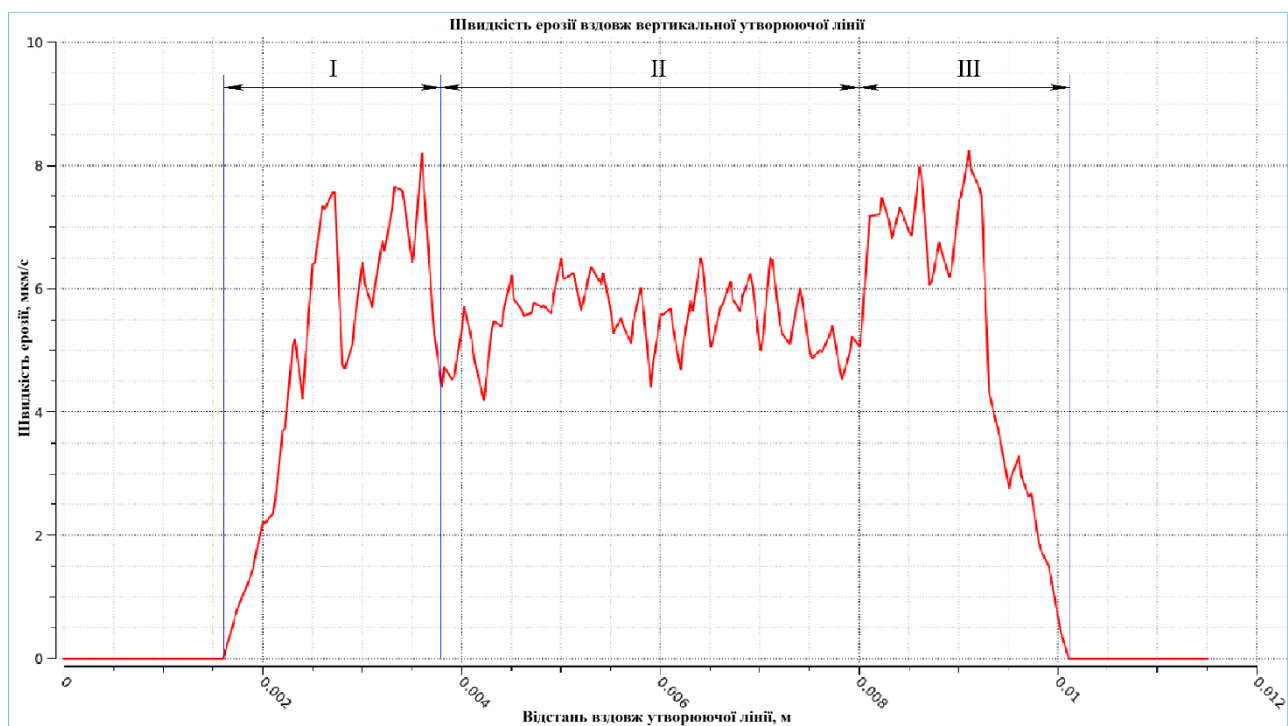


Рис.3.43 – Зміна швидкості ерозії вздовж вертикальної утворюючої лінії,
варіант 2.7: $\alpha=38^\circ$ і $S=2$ мм.



Рис.3.44 – Зміна швидкості ерозії вздовж вертикальної утворюючої лінії,
варіант 3.1: $\alpha=26^\circ$ і $S=4$ мм.

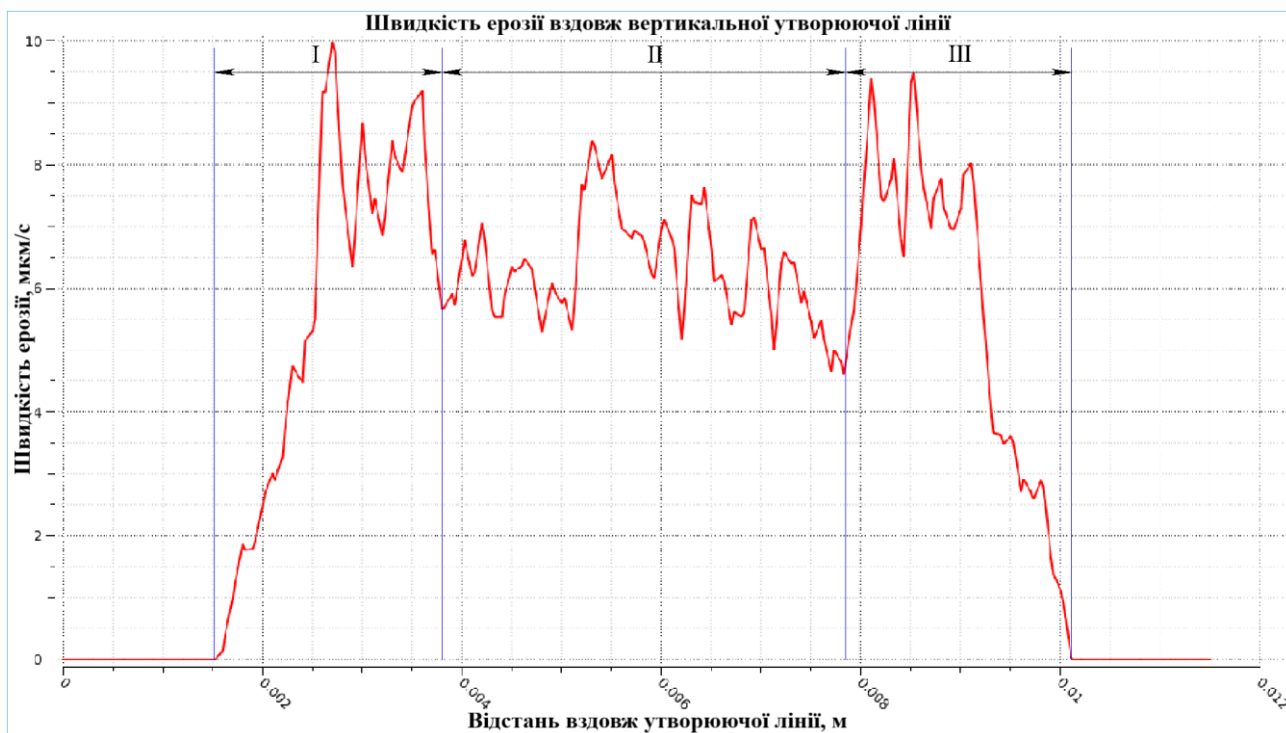


Рис.3.45 – Зміна швидкості ерозії вздовж вертикальної утворюючої лінії,
варіант 3.3: $\alpha=30^\circ$ і $S=4$ мм.

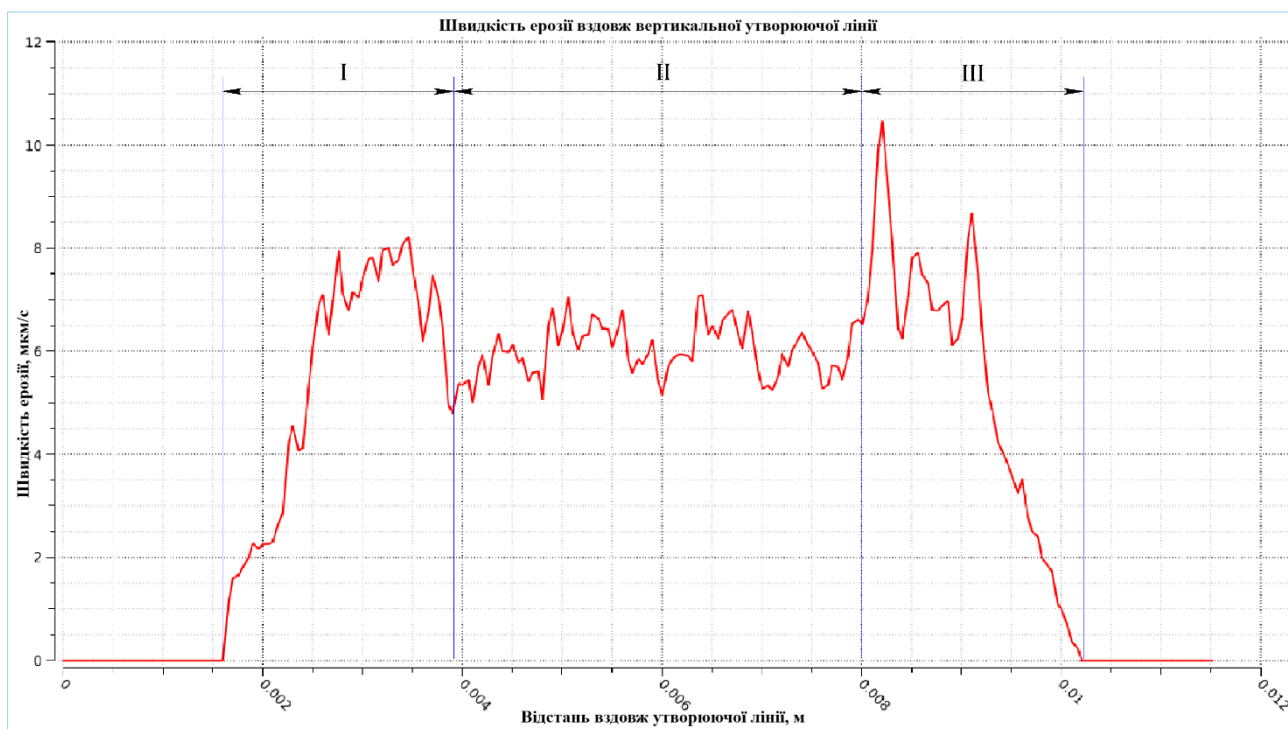


Рис.3.46 – Зміна швидкості ерозії вздовж вертикальної утворюючої лінії,
варіант 3.5: $\alpha=34^\circ$ і $S=4$ мм.

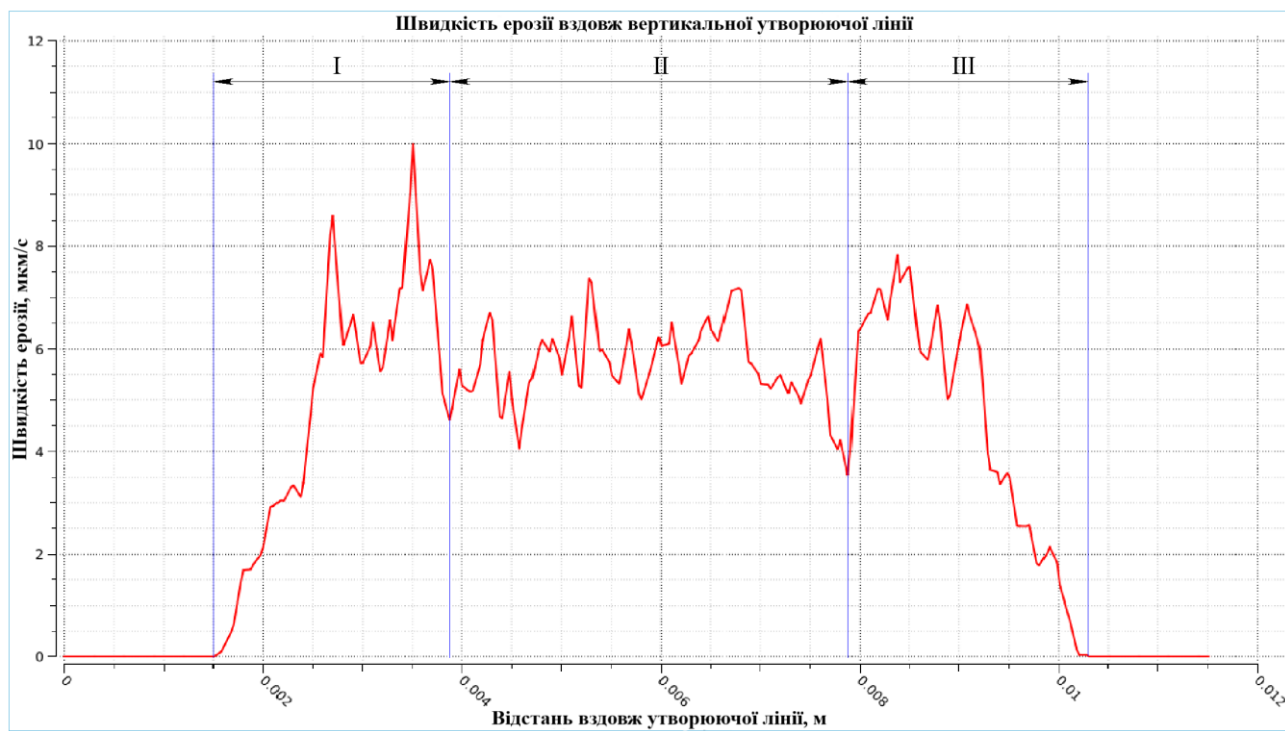


Рис.3.47 – Зміна швидкості ерозії вздовж вертикальної утворюючої лінії,
варіант 3.7: $\alpha=38^\circ$ і $S=4$ мм.

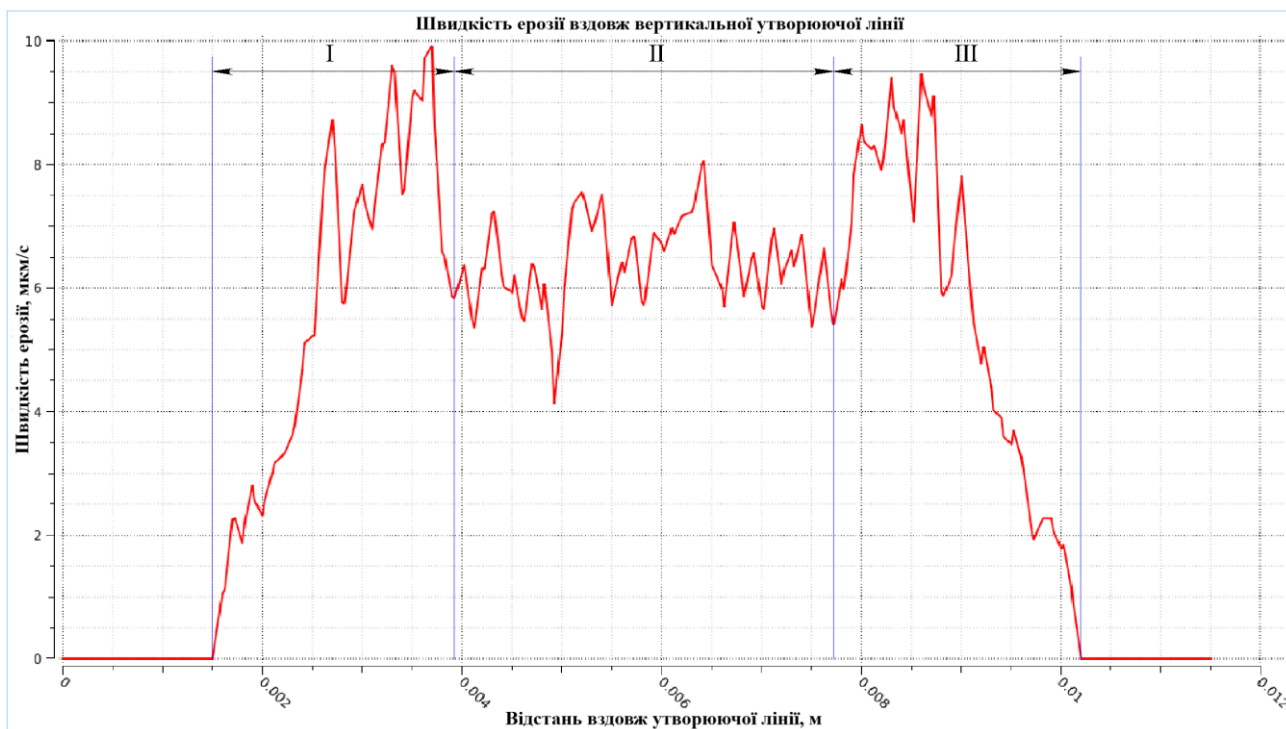


Рис.3.48 – Зміна швидкості ерозії вздовж вертикальної утворюючої лінії,
варіант 4.1: $\alpha=26^\circ$ і $S=6$ мм.

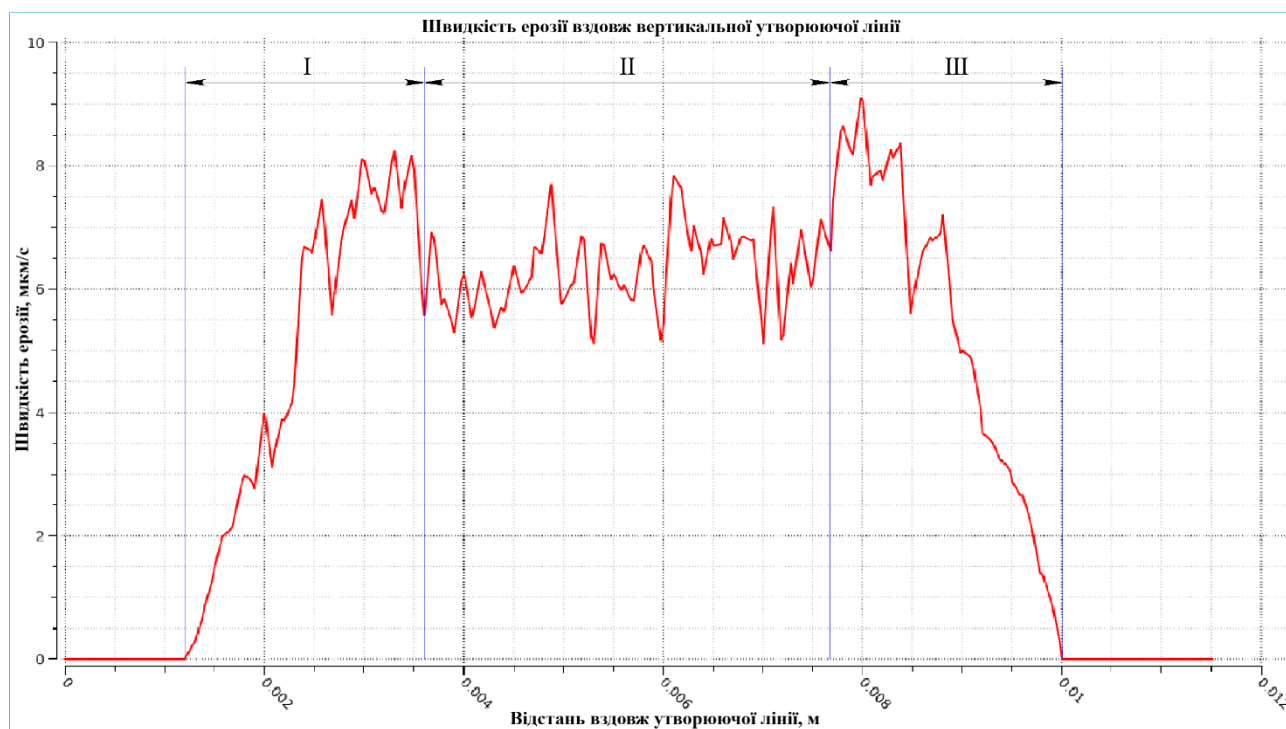


Рис.3.49 – Зміна швидкості ерозії вздовж вертикальної утворюючої лінії,
варіант 4.3: $\alpha=30^\circ$ і $S=6$ мм.

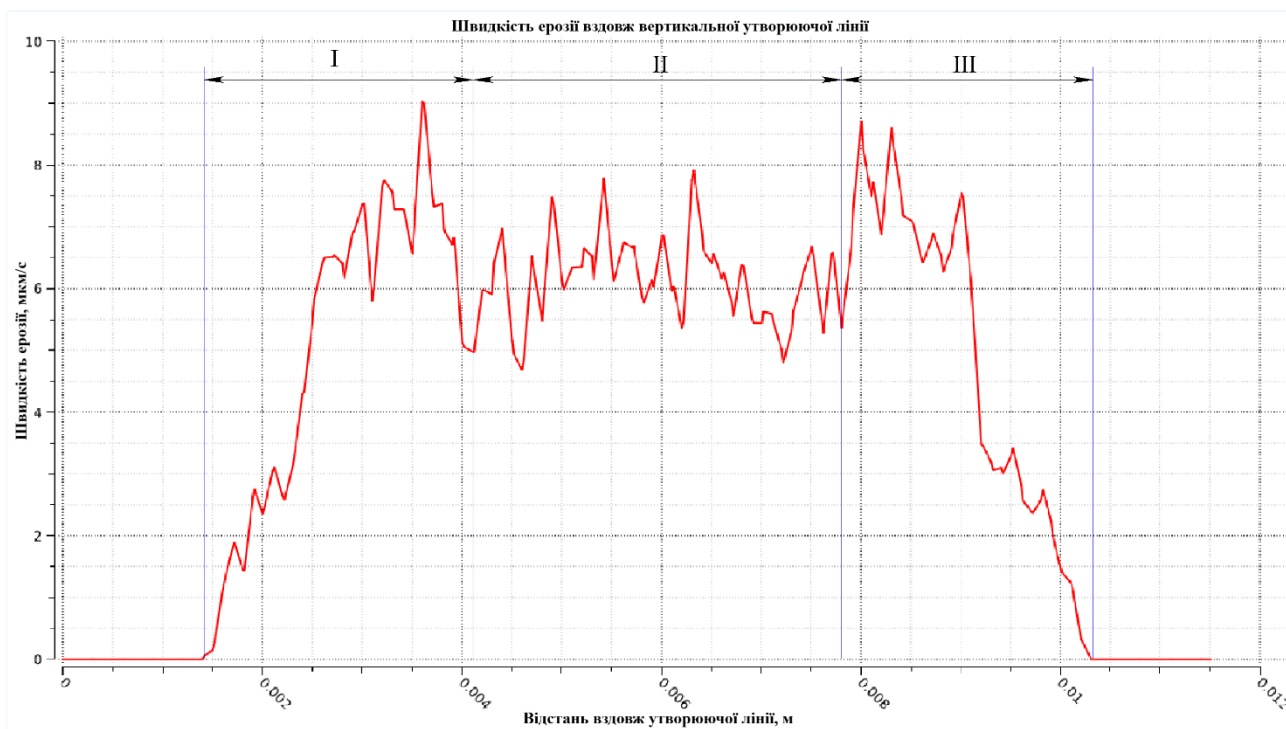


Рис.3.50 – Зміна швидкості ерозії вздовж вертикальної утворюючої лінії,
варіант 4.5: $\alpha=34^\circ$ і $S=6$ мм.

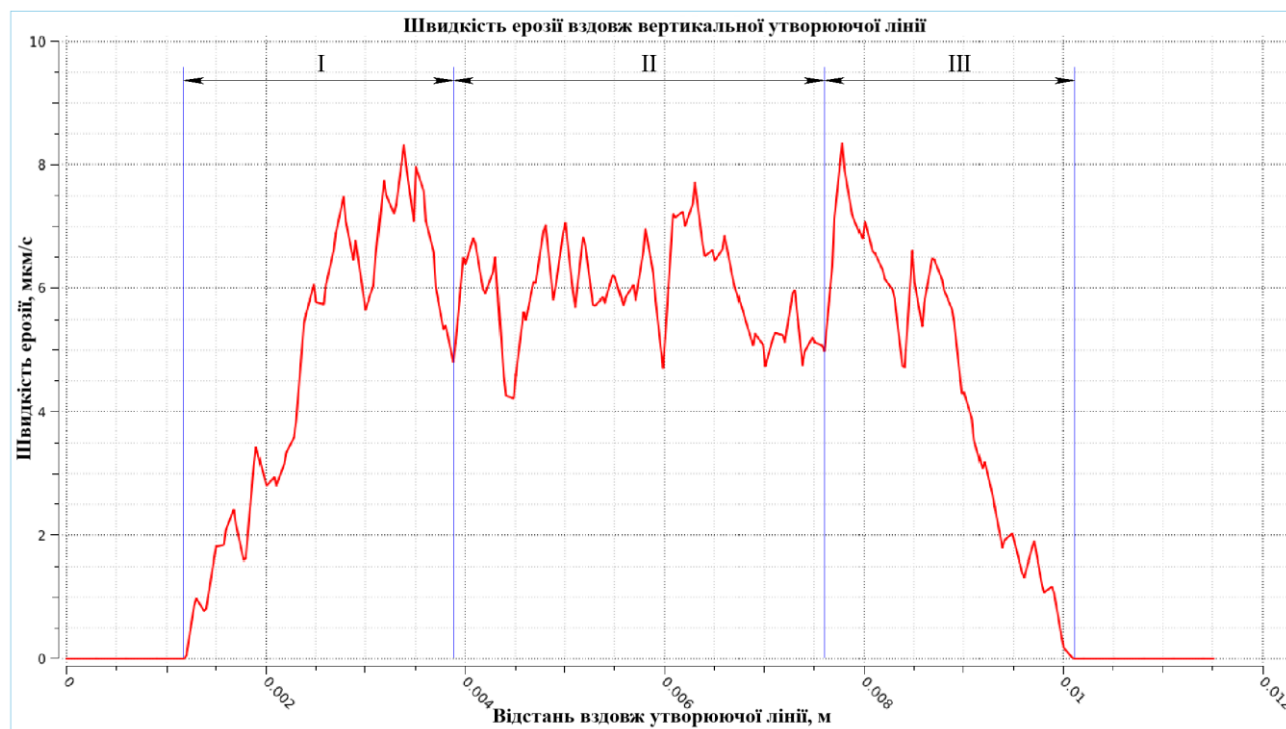


Рис.3.51 – Зміна швидкості ерозії вздовж вертикальної утворюючої лінії,
варіант 4.7: $\alpha=38^\circ$ і $S=6$ мм.

При візуальній оцінці (рис. 3.36а, 3.37-3.51) видно, що загальний профіль графіка що належить варіанту 1.1 також притаманний всім іншим варіантам, але з деякими відмінностями. Аналізуючи блоками на прикладі варіантів 1.1-1.7 при збільшенні кута α від 26° до 38° зазор $S=0$, ми бачимо, що довжина зони обробки суттєво не змінюється і залишається в діапазоні 8,1...8,3 мм, але при цьому при збільшенні кута α видно що II зона прагне вирівняти профіль по відношенню до I та III зони, така ж тенденція і в інших варіантах. При аналізі всіх варіантів з 1.1 по 4.7 ми бачимо що при збільшенні S зростає довжина поздовжньої лінії обробки і максимальні її значення відповідають варіанту 4.1 що становить 8,9 мм та варіанту 4.5 та 8,9 мм відповідно. При цьому варто звернути увагу, що при попередньому аналізі зон обробки за умов варіанту 4.1 а саме $\alpha=26^\circ$ та $S=6$ мм була виявлена найбільш ефективна обробка, це в черговий раз підтверджує логічність підходу до аналізу та вибору правильного установу при обробці.

При вивченні загальної картини графіків та їх характерного профілю, можна зробити висновок зміна положення сопла відносно каналу не спричиняє суттєвого впливу на профіль графіку лінії обробки. При поглибленому вивченні даних, отриманих при чисельному моделюванні абразивної обробки каналів лопаток закритого типу, увагу автора привернули два фактори що можуть слугувати причиною нерівномірності ерозії.

Ретельний аналіз даних спонукав автора висунути декілька припущень, що до факторів, які безпосередньо впливають на обробку, а саме однорідності розміру частинок абразивного матеріалу та форму внутрішнього каналу сопла.

На думку автора, ці факти мають ключовий вплив на ефективність та якість обробки поверхні.

3.5 Вплив різнозернистості абразивного матеріалу зернистості на ефективність та якість обробки

На основі отриманих даних, було сформульоване припущення, що нерівномірність розміру частинок, діапазон яких знаходиться від 50 до 150 мкм, може слугувати однією з основних причин нерівномірної концентрації ерозії (рис.3.36), оскільки частинки абразивного матеріалу більшого розміру мають відповідно більшу кінетичну енергію і як наслідок спричиняють більш значний вплив на поверхню жолоба лопатки ніж частинки меншого розміру. На рис.3.52-3.53 показані траєкторії руху частинок в поперечному та поздовжньому перерізі каналу лопаток, при цьому розмір частинок виділений окремим кольором спектру.

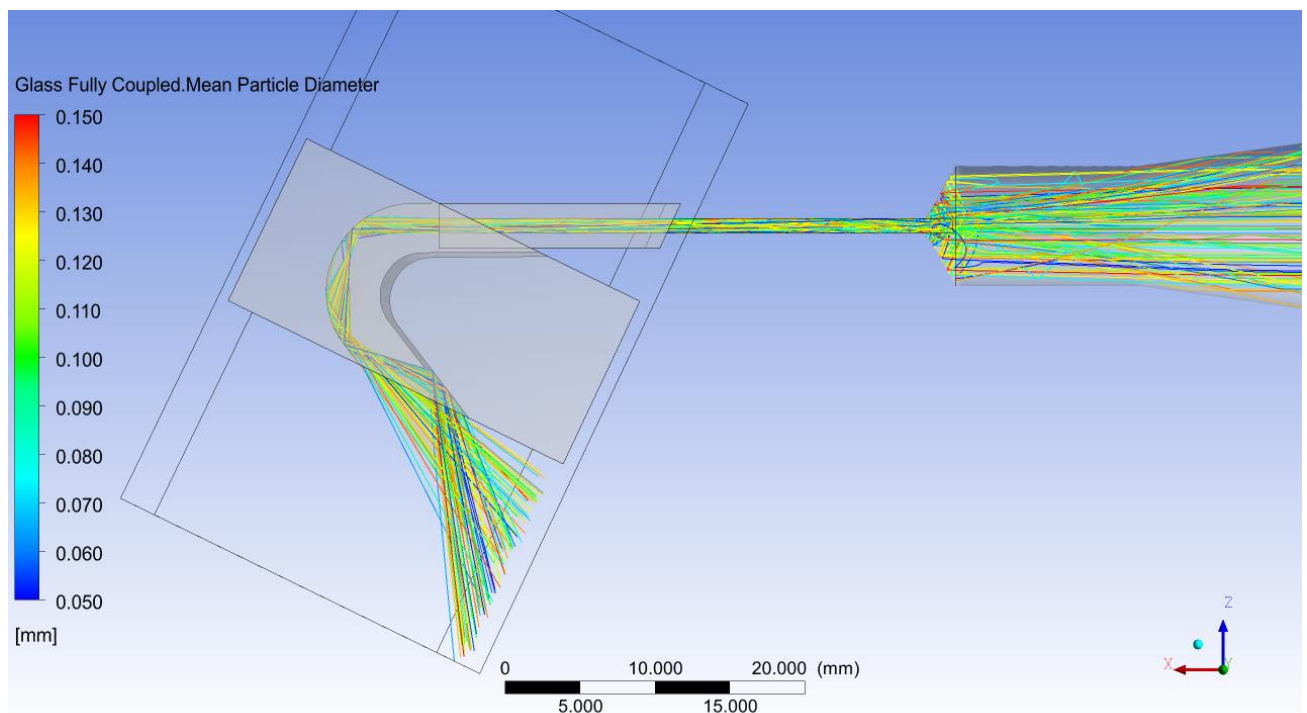


Рис.3.52 – Траєкторія абразивних частинок в поперечному перерізі каналу лопатки, варіант 1.1.

Характер розподілу концентрації ерозії по I та III зоні (рис.3.36), дозволяє зробити припущення, що в момент обробки в каналі сопла виникають внутрішні фізичні сили, що змушують частинки з більшою масою притискатись до бічних сторін частини прямого каналу сопла, чим в свою чергу і пояснюється характер картини ерозії (рис.3.36).

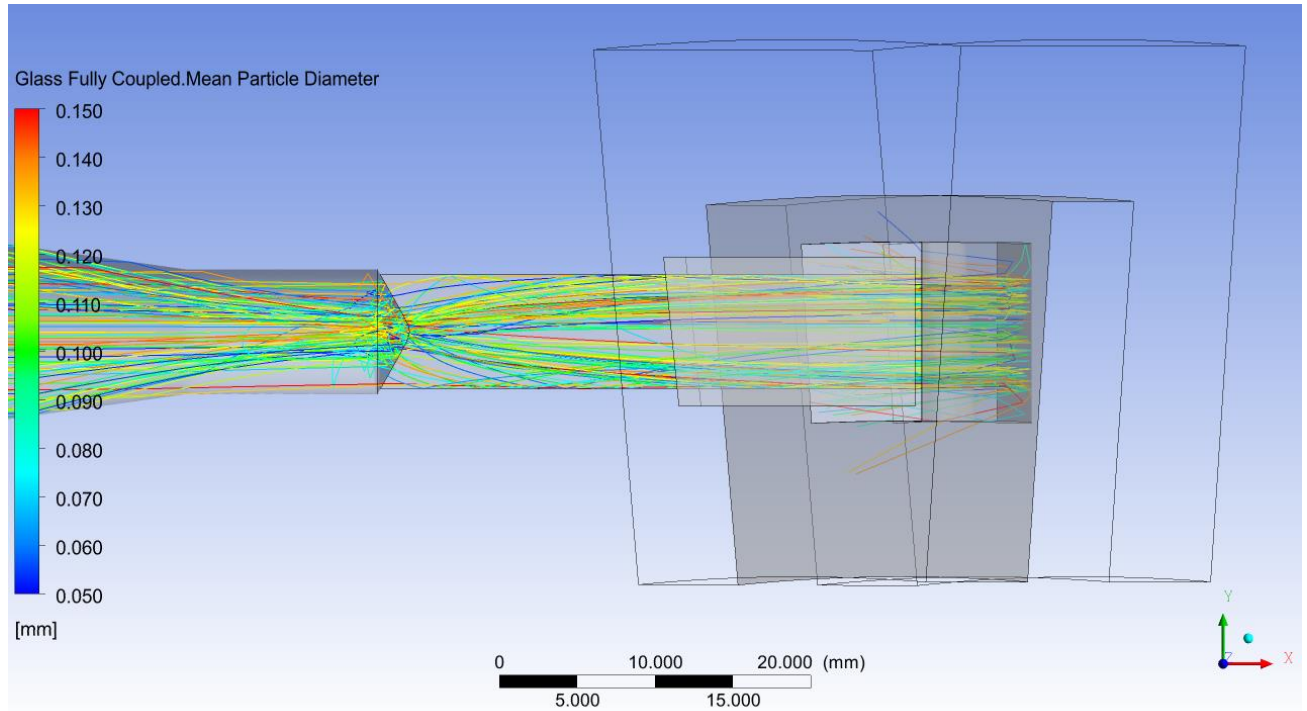


Рис.3.53 – Траєкторія абразивних частинок в поздовжньому перерізі каналу лопатки, варіант 1.1.

3.6 Дослідження впливу різнозернистості абразивного матеріалу зернистості на ефективність та якість обробки

Для підтвердження або спростування гіпотези автором прийнято рішення виконати повторне моделювання обробки абразивно-повітряним струменем жолоба лопатки закритого типу з незначними корективами вхідних даних а саме заміна діапазону розміру абразивних частинок на сталу величину, яка становить 100 мкм. Моделювання відбувалося за умовами варіанту 1.1, а

саме розташування сопла відносно каналу під кутом $\alpha=26^\circ$ та відстань від сопла до кромки лопатки $S=0$ відповідно, наведена на рис.3.54.

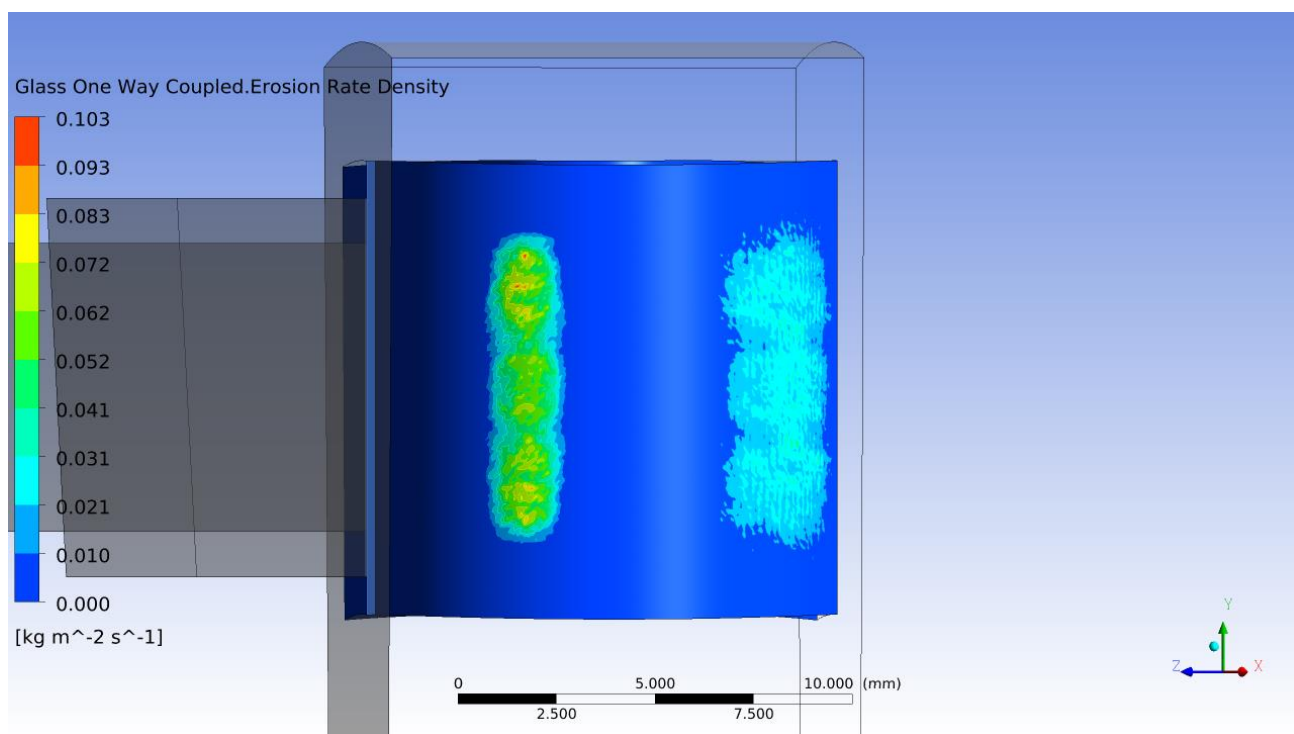


Рис.3.54 – Інтенсивність ерозії вздовж вертикальної утворюючої лінії, контрольний варіант 1.0 $\alpha=26^\circ$, $S=0$ мм, розмір часток - 100 мкм.

Отримані в результаті моделювання дані показали, що зміна зернистості частинок вплинула на розподіл концентрації ерозії, а саме спостерігається рівномірний розподіл концентрації ерозії вздовж всієї зони обробки.

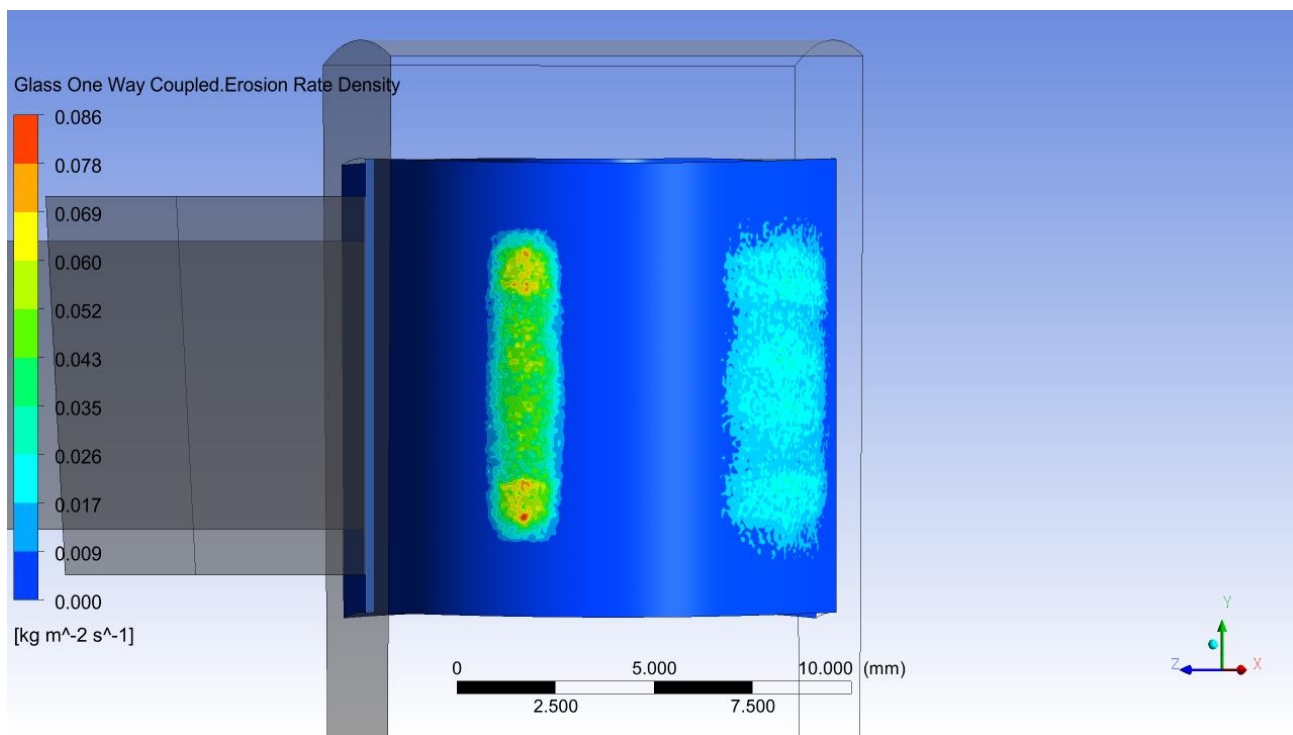


Рис.3.55 – Інтенсивність ерозії вздовж вертикальної утворюючої лінії, варіант 1.1, $\alpha=26^\circ$, $S=0$ мм, розмір часток - 50–100 мкм.

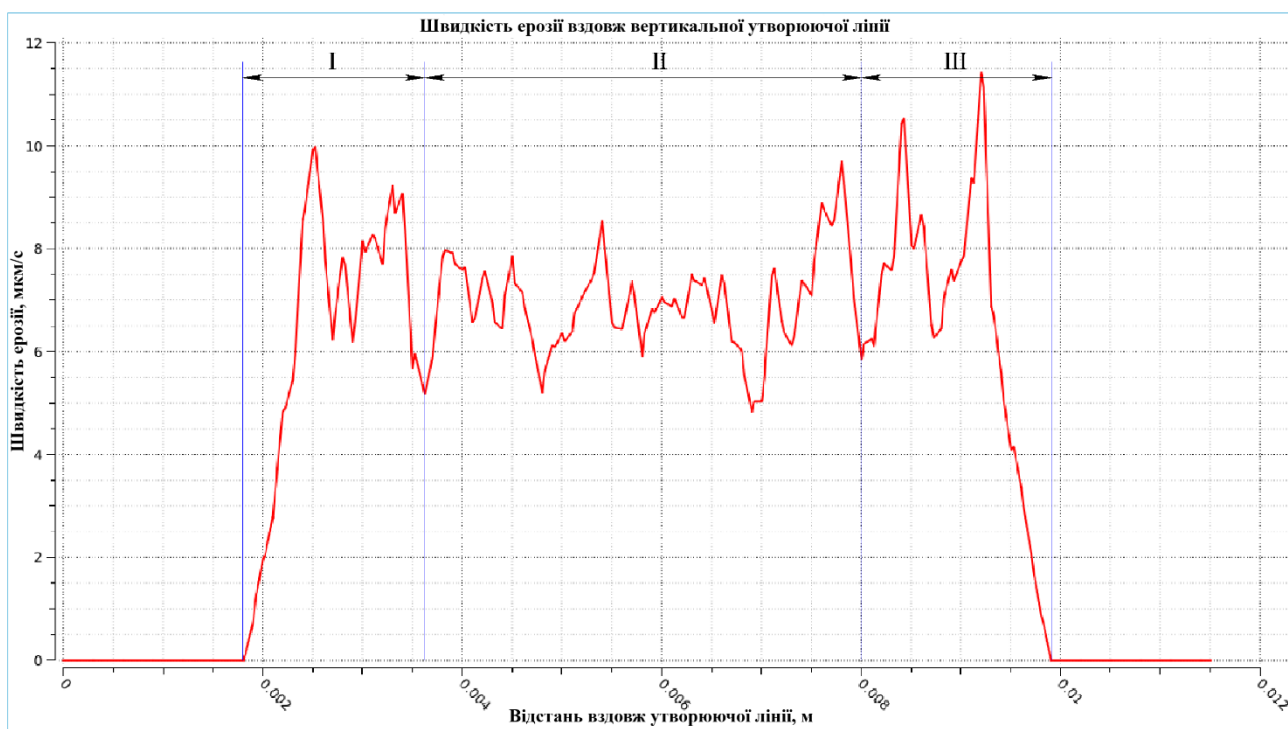


Рис.3.56 – Зміна швидкості ерозії вздовж вертикальної утворюючої лінії, контрольний варіант 1.0 : $\alpha=26^\circ$, $S=0$ мм, розмір часток - 100 мкм).

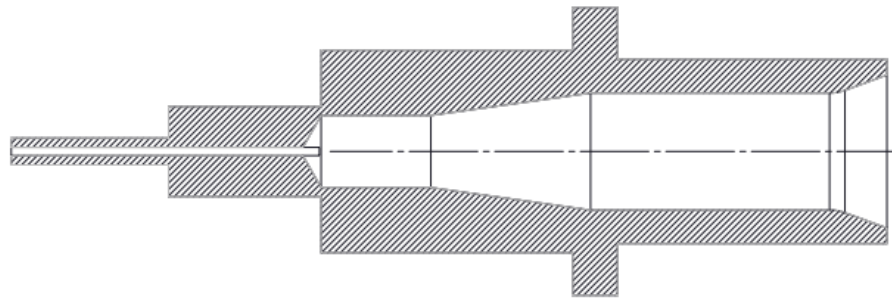
Основним аргументом є порівняння картини інтенсивності ерозії до та після зміни вхідних даних розмірності абразивних частинок (рис.3.54-3.55), про що свідчить і графік концентрації ерозії вздовж вертикальної утворюючої лінії (рис.3.56) з якого видно, що пікові значення зони II зростають в перспективі зрівнятися з максимальними значеннями I та III зони вздовж лінії обробки. Отримані результати моделювання свідчать про те що гіпотеза більшою мірою підтверджена.

3.7 Вплив форми внутрішнього каналу сопла на параметри обробки та шорсткість поверхні лопаток

Вивчаючи характер розподілу концентрації ерозії в I-й та III-й зоні (рис.3.36) логічно буде зробити припущення, що в момент обробки в середині каналу сопла виникають внутрішні фізичні сили, які обумовлені особливістю конструкції сопла, змушуючи розділяти струмінь абразивних часток на два різних струмені кожен з яких притискається до бічних частин каналу сопла. Цим явищем і пояснюється характер картини ерозії (рис.3.36).

3.8 Дослідження впливу форми внутрішнього каналу сопла на параметри обробки та шорсткість поверхні лопаток

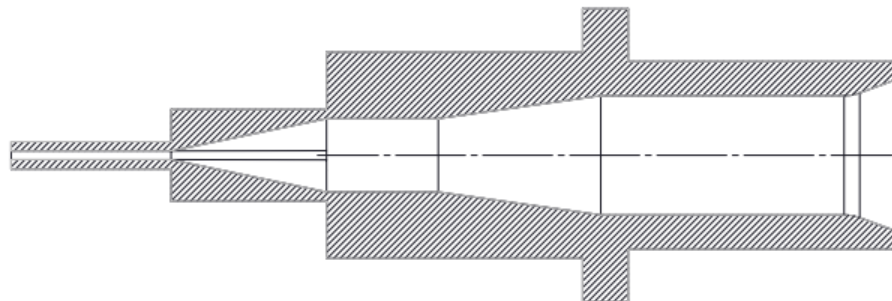
Досліджуючи характер руху абразивних частинок в повітряному потокові через канал сопла в зоні переходу частинок з круглого перетину в прямокутний (рис.3.57) Бажаючи поліпшити конструкцію каналу сопла, були внесені конструктивні зміни, що повинні полегшити проходження потоку абразивних часток в зоні переходу з одного перетину в інший та запобігти розділенню потоку на дві частини.



Варіант 1

Рис.3.57 – Початковий варіант конструкції внутрішнього каналу сопла.

Зона переходу каналу сопла з круглого перетину в прямокутний має вигляд конусу з кутом між сторонами що становить 120° , сутність конструктивних змін полягала в тому щоб це показник зменшити до 24° (рис.3.58), даний параметр з міркувань автора повинен покращити прохідність абразивних часток через канал сопла та ефективно вплинути на формування рівномірного абразивного потоку.



Варіант 2

Рис.3.58 – Варіант конструкції внутрішнього каналу сопла після внесення конструктивних змін.

Для перевірки ефективності сопла нової конструкції було проведене контрольне моделювання абразивно-струменевої обробки каналу лопаток закритого типу за такими параметрами: $\alpha=26^\circ$, відстань між кромкою лопатки та соплом становила $S=0$ мм, розмір абразивних часток – 100 мкм (рис.3.59).

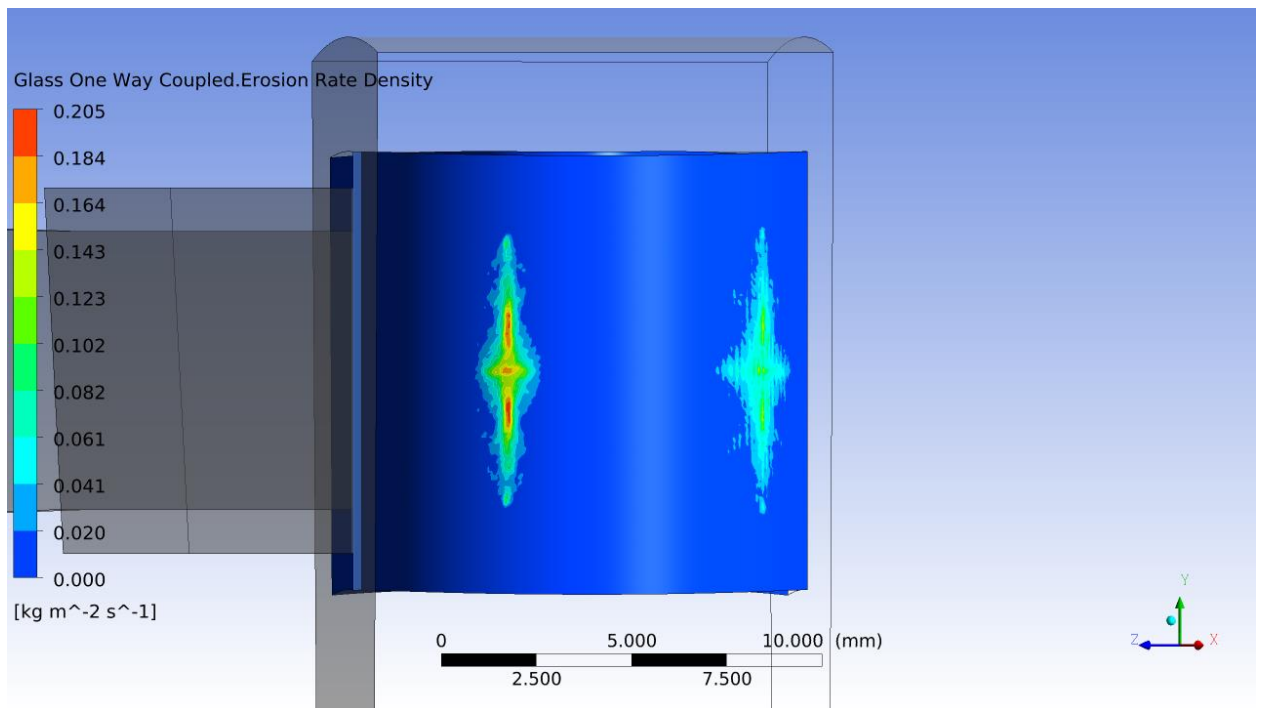


Рис.3.59 – Інтенсивність ерозії вздовж вертикальної утворюючої лінії при контрольному моделюванні обробки (варіант 5.1 $\alpha=26^\circ$, $S=0$, зернистість абразивних часток 100 мкм).

Дані контрольного моделювання показують, що картина інтенсивності ерозії кардинально відрізняється від попередніх результатів, а саме зменшення площі зони обробки в декілька разів, крім цього були виявлені лінійні зони з високою концентрацією ерозії, чого виходячи з концепції не повинно виникнути при однаковій зернистості абразивних часток в 100 мкм.

Висновки за розділом 3

Раціональний підхід до вибору алгоритму та розрахункової моделі дослідження в програмному комплексі ANSYS CFX, дозволило вивчити процеси, що відбуваються при абразивно-струменевому методі обробки лопаток турбін закритого типу. Моделювання обробки з різним розташуванням сопла відносно осі каналу лопаток дозволило виявити не тільки найбільш ефективні параметри розміщення сопла відносно лопаток, але

і дослідити динаміку зміни розмірів зони обробки відносно вертикальної та горизонтальної утворюючої лінії в залежності від просторового положення сопла. В процесі вивчення та аналізу даних було вирішено ряд завдань:

- визначено метод моделювання що базується на основі системи рівнянь Нав'є-Стокса та обрано конкретну модель турбулентності, а саме k_ε ;

- виконано моделювання абразивно-струменевої обробки лопаток турбін закритого типу (з бандажем) згідно параметрів реальних умов та визначення, на основі даних, найбільш ефективних режимів обробки для отримання необхідних параметрів обробленої поверхні лопатки;

- виявлено та досліджено явище «нерівномірної ерозії» абразивних частинок оброблюваної поверхні, що спричиняє нерівномірну шорсткість та рельєф поверхні по всій зоні обробки, та знайдені шляхи усунення даного явища;

- за результатами аналізу даних моделювання обрано найбільш ефективний режим обробки, а саме варіант 4.1 при якому канал сопла розташований відносно каналу лопатки під кутом $\alpha=26^\circ$ та на відстані від кромки лопатки $S=6$ мм, при якому протяжність зони обробки, за один установ, має найбільше числове значення з поміж інших 16-ти варіантів, при, що складає 71% площі внутрішньої поверхні лопатки;

- досліджено взаємозв'язок між «нерівномірністю ерозії» та різнозернистістю абразивного матеріалу і формою внутрішнього каналу сопла, та їх впливом на кінцеві показники обробки.

4 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1 Вимірювання шорсткості поверхонь закритих лопаток після 3D-друку

З метою спрощення візуального аналізу шорсткості та якості робочих поверхонь закритих лопаток був виконаний розріз досліджуваного зразка (див. рис.4.1 та 4.2) на електроерозійному верстаті Mitsubishi MV1200R Connect (рис 4.3).

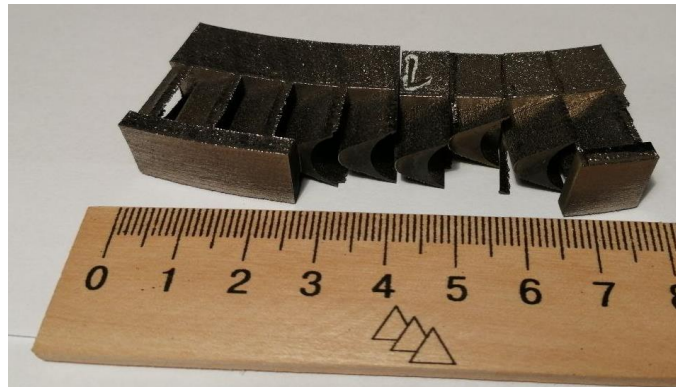


Рис.4.1 – Візуальна оцінка якості поверхні зразка лопаток після розрізання.

При візуальній оцінці спостерігається нерівномірність величини шорсткості, найбільше значення якої зосереджено на похилій та нависаючій поверхнях лопатки. Дана відмінність обумовлена особливістю методу в процесі друку деталей з похилими та нависаючими елементами (рис.4.2), а саме бічні сторони жолоба лопатки.

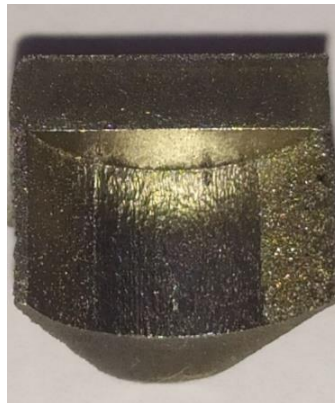


Рис. 4.2 – Загальний вигляд закритої робочої поверхні лопатки.



Рис.4.3 – Верстат Mitsubishi MV1200R Connect.

Враховуючи форму профіля робочої поверхні та нерівномірний мікрорельєф, вимірювання геометричних мікропараметрів поверхні спеціалізованими приладами типу профілометра неможливе не тільки через високу шорсткість але й через характер отримання такої поверхні (не механічним методом), що може спричинити до пошкодження та виходу з ладу самого приладу. Найбільш ефективним способом вимірювання є тіньовий метод що реалізується за допомогою подвійного мікроскопа Линника МИС-11 та застосування методу «відбитків». При вимірюванні шорсткості у важкодоступних місцях виникає ряд труднощів.

Тому в цехових умовах дуже часто якість поверхні оцінюється візуальним порівнянням із зразками чистоти (рис.4.4).



Рис.4.4 – Еталонні зразки шорсткості поверхні (точіння).

Такий метод недостатньо об'єктивний і часто призводить до помилкової оцінки класу чистоти поверхні, особливо у випадку коли поверхня отримана немеханічним методом. У тих випадках коли немає можливості провести безпосереднє вимірювання ділянки поверхні деталі, широко використовується метод зліпків. Суть методу полягає в тому що з вимірювальної поверхні знімається «відбиток» шорсткості якого вимірюється на оптичних або щупових приладах, в залежності від характеру поверхні. В якості матеріалу використовується масляно-гутаперчева паста багаторазового використання, робота з якою суворо регламентується виробничою інструкцією.

В результаті проведення ряду маніпуляцій були отримані «відбитки» (рис.4.5) робочої поверхні лопатки (жолоба) та її шорсткості.



Рис.4.5 – «Відбиток» профілю жолоба лопатки.

Однак при спробах вимірювання було виявлено що якість і форма «відбитка» не дозволяє якісно оцінити шорсткість.

Причиною цьому є нерівномірне відбиття шорсткості на відбитку (найкраще проявлений мікрорельєф в зоні 1 див. рис.4.6-4.7)

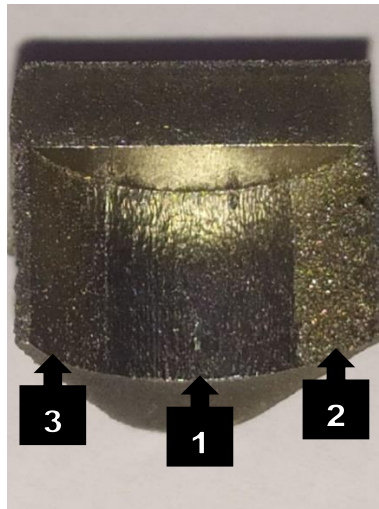


Рис.4.6 – Зони ріношорсткості поверхні жолоба лопатки.

Зона 1 підходить для вимірювання шорсткості на мікроскопі МІС-11 оскільки є мінімальна площа для фокусування променя. Враховуючи розташування зони 2 і 3 (рис.4.6) вимірювання складно реалізувати, оскільки для фокусування променя мікроскопа необхідне горизонтальне розташування вимірювальних поверхонь відносно робочого столу, а також враховуючи залежність властивостей пасти від температури та часового проміжку реалізувати даний підхід дуже складно.

Також варто відзначити важливий нюанс при підготовці «відбитка» крайні зони 2 і 3 в момент від'єднання від досліджуваної деталі зазнають деформації і можливі пошкодження, що певною мірою залежить від людського фактору. Тому було прийнято рішення розділення зон вимірювання розрізавши лопатку на фрагменти (див. рис.4.7 та 4.8) фотофіксація яких проводилась за допомогою мікроскопа ВМІ-1 (рис.4.9) при 10-ти кратному збільшенні.

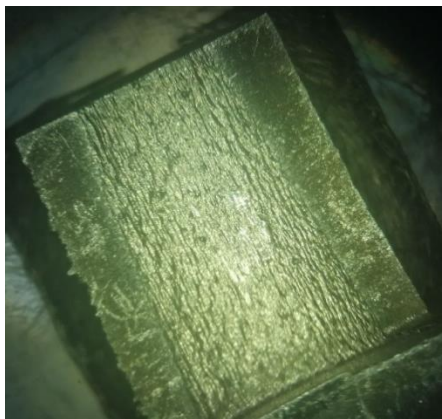


Рис.4.7 – Нижня частина жолоба лопатки (зона 1).

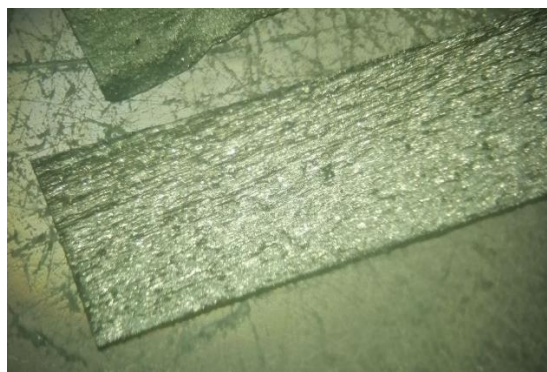


Рис.4.8 – Бічна поверхня (зона 2).



Рис.4.9 – Мікроскоп ВМІ-1.

В дослідженні мікроскоп використовувався для візуальної оцінки та фотофіксації шорсткості як поверхонь лопаток зі зразками-свідками, так і зерен абразивних матеріалів.

Даний підхід дозволив більш якісно провести вимірювання та детальний візуальний аналіз характеру мікрорельєфу кожної із зон лопатки. В результаті проведених вимірювань були отримані дані, що дозволяють зробити розрахунок та визначити величину шорсткості (рис.4.10).

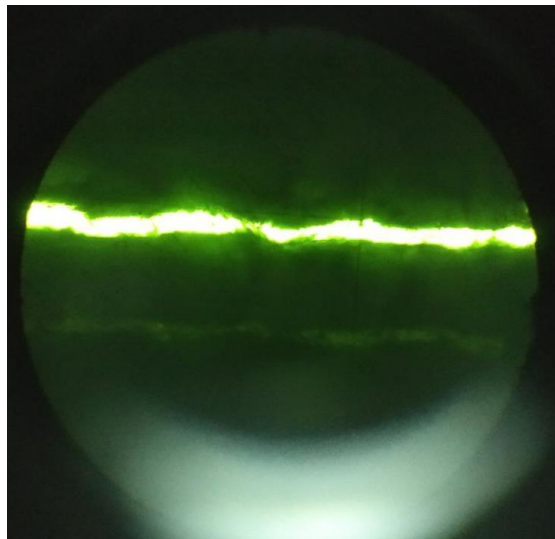


Рис.4.10 – Зображення шорсткості в подвійний мікроскоп МПС-11.

Нижче наведені розрахунки шорсткості зони 1 і 2.

Область дослідження - зона 2 (рис.4.6 та 4.8).

Апертура 0,3 коефіцієнт $k=0,47$

$H_1=160$ мкм;

$H_6=90$ мкм;

$H_2=110$ мкм;

$H_7=95$ мкм;

$H_3=125$ мкм;

$H_8=120$ мкм;

$H_4=100$ мкм;

$H_9=90$ мкм;

$H_5=110$ мкм;

$H_{10}=90$ мкм;

$$H_{cp} = \frac{160 + 110 + 125 + 100 + 110 + 90 + 95 + 120 + 90 + 90}{10} = 109$$

мкм (2.1)

$$R_z = H_{cp} \cdot k \quad (2.2)$$

$$R_z = 109 \cdot 0.47 = 51.23$$

Перерахунок параметру R_z в R_a за формулою

$$R_a = \frac{R_z}{4} \text{ для грубих поверхонь}$$

$$R_a = \frac{R_z}{5} \text{ для більш чистих поверхонь}$$

$$R_a = \frac{51.23}{4} = 12.8075$$

Даний результат згідно таблиці відповідає значенню 3-го класу шорсткості.

Область дослідження - зона 1 (рис.4.6 та 4.7).

Апертура 0,3 коефіцієнт $k=0.47$

$$H_1 = 45 \text{ мкм};$$

$$H_6 = 40 \text{ мкм};$$

$$H_2 = 75 \text{ мкм};$$

$$H_7 = 50 \text{ мкм};$$

$$H_3 = 45 \text{ мкм};$$

$$H_8 = 30 \text{ мкм};$$

$$H_4 = 80 \text{ мкм};$$

$$H_9 = 35 \text{ мкм};$$

$$H_5 = 30 \text{ мкм};$$

$$H_{10} = 35 \text{ мкм};$$

$$H_{cp} = \frac{45 + 75 + 45 + 80 + 30 + 40 + 50 + 30 + 35 + 35}{10} = 46.5 \text{ мкм}$$

$$R_z = H_{cp} \cdot k$$

$$R_z = 46.5 \cdot 0.47 = 21.855$$

Перерахунок параметру R_z в R_a за формулою

$$R_a = \frac{R_z}{4} \text{ для грубих поверхонь}$$

$$R_a = \frac{R_z}{5} \text{ для більш чистих поверхонь}$$

$$R_a = \frac{21.855}{4} = 5.4637$$

Отримане значення, згідно таблиці відповідає 4-го класу шорсткості.

4.2 Методика відбору абразивних матеріалів для обробки

Відбір абразивних матеріалів, одним з критеріїв якого є низька вартість та доступність, проводився в процесі обробки на плоских зразках-свідках. Зразки-

свідки виготовлені з ідентичного матеріалу що і сегменти лопаток турбіни заритого типу, а саме Inconel 718 з послідуною термообробкою, що включає загартування та старіння для забезпечення необхідних механічних властивостей.

Попередньо було проведено вимірювання шорсткості зразків (див.рис.4.11) оптичним методом за допомогою мікроскопа Линника, нижче наведено розрахунок.



Рис.4.11 – Загальний вигляд якості поверхні зразків-свідків отриманих друком.

Апертура 0,13 коефіцієнт $k=0,85$

$H_1=37$ мкм;

$H_6=36$ мкм;

$H_2=45$ мкм;

$H_7=37$ мкм;

$H_3=42$ мкм;

$H_8=50$ мкм;

$H_4=14$ мкм;

$H_9=50$ мкм;

$H_5=39$ мкм;

$H_{10}=46$ мкм;

$$H_{cp} = \frac{37+45+42+14+39+36+37+50+50+46}{10} = 39,6 \text{ мкм}$$

$$R_z = H_{cp} \cdot k$$

$$R_z = 39,6 \cdot 0,85 = 33,66$$

Перерахунок параметру R_z в R_a за формулою

$$R_a = \frac{R_z}{4} \text{ для грубих поверхонь}$$

$$R_a = \frac{R_z}{5} \text{ для більш чистих поверхонь}$$

$$R_a = \frac{33,66}{4} = 8,415$$

Отримане значення відповідає 4-го класу шорсткості.

Перевірка вимірювань проводимо завдяки заміні апертури на 0,3

Апертура 0,3 коефіцієнт $k=0,47$

$H_1=50$ мкм;

$H_6=60$ мкм;

$H_2=65$ мкм;

$H_7=65$ мкм;

$H_3=75$ мкм;

$H_8=80$ мкм;

$H_4=55$ мкм;

$H_9=80$ мкм;

$H_5=40$ мкм;

$H_{10}=75$ мкм;

$$H_{cp} = \frac{50 + 65 + 75 + 55 + 40 + 60 + 65 + 80 + 80 + 75}{10} = 64,5$$

мкм

$$R_z = H_{cp} \cdot k$$

$$R_z = 64,5 \cdot 0,47 = 30,315$$

Перерахунок параметру R_z в R_a за формулою

$$R_a = \frac{R_z}{4} \text{ для грубих поверхонь}$$

$$R_a = \frac{R_z}{5} \text{ для більш чистих поверхонь}$$

$$R_a = \frac{30,315}{4} = 7,578$$

Даний результат згідно таблиці відповідає значенню 4-го класу шорсткості.

4.3 Обробка зразків

Перед початком обробки плоскі зразки-свідки було поділено на чотири зони розміром 20×40 мм (рис.4.12), дане рішення прийнято виходячи з раціонального використання площі зразка. Для локалізації зони обробки конкретним абразивним матеріалом та уникнення пошкодження сусідніх зон були використані технологічні притискачі.

4.3.1 Обробка скляними кульками

В якості першого абразиву були використані скляні кульки, які застосовувались при числовому моделюванні методом кінцевих елементів в програмному комплексі ANSYS CFX.

Режими обробки та просторове положення сопла та поверхні зразка визначено, згідно моделювання, найбільш продуктивним та результативними режимами обробки, а саме положення сопла відносно по верхні зразка під кутом $\alpha = 26^\circ$, відстань від сопла до кромки лопатки $S = 6$ мм, тиск повітря - 9 атм, зернистість абразивного матеріалу 50-150 мкм. Як видно зі зразка (див.рис 4.12 і 4.13) для цього абразиву була виділена зона 1.

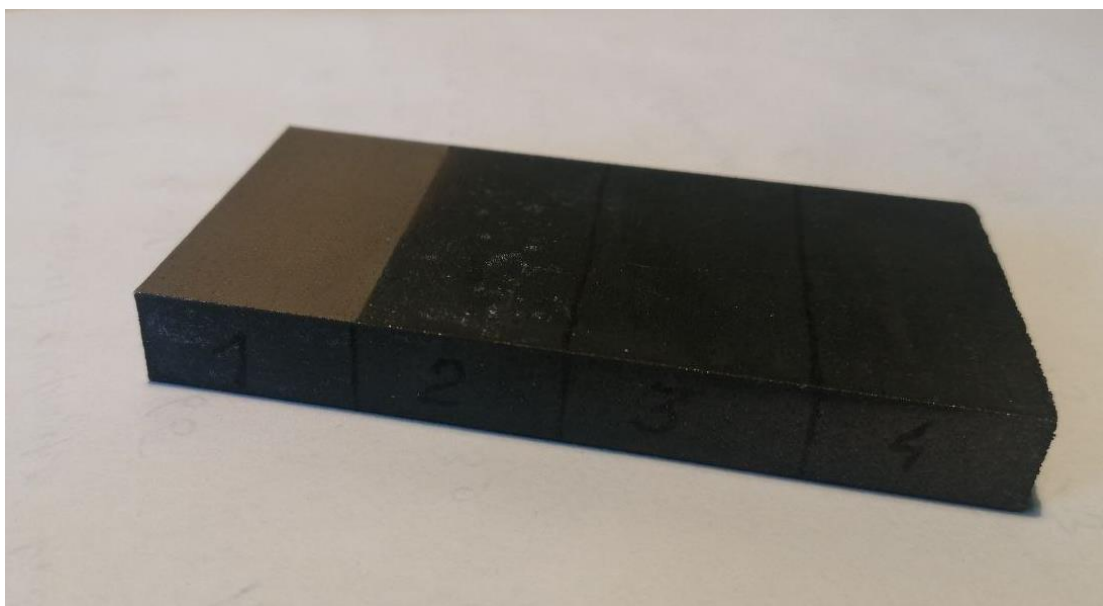


Рис.4.12 – Розподіл досліджуваної поверхні зразка.

При вимірюваннях використовувалась апертура 0,3 з коефіцієнтом 0,47. Результатом вимірювання стали параметри п'яти найбільших мікровиступів та п'яти найбільших мікровпадин, що є ключовими значеннями для виконання розрахунку.

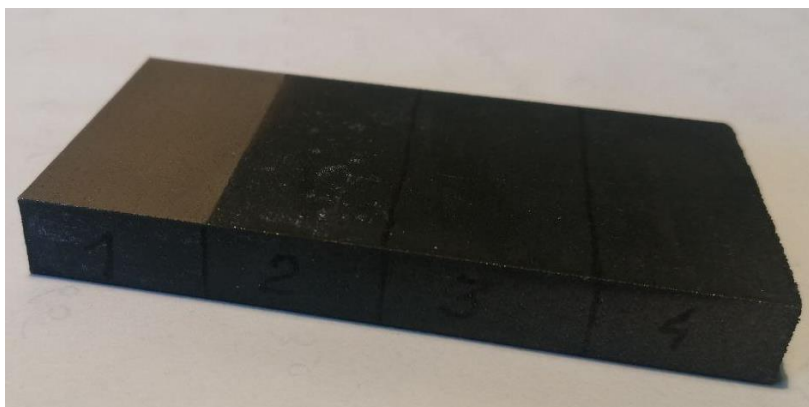


Рис.4.13 – Зона 1, дослідження поверхні обробленої скляними кульками.

Розрахунок наведений нижче.

Зразок №1

Апертура 0,3 коефіцієнт $k=0,47$

$H_1=38$ мкм;

$H_6=34$ мкм;

$H_2=24$ мкм;

$H_7=39$ мкм;

$H_3=34$ мкм;

$H_8=34$ мкм;

$H_4=35$ мкм;

$H_9=32$ мкм;

$H_5=38$ мкм;

$H_{10}=53$ мкм;

$$H_{cp} = \frac{38 + 24 + 34 + 35 + 38 + 34 + 39 + 34 + 32 + 53}{10} = 36,1 \text{ мкм}$$

$$R_z = H_{cp} \cdot k$$

$$R_z = 36,1 \cdot 0,47 = 16,967$$

Перерахунок параметру R_z в R_a за формулою

$$R_a = \frac{R_z}{4} \text{ для грубих поверхонь}$$

$$R_a = \frac{R_z}{5} \text{ для більш чистих поверхонь}$$

$$R_a = \frac{16,967}{4} = 4,2417$$

Даний результат згідно таблиці відповідає значенню 5-го класу шорсткості.

Перевірка вимірювань проводимо завдяки заміні апертури на 0,37

Апертура 0,37 коефіцієнт $k=0,28$

$H_1=25$ мкм;

$H_6=50$ мкм;

$H_2=60$ мкм;

$H_7=50$ мкм;

$H_3=30$ мкм;

$H_8=55$ мкм;

$H_4=65$ мкм;

$H_9=39$ мкм;

$H_5=45$ мкм;

$H_{10}=28$ мкм;

$$H_{cp} = \frac{25 + 60 + 30 + 65 + 45 + 50 + 50 + 55 + 39 + 28}{10} = 44,7 \text{ мкм}$$

$$R_z = H_{cp} \cdot k$$

$$R_z = 44,7 \cdot 0,28 = 12,51$$

Перерахунок параметру R_z в R_a за формулою

$$R_a = \frac{R_z}{4} \text{ для грубих поверхонь}$$

$$R_a = \frac{R_z}{5} \text{ для більш чистих поверхонь}$$

$$R_a = \frac{12,51}{4} = 3,129$$

Даний результат згідно таблиці відповідає значенню 5-го класу шорсткості.

4.3.2 Обробка зразка електрокорундом нормальним 14А



Рис.4.14 – Зона 2, дослідження поверхні обробленої електрокорундом нормальним 14А.

Параметри обробки: положення сопла відносно по верхні зразка під кутом $\alpha = 26^\circ$, відстань від сопла до кромки лопатки $S=6$ мм, тиск повітря - 9 атм, зернистість абразивного матеріалу 30-60 мкм.

Розрахунок наведений нижче.

Зразок №2

Апертура 0,37 коефіцієнт $k=0,28$

$H_1=12$ мкм;

$H_6=20$ мкм;

$H_2=12$ мкм;

$H_7=16$ мкм;

$H_3=19$ мкм;

$H_8=18$ мкм;

$H_4=15$ мкм;

$H_9=13$ мкм;

$H_5=11$ мкм;

$H_{10}=18$ мкм;

$$H_{cp} = \frac{12 + 12 + 19 + 15 + 11 + 20 + 16 + 18 + 13 + 18}{10} = 15,4 \text{ мкм}$$

$$R_z = H_{cp} \cdot k$$

$$R_z = 15,4 \cdot 0,28 = 4,312$$

Перерахунок параметру R_z в R_a за формулою

$$R_a = \frac{R_z}{4} \text{ для грубих поверхонь}$$

$$R_a = \frac{R_z}{5} \text{ для більш чистих поверхонь}$$

$$R_a = \frac{4,312}{5} = 0,8624$$

Даний результат згідно таблиці відповідає значенню 7-го класу шорсткості.

4.3.3 Обробка зразка горіховою крихтою

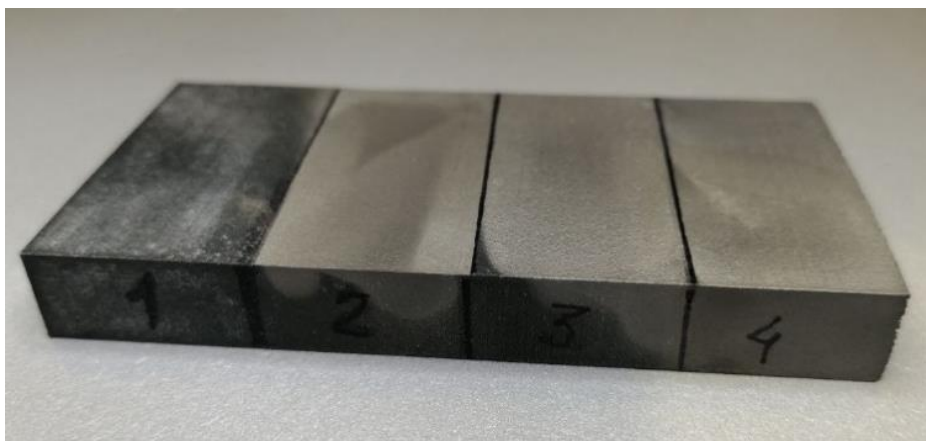


Рис.4.15 – Зона 3, дослідження поверхні обробки горіховою скорлупою.

Параметри обробки: положення сопла відносно по верхні зразка під кутом $\alpha = 26^\circ$, відстань від сопла до кромки лопатки $S = 6$ мм, тиск повітря - 9 атм, зернистість абразивного матеріалу 0,5-1 мм.

Розрахунок наведений нижче.

Зразок № 3

Апертура 0,37 коефіцієнт $k = 0,28$

$H_1 = 60$ мкм;

$H_6 = 50$ мкм;

$H_2 = 45$ мкм;

$H_7 = 53$ мкм;

$H_3 = 56$ мкм;

$H_8 = 47$ мкм;

$H_4 = 70$ мкм;

$H_9 = 20$ мкм;

$H_5 = 35$ мкм;

$H_{10} = 55$ мкм;

$$H_{cp} = \frac{60 + 45 + 56 + 70 + 35 + 50 + 53 + 47 + 20 + 55}{10} = 49,1 \text{ мкм}$$

$$R_z = H_{cp} \cdot k$$

$$R_z = 49,1 \cdot 0,28 = 13,748$$

Перерахунок параметру R_z в R_a за формулою

$$R_a = \frac{R_z}{4} \text{ для грубих поверхонь}$$

$$R_a = \frac{R_z}{5} \text{ для більш чистих поверхонь}$$

$$R_a = \frac{13,748}{4} = 3,437$$

Даний результат згідно таблиці відповідає значенню 5-го класу шорсткості.

4.3.4 Обробка зразка маршалітом

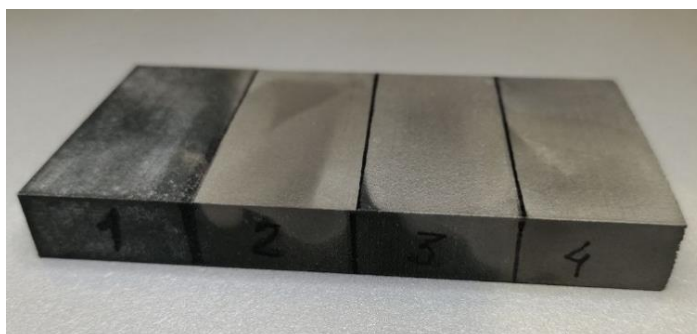


Рис.4.16 – Зона 4, дослідження поверхні обробки маршалітом.

Параметри обробки: положення сопла відносно по верхні зразка під кутом $\alpha = 26^\circ$, відстань від сопла до кромки лопатки $S = 6$ мм, тиск повітря - 9 атм, зернистість абразивного матеріалу 30-50 мкм.

Розрахунок наведений нижче.

Зразок №4

Апертура 0,5 коефіцієнт $k = 0,141$

$H_1 = 25$ мкм;

$H_6 = 20$ мкм;

$H_2 = 20$ мкм;

$H_7 = 17$ мкм;

$H_3 = 30$ мкм;

$H_8 = 27$ мкм;

$H_4 = 31$ мкм;

$H_9 = 32$ мкм;

$H_5 = 30$ мкм;

$H_{10} = 22$ мкм

$$H_{cp} = \frac{25 + 20 + 30 + 31 + 30 + 20 + 17 + 27 + 32 + 22}{10} = 25,4 \text{ мкм}$$

$$R_z = H_{cp} \cdot k$$

$$R_z = 25,4 \cdot 0,141 = 3,5814$$

Перерахунок параметру R_z в R_a за формулою

$$R_a = \frac{R_z}{4} \text{ для грубих поверхонь}$$

$$R_a = \frac{R_z}{5} \text{ для більш чистих поверхонь}$$

$$R_a = \frac{3,5814}{5} = 0,71628$$

Даний результат згідно таблиці відповідає значенню 7-го класу шорсткості.

4.4 Усунення конструктивного недоліку обладнання

В процесі відбору абразивного матеріалу був виявлений конструктивний недолік, автор зіткнувся з проблемою не контрольованої подачі абразивного матеріалу а в деякі моменти її повної відсутності. Вивчивши елементи обладнання було виявлено що до її складу входить шибєрний кран (див.рис.4.17) завданням якого є регулювання кількості абразивного матеріалу під час обробки.



Рис.4.17 – Апарат абразивно-струменевий :1- бак, 2- кран шиберний.

За умов даної конструкції обладнання, а саме ємності для абразивного матеріалу (див.рис.4.17) обробка можлива при заповненні баку не менше 25% від загального об'єму і при цьому залишається близько 10-15% від 25% всього мінімального об'єму абразиву. Іншими словами забезпечити рівномірну подачу і при цьому використовувати весь об'єм абразивних матеріалів, що було б економічно доцільним, не можливо.

При аналізі конструкції ємності для абразиву було виявлено що радіусна форма днища не дозволяє забезпечити рівномірне просипання абразивних матеріалів не залежно від їх фракції. В даному випадку нижнє днище ємності доцільніше було б виконувати конусним, однак модернізація обладнання досить тривалий і клопіткий процес. Для вирішення цього завдання автором було прийнято рішення розробити оснащення яке дозволяє використовувати весь об'єм абразивного матеріалу, з можливістю регулювання подачі, без зміни конструкції самої ємності. В якості оснащення виготовлена засипна шахта (див.рис.4.18).

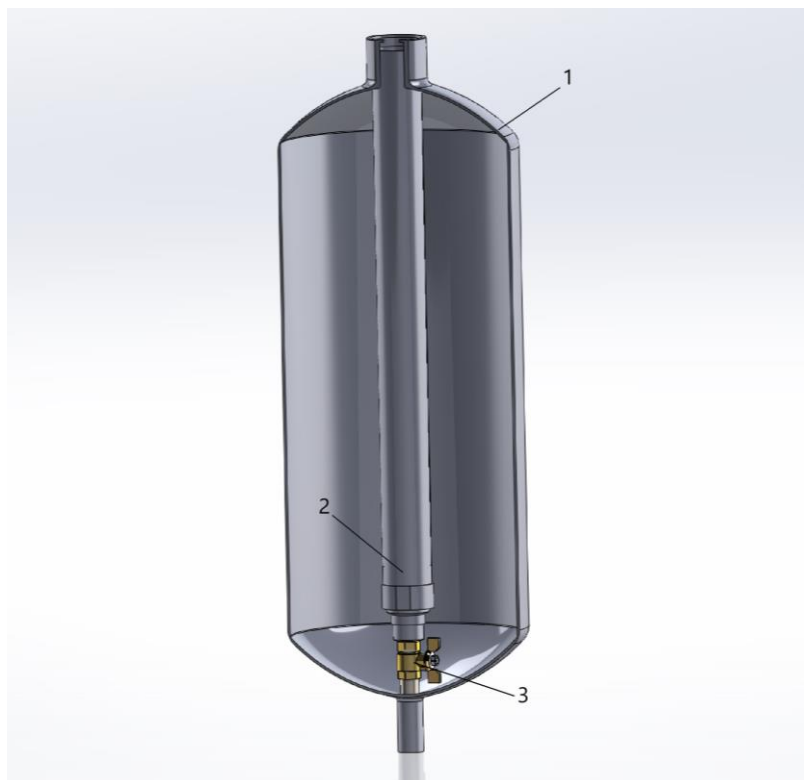


Рис.4.18 – Розміщення засипної шахти в середині ємності для абразиву: 1- апарат абразивно-струменевий, 2- засипна шахта, 3-додатковий шибєрний кран.

Конструкція засипної шахти 2 дозволяє її швидко та зручно встановити в середині ємності для абразиву, при цьому на вентилі шахти 3 нанесена шкала, що дозволяє налаштувати подачу абразиву для конкретних умов обробки, по своїй суті виконуючи функції додаткового шибєрного крана.

Простота конструкції, швидкість та зручність встановлення та дешевизна виготовлення є основними перевагами даного оснащення та дозволяє виконувати обробку за конкретно визначеними режимами.

4.5 Обробка міжлопаткового каналу сегмента лопаток турбіни закритого типу

Завдяки створеній методиці дослідження, що описана в другому розділі, автором було проведено дослідження на основі чисельного моделювання методом кінцевих елементів процесу абразивно-струменевої обробки на зразках лопаток. Згідно результатів дослідження було обрано найбільш ефективний варіант, при

якому згідно даних, можливо провести обробку з максимальною площею обробки та рівномірним рівнем ерозії вздовж зони обробки. Найбільш ефективним варіантом обробки, згідно результатів дослідження є варіант 4.1, що передбачає розташування сопла відносно бічної частини сегменту лопаток повинен становити $\alpha=26^\circ$ а відстань від сопла до кромки лопатки $S=6$ мм. Виконавши експериментальний відбір абразивних матеріалів та провівши розрахунок середніх величин шорсткості, було обрано декілька зразків:

-зразок № 2, шорсткість на зразках-свідках – Ra 0.86;

-зразок № 4, шорсткість на зразках-свідках – Ra 0.716.

Враховуючи показники шорсткості, що забезпечили дані показники шорсткості на плоских зразках-свідках, вони будуть використані при обробці сегментів лопаток турбіни.

4.6 Підготовка до абразивно-струменевої обробки

Перед проведенням обробки необхідно, щоб абразивні матеріали обох зразків зберігалися в однакових умовах а саме температура повітря від $19^\circ\ldots 25^\circ\text{C}$ та вологості не вище 50%, задля уникнення налипання та уникнення утворення грудок при обробці. Перед початком роботи необхідно перевірити справність обладнання, цілісність повітряних магістралей та надійність їх кріплення, обладнання повинно очищене від залишків абразивних матеріалів, особливо зона повітряної фільтрації, від попереднього використання. Необхідною умовою є наявність в комплектації обладнання «уловлювачів» вологи, що забезпечують потів сухого повітря з ресивера, наявність вологи при обробці ускладнює проходження абразивних часток дрібної фракції (30...60 мкм) через сопла з мінімальним розміром каналу сопла (0,9...3 мм) внаслідок чого відбувається налипання та забивання абразивного сопла.

4.7 Проведення обробки

Не дивлячись на результати експериментального відбору, що проводилися на плоских зразках-свідках при якому було обрано два зразки абразивних матеріали з найкращими поміж інших зразків, автором прийнято рішення розширити номенклатуру зразків при обробці сегментів лопаток, замість двох обраних зразків було вирішено застосувати чотири. Причиною такого рішення є різниця характеру контакту абразивних частинок в процесі обробки плоскою поверхнею зразків-свідків та сегментів лопаток. Згідно плану експерименту, обробку необхідно провести за таких параметрів:

- кут нахилу сопла відносно бічної сторони сегмента лопатки повинен бути $\alpha=26^\circ$;
- відстань від кромки лопатки до каналу сопла $S=6$;
- номінальний тиск 8 бар;
- тривалість обробки – 10 секунд;
- діапазон температур від 19°C до 25°C .

Дослідний зразок встановлено на технологічне оснащення та виконано базування сопла відносно сегменту лопаток згідно заданих параметрів (рис.4.19)



Рис.4.19 – Сегмент лопаток перед обробкою.

За планом експерименту лопатки оброблятимуться такими абразивними матеріалами:

- зразок №1 N_2CO_3 фракція - 100 мкм;
- зразок №2 електрокорунд 14а фракція - 60 мкм;
- зразок №3 горіхова крихта фракція – 0,5...1 мм;
- зразок №4 скляні кульки – 50-150 мкм.

4.8 Визначення ефективних режимів обробки

На початкових етапах дослідження виконували спроби обробки деталей отриманих адитивним методом зі сплаву Inconel 718 за допомогою абразиву N_2CO_3 , зразок поверхні даної обробки представлений на рис.4.20. Даний тип обробки ще називають «м'якою» або бластинг.

Для аналізу якості поверхні зразків лопаток було проведено розрізання сегменту лопаток на дротово-вирізному верстаті Mitsubishi MV1200R Connect.

Як видно з рис.4.20 поверхня лопатки має рівномірну матову поверхню, варто також відмітити рівномірне згладжування ліній зон переходу з різним рівнем шорсткості, а саме жолоб лопатки та бічні частини.

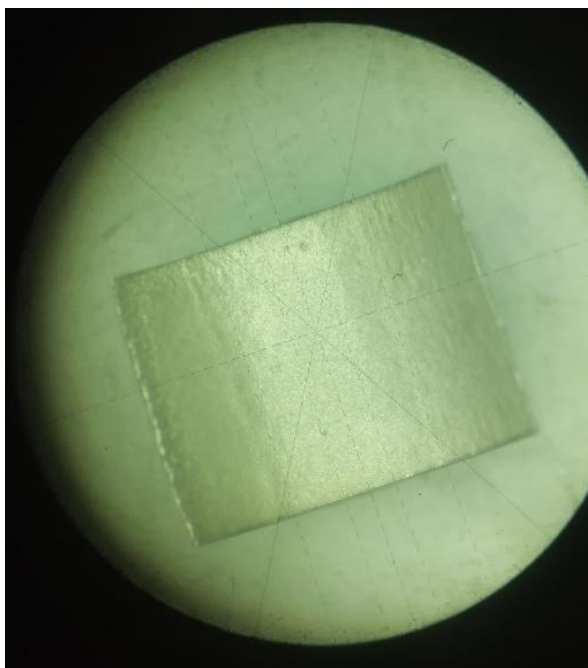


Рис.4.20 – Поверхня лопатки оброблена N_2CO_3

Не дивлячись на доволі позитивний результат при візуальній оцінці, для повної картини обробки необхідно виконати вимірювання шорсткості обробленої поверхні.

Апертура 0,3 коефіцієнт $k=0,47$

$H_1=45$ мкм;

$H_6=40$ мкм;

$H_2=75$ мкм;

$H_7=50$ мкм;

$H_3=45$ мкм;

$H_8=30$ мкм;

$H_4=80$ мкм;

$H_9=35$ мкм;

$H_5=30$ мкм;

$H_{10}=35$ мкм;

$$H_{cp} = \frac{45 + 75 + 45 + 80 + 30 + 40 + 50 + 30 + 35 + 35}{10} = 46,5 \text{ мкм}$$

$$R_z = H_{cp} \cdot k$$

$$R_z = 46,5 \cdot 0,47 = 21,855$$

Перерахунок параметру R_z в R_a за формулою

$$R_a = \frac{R_z}{4} \text{ для грубих поверхонь}$$

$$R_a = \frac{R_z}{5} \text{ для більш чистих поверхонь}$$

$$R_a = \frac{21,855}{4} = 5,4637$$

Результат відповідає значенню 4-го класу шорсткості.

Враховуючи візуальну привабливість обробленої поверхні, рівень шорсткості згідно результатів рівень шорсткості не відповідає 7-класу та необхідному рівні $R_a 0,8$, тому даний абразивний матеріал не підходить для забезпечення необхідної шорсткості лопаток зі сплаву Inconel 718.

Обробка поверхні лопатки електрокорунд 14А (рис.4.21) показали чітко виражене згладжування поверхні а саме бічної частини, де шорсткість значно вище ніж в жолобі що обумовлено особливістю розташування елементів деталі при друкуванні.

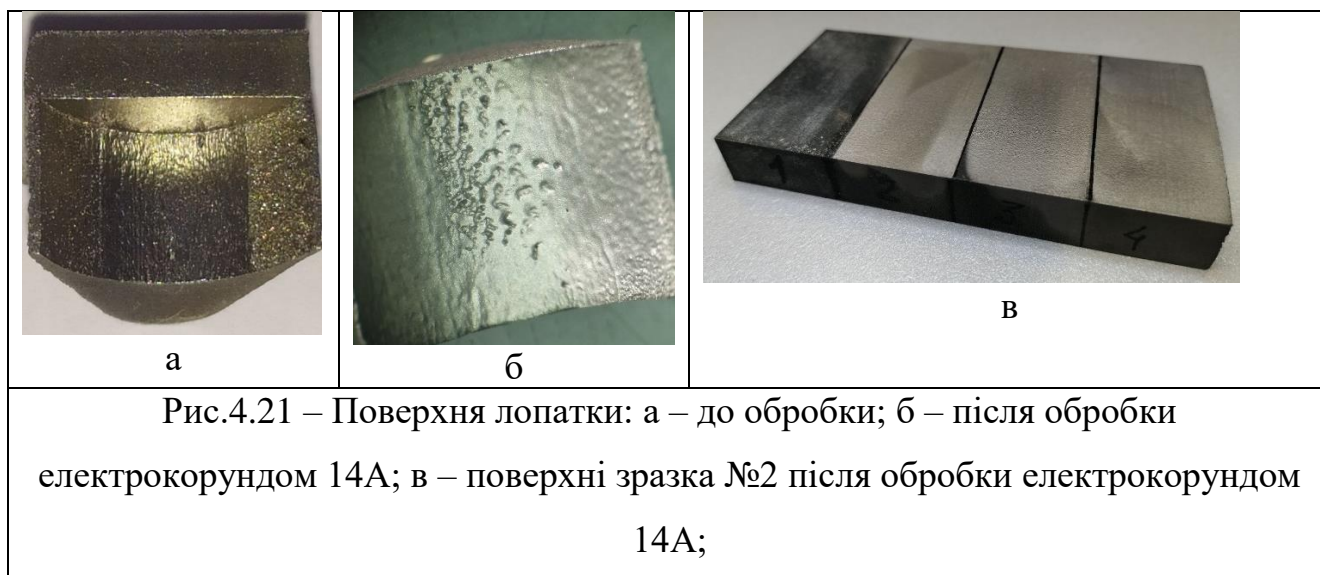
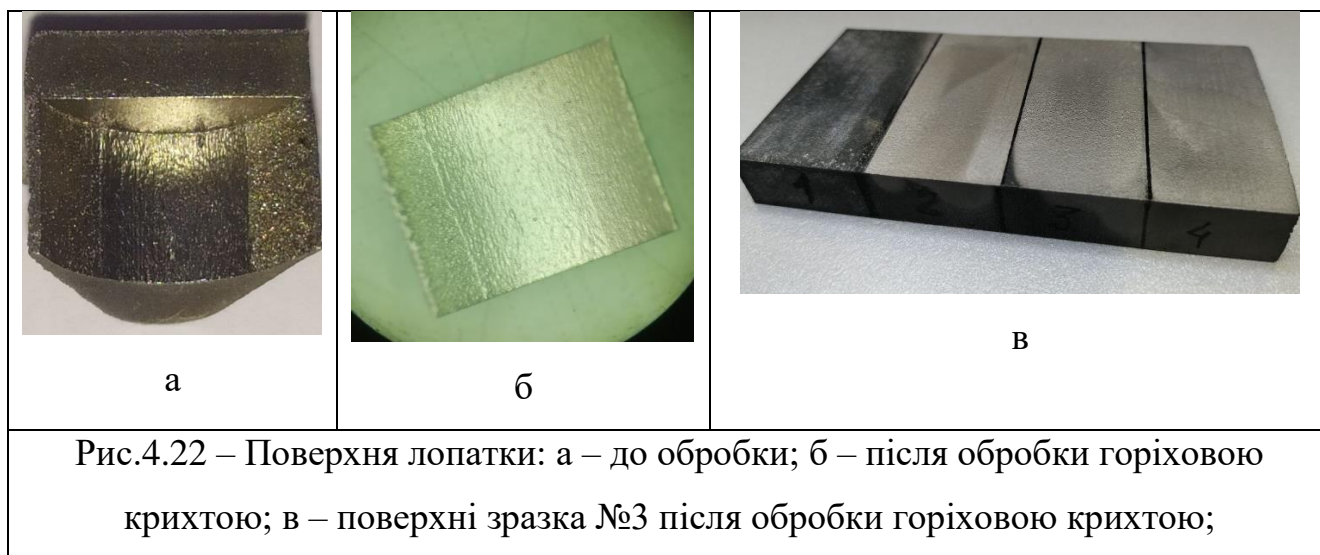


Рис.4.21 – Поверхня лопатки: а – до обробки; б – після обробки електрокорундом 14А; в – поверхні зразка №2 після обробки електрокорундом 14А;

Крім того при обробці зразка проявлялись дефекти – поверхневі мікропустоти, що ускладнили візуальну оцінку, однак якщо візуально порівнювати оброблені поверхні лопатки та поверхні плоского зразка-свідка (рис.4.21в) шорсткість якого становить R_a 0.86, який також оброблявся електрокорундом 14А, видно що поверхні ідентичні, а значить обробка даним видом абразиву дозволить забезпечити шорсткість на рівні 7-го класу.

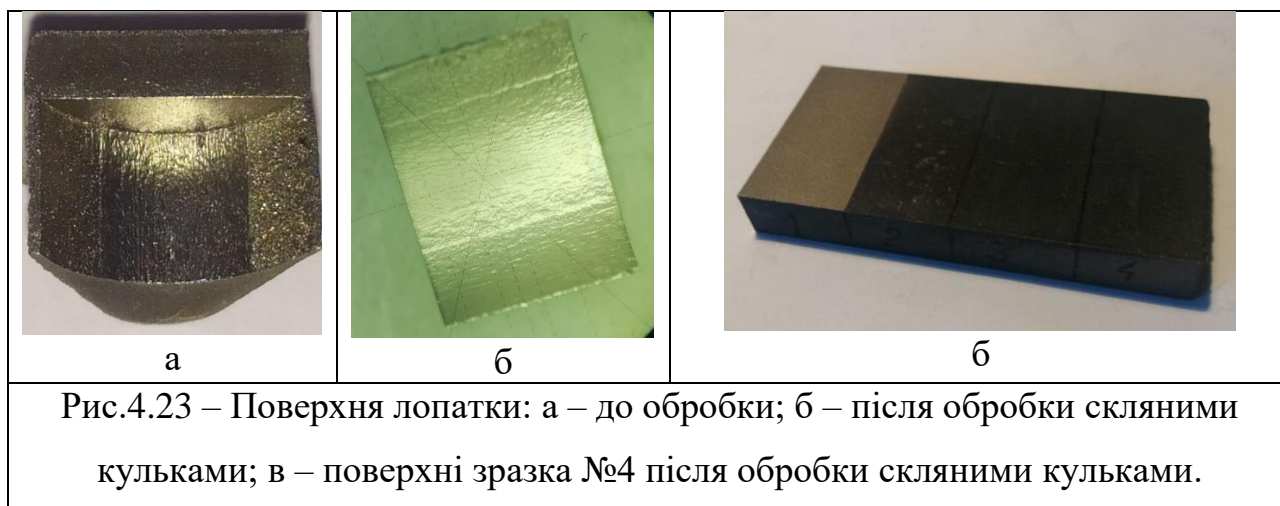
Однак варто відмітити, що даний результат обробки можна забезпечити за умови використання електрокорунду 14А конкретної зернистості, а саме 60 мкм.

Картина обробки лопатки горіховою крихтою дещо відрізняється (рис.4.22) а саме візуально видно незначне зниження шорсткості, в порівнюючи поверхні до та після обробки, але при цьому збереглися лінії зон частин лопатки з різною шорсткістю.



Рельєф поверхні лопатки ідентичний рельєфу отриманому на плоскому зразку-свідку, параметр якого становить $Ra=3.437$ згідно розрахунку, що відповідає 5-му класу шорсткості, а не 7-му. При цьому очікувалося отримати поверхню з меншим показником шорсткості ніж отриманий при обробці N_2CO_3 , виходячи з того, що твердість горіхової крихти за шкалою Мооса має значно більшу твердість ніж N_2CO_3 . Дана особливість вказує на те що твердість абразивного матеріалу не завжди є вирішальним фактором формування шорсткості та рельєфу. Останній зразок лопатки оброблявся скляними кульками (рис.4.23), характеристики даного абразивного матеріалу були покладені в основу моделювання процесу обробки при дослідженні методу кінцевих елементів.

Враховуючи характеристики даного абразивного матеріалу, до початку обробки, прогнозувалося отримати поверхню близьку до поверхні зразка лопатки отриманою після обробки електрокорундом 14А, основною причиною такого прогнозу є те, що твердість скляних кульок на 1-2 одиниці за шкалою Мооса нижче за твердість електрокорунду 14А.



Однак, візуальна оцінка поверхні лопатки після обробки скляними кульками, дозволяє зробити висновок, що даний абразивний матеріал доцільно використовувати для зняття окисної плівки з деталей перед нанесенням покриття, але забезпечити рівень шорсткості на рівні 7-го класу даним абразивним матеріалом неможливо.

Висновки за розділом 4

1. За результатами досліджень зроблено висновок, що з усіх використаних абразивів при обробці лопаток турбін виготовлених адитивним методом зі сплаву Inconel 718 найкраще підходить електрокорунд 14А з розміром зерен 60 мкм. Обраний абразивний матеріал, має відносно невисоку вартість в порівнянні з N_2CO_3 чи скляними кульками, що позитивно впливає на собівартість обробки.

2. Для отримання шорсткості на рівні 5-го класу, наприклад для підготовки поверхонь під металокерамічне покриття, доцільно використовувати горіхову крихту або скляні кульки, за умов належного зберігання, оскільки горіхова крихта має здатність вбирати вологу та змінювати свої властивості при експлуатації, на відміну від скляних кульок, в яких здатність вбирати вологу значно менше виражена.

3. Вирішено завдання доопрацювання конструкції існуючого обладнання без суттєвої її зміни для покращення режимів обробки лопаток турбін закритого типу(з бандажем).

5 РОЗРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МАРШРУТНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ ЛОПАТОК ЗАКРИТОГО ТИПУ

5.1 Рекомендації при розробці технологічного процесу

Розробка технологічного процесу для обробки подібного типу виробів не має універсального набору операцій, що можуть задовольнити всі вироби подібного типу, тому при розробці варто враховувати індивідуальні особливості конкретного виробництва та наявного обладнання. На даному етапі розвитку адитивних технологій не кожна компанія може дозволити собі окрему виробничу ділянку для виготовлення виробів 3D-друком, тому в більшості випадків раціональніше замовляти виготовлення в сторонніх компаній-підрядників. Організація власного адитивного виробництва раціональне як мінімум при дрібносерійному виробництві деталей та їх широкій номенклатурі, при цьому для повноцінного адитивного виробництва виникає необхідність організації ділянки термічної обробки. Нижче будуть наведені автором рекомендації для написання маршрутного технологічного процесу для обробки лопаток закритого типу при наявності власного адитивного виробництва. Більшість технологічних процесів починаються з операції «комплектація», що передбачає отримання заготовки із заготівельної ділянки чи складу напівготової продукції зі зразками-свідками та контроль супровідної документації.

З метою покращення технологічного процесу та скорочення циклу виробництва, можлива передача заготовки безпосередньо з ділянки адитивних технологій чи термічної обробки. При зовнішньому огляді отриманої заготовки необхідно приділяти цілісності форми кромek лопаток, (в залежності від конструкції та умов роботи вони можуть бути радіусними або гострокутними) досить легко пошкодити, наприклад при транспортуванні. Крім того заготовка диска турбіни з лопатками повинна бути якісно очищена від технологічних підтримок та їх залишків, без зовнішніх дефектів, до яких відносяться тріщини, розшарування, усадка матеріалу та викривлення форми.

Щільність матеріалу заготовки та мінімальна пористість забезпечується режимами 3D-друку та наступними режимами термічної обробки. В окремих випадках можливо провести УЗД-контроль на відсутність внутрішніх пустот або рентген контроль. У випадку виготовлення заготовки сторонньою компанією-підрядником, щільність та якість матеріалу заготовки, наявність термічної обробки повинен гарантувати виробник з вказанням даної інформації в супровідній документації. Необхідною умовою також є наявність технологічного припуску на механічну обробку, за винятком робочих поверхонь лопаток. Зазвичай при використанні заготовок дисків турбін з лопатками, отриманих 3D-друком, кромки лопаток виступають в ролі базової лінії при розробці конструкторської та технологічної документації. На ділянку виробництва заготовка повинна надійти в комплектації з декількома типами зразків-свідків, а саме зразки свідки сегментів лопаток з числом міжлопаткових каналів від 3 до 8 (особливо, якщо конкретна конструкція запускається у виробництво вперше) та зразки-свідки для контролю механічних властивостей. Зразки-свідки сегментів лопаток можуть використовуватись для підтвердження вірності обраних режимів обробки та візуальній оцінці якості поверхні та порівняння з еталонним зразком (якщо такий є в наявності) або розрізанням зразка-свідка на дротово-вирізному верстаті та вимірювання шорсткості оптичним методом. Контроль якості обробки міжлопаткових каналів також можливо контролювати за допомогою каліброваного ролика на прохід по каналу, при цьому ролик повинен точно відповідати розміру та профілю міжлопаткового каналу.

Даний метод контролю є досить точним, однак технологічно складним, оскільки для контролю необхідна висока точність виготовлення профілю ролика а також необхідна шорсткість для проходження ролика по каналу. Однак у випадку дрібносерійного та одиничного виробництва контроль якості обробки даним методом не є раціональним та технологічним. В ході експериментальних робіт було виявлений факт, що при абразивно-струменевій обробці, а саме при виході потоку абразивних часток по з обох країв сопла може виникати незначні розширення струменя що виходять за перетин каналу сопла, внаслідок чого

частинки потрапляють не в канал де повинна відбуватись обробка поверхні а поза ним. Наслідком такого явища може бути пошкодження кромки сусідніх лопаток що не обробляються в даний момент, тому виходячи з цього доцільно використовувати технологічні накладки виготовлені з будь-яких алюмінієвих сплавів, фторопласту, поліаміду чи його похідних за для уникнення пошкодження поверхонь що не обробляються.

Важливо відмітити той факт, що обробка абразивно-струменевим методом хоч і дозволяє обробляти за один установ більшу частину площі канал, однак не гарантує рівномірну шорсткість всієї зони обробки, виходячи з цього виникає необхідність робити «переустанов» оброблюваної заготовки та її повторне базування.

5.2 Розробка експериментального маршрутного технологічного процесу

На основі перелічених вище рекомендацій та практичного досвіду автора було розроблено маршрутний технологічний процес чистової обробки лопаток турбін закритого типу виготовленого за одне ціле з диском з кількістю лопаток рівним 100 шт., наведений в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1. Маршрутний технологічний процес абразивно-струменевої обробки лопаток турбіни закритого типу.

№ п/п	Найменування операції	Зміст операції	Обладнання	Операційний час, хв.
005	Комплектація	1.Отримання заготовки із заготівельної ділянки зі зразками-свідками 2. Контроль супровідних документів. 3. Підготовка технологічного оснащення і пристосування для АСО	Слюсарний стіл	4
010	Контрольна	Зовнішній огляд заготовки ВТК на відсутність мех.пошкоджень.	Слюсарний стіл	3

Продовження таблиці 5.1

№ п/п	Найменування операції	Зміст операції	Обладнання	Операційний час, хв.
015	Ізолювання	Виконати захист поверхонь що не підлягають обробці, технологічними проставками згідно конструкторської документації	Слюсарний стіл	15
020	Встановлювальна	Виконати встановлення заготовки на оснащенні, зорієнтувати відносно сопла для обробки поверхні 1 , згідно схеми рис.1.	Цехове оснащення	3
025	Абразивно-струменева	1. Виконати обробку поверхні 1 згідно режимів: - вихідний номінальний тиск 8 атм; - тривалість обробки – до 10-12 сек. - масова витрата абразиву до 500 гр.	КСО (камера струменевого очищення)	До 18*
030	Слюсарна	Виконати демонтаж заготовки з оснащення та продути стиснутим повітрям до повного видалення залишків абразивних матеріалів	Слюсарний стіл	4
035	Контроль ВТК	Міжопераційний контроль якості обробки поверхні лопаток	Слюсарний стіл	До 40
040	Встановлювальна	Виконати встановлення заготовки на оснащенні, зорієнтувати відносно сопла для обробки поверхні 2 , згідно схеми рис.2.	Цехове оснащення	3
045	Абразивно-струменева	Виконати оп.030 для поверхні 2	КСО	До 18*
050	Слюсарна	Демонтаж ізоляції захищених поверхонь	Слюсарний стіл	15
055	Слюсарна	Виконати демонтаж заготовки з оснащення та продути стиснутим повітрям до повного видалення залишків абразивних матеріалів	Цехове оснащення	3

Продовження таблиці 5.1				
№ п/п	Найменування операції	Зміст операції	Обладнання	Операційний час, хв.
060	Миюча	Виконати промивання деталі в УЗМ	Ванна УЗМ	3
065	Сушка	Виконати сушку деталі стиснутим повітрям до повного видалення вологи	Компресор	3
070	Контроль ВТК	Контроль р-р міжлопаткових каналів, зовнішній огляд на відсутність мех.пошкоджень.	Стіл ВТК	80
075	Пакувальна	Виконати пакування в бульбашково-пакувальну плівку в 3-4 шари і розмістити в жорсткій тарі необхідного розміру	Слюсарний стіл	3
080	Остаточна здача	Остаточна здача на склад готової продукції	Склад готової продукції	3
$\Sigma_{\text{сум}} =$				3,63 год
*- час вказаний на односторонню обробку лопаток.				

Висновки до розділу 5

В ході роботи в п'ятому розділі були вирішені такі завдання:

1. Розроблено маршрутний технологічний процес чистової обробки лопаток турбіни закритого типу виготовленої за одне ціле з диском адитивним методом.
2. Розраховано тривалість кожної з операцій маршрутного технологічного процесу та сумарний час повної обробки колеса турбіни закритого типу з кількістю лопаток – 100 шт.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вивчено та розв'язано науково-практичну задачу з розробки ефективної технології чистової обробки закритих лопаток турбіни (з бандажем), виготовлених адитивним методом за технологією SLM. Вперше в даній роботі вирішено наукові та практичні завдання, серед яких:

1. Проведено аналіз існуючих методів чистової обробки поверхонь лопаток турбін, результати якого дозволили сформулювати мету роботи та визначити напрямки дослідження, визначено найбільш перспективну та ефективну технологію для обробки поверхонь закритих лопаток турбін турбонасосних агрегатів.

2. Вперше розроблена і впроваджена методика оцінки якості та шорсткості поверхні лопаток турбін закритого типу (з бандажем), яка полягає в наступному: розрізання тіла закритої лопатки (з бандажем) в 2-х площинах для виконання вимірювання шорсткості кожної частини поверхні оптичним методом, за допомогою подвійного мікроскопа Линника МІС-11, оскільки даний метод дозволяє проводити вимірювання безконтактним методом. Вимірювання шорсткості поверхонь на деталях, отриманих адитивним методом, не завжди можливо виконати профілометром через високі значення шорсткості та характер мікрорельєфу поверхні що може призвести до ушкодження приладу. Використана методика дозволяє досить точно оцінити величину шорсткості друкованих поверхонь як до абразивно-струменевої обробки так і після.

3. Вперше проведено комп'ютерне моделювання процесу абразивно-струменевої обробки лопаток турбін закритого типу (з бандажем), що дозволило визначити найбільш ефективні режими обробки.

4. Вперше встановлено закономірності впливу різнозернистості абразивного матеріалу та форми внутрішнього каналу сопла на показники обробки поверхні, насамперед на шорсткість та ріномірність обробки. Закономірності полягають в наступному: чим більша величина різнозернистості (максимальні і мінімальні розміри зерен) тим більше виражена нерівномірність ерозії в зоні обробки на

поверхні деталі, і навпаки, чим більша однорідна величина розміру абразивних зерен, тим рівномірніша поверхня в зоні обробки та рівномірна величина шорсткості. Як показало контрольне моделювання, зміна форми внутрішнього каналу не спричиняє суттєвого впливу на рівномірність ерозії в зоні обробки, зміна форми внутрішньої форми каналу сопла впливає тільки на форму зони обробки.

5. Вперше було проведено експериментальну обробку абразивно-струменевим методом поверхні лопатки турбіни закритого типу (з бандажем). за найбільш ефективними режимами, визначеними комп'ютерним моделюванням, а саме розташування каналу сопла відносно каналу лопаток під кутом 26° та відстань між кромкою лопаток та соплом $S=6$ мм. Найбільш ефективними абразивним матеріалам, згідно результатів обробки, є електрокорунд нормальний 14А фракція 60 мкм, обробка поверхні яким дозволила отримати шорсткість на рівні $Ra\ 0.86$.

6. Вперше розроблено та впроваджено експериментальний маршрутний технологічний процес чистової обробки лопаток турбін закритого типу (з бандажем), основними операціями якого є: комплектація, контрольна, ізолювання, встановлювальна, абразивно-струменева, слюсарна, миюча, сушка, пакувальна та кінцева здача на склад готової продукції.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Технологія виробництва ракетно-космічних літальних апаратів: Навч. Посібник [Текст] /Ю. С. Алексеев та інш./ Під ред. д-ра техн. наук Є. О. Джура. – Д:АРТ-ПРЕС, 2007.-480 с.
2. Воробей, В.В.Технология производства жидкосных ракетных двигателей / Логинов В.Е.: Учебник. – М.; Изд-во МАИ, 2001 – 496 с.; ил. ISBN 5-7035-2328-1.
3. Тихонов, Н.Т. Теория лопаточных машин авиационных газотурбинных двигателей [Текст]/ П.Ф. Мусаткин, В.Н. Матвеев. Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 2001. 155 с.
4. Васильев, А.П. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей [Текст]. В 2 кн . Кн 2 Учебн. для авиац. спец. вузов/ В.М. Кудрявцев, В.А. Кузнецов и др; под ред. В.М. Кудрявцева – 4е. изд., перераб. И доп.- М.; Высш.шк, 1993-368 с.: ISBN 5-06-002563-2.
5. Шашко Ю.А. Аналіз можливості та перспективи використання методу бластіну при чистовій обробці закритих лопаток моноколів турбін, виготовлених адитивним методом за технологією slm [Текст]/ Казеев С.В., Аджамський С.В., Кулик О.В., Санін А.Ф. *Journal of Rocket-Space Technology*, 4(T29), 132-137,2021.
6. Багров С.В., Уваров Л.Б. Оптимизация технологических процессов изготовления осевых моноколес компрессоров газотурбинных двигателей [Текст]/ Уваров Л.Б. / Полет. Изд-во: Машиностроение. – 2009. №12. – С. 24-32.
7. Елисеев Ю.С. Технология производства авиационных газотурбинных двигателей: Учебное пособие для вузов [Текст] /, А.Г. Бойцов, В.В. Крымов, Л.А. М. : Машиностроение, 2003. 512 с., ил.
8. Klocke F. Technological and Economical Comparison of Roughing Strategies via Milling, EDM and ECM for Titanium- and Nickel-based Blisks / F. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.05.048>.

9. ScottTech. Як працює відцентровий насос? Доступно в Інтернеті: <http://mahans.com/how-does-a-centrifugal-pump-work/> (дата доступу: 19 лютого 2021 р.).
10. Григорук В. І. Лазерна спектроскопія: навч. посіб. / В. І. Григорук, П. А. Коротков. – Київ, 2017. – 263 с. 716084R 53
11. Shot Peening Method for Aerofoil Treatment of Blisk Assemblies / W. Hennig, G. Feldmann, T. Haubold // *Procedia CIRP*. – 2014. – Is. 13. – P. 355 – 358.
12. Лукин, В. И. Особенности технологии диффузионной пайки жаропрочного сплава ЭП975 и литейного монокристаллического интерметаллидного сплава ВКНА-4У применительно к конструкции «Блиск» [Текст] / Рыльников, В. С., Афанасьев-Ходыкин, А. Н., Тимофеева, О. Б.. *Сварочное производство*, 7, 19–25, 2013.
13. Горелов В.А., К вопросу выбора технологии обработки сложнопрофильных изделий (на примере лопаток моноколес газотурбинных двигателей) [Текст] / С.В. Аршинов, Ю.В. Максимов, Б.Е. Пини, А.А. Бекаев, В.Г. Мерзликин, А.Ю. Второва // *Известия Московского государственного технического университета МАМИ*. – 2012. – Т. 2. № 2 (14). – С. 67-73.
14. Шашко Ю.А. Вибір оптимальних методів чистової обробки лопаток закритих моноколес турбонасосних агрегатів, отриманих адитивним методом прямого лазерного спікання порошку [Текст]/ Кулик О.В., Максимчук Р.Ф., Санін А.Ф. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*, 4(172), 53–62, 2021.
15. Kruth, J.-P.; Stevens, L.; Froyen, L.; Lauwers, B. Study of the white layer of a surface machined by die-sinking electro-discharge machining. *CIRP Ann. Manuf. Technol.* 1995, 44, 169–172.
16. Aspinwall, D.K.; Soo, S.L.; Curtis, D.T.; Mantle, A.L. Profiled Superabrasive Grinding Wheels for the Machining of a Nickel Based Superalloy. *Ann. CIRP* 2017, 53, 335–338.
17. Klocke, F.; Zeis, M.; Klink, A. *Technological and Economical Capabilities of Manufacturing Titanium- and Nickel-Based Alloys via Electrochemical Machining*

(ECM), *Non-Conventional Processes*, Erlangen: Esaform; Trans Tech Publications Ltd.: Stafa-Zurich, Switzerland, 2012.

18. Klocke, F.; Zeis, M.; Klink, A.; Veselovac, D. Technological and economical comparison of roughing strategies via milling, sinking-EDM, wire-EDM and ECM for titanium- and nickel-based blisks. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.* 2013, 6, 198–203.

19. Gang, L.I.; Zhao, W.-S.; Wang, Z.-L.; Wu, X. A special CAD/CAM software for electrodischarge machining of shrouded turbine blisk. *J. Shanghai Univ.* 2007, 11, 74–78.

20. Ayesta, B.J.I. Optimum electrode path generation for EDM manufacturing of aerospace components. *Robot. Comput. Manuf.* 2016, 37, 273–281.

21. Yang, D.Y.; Cao, F.G.; Liu, J.Y.; Yang, L.G.; Zhang, K.; Zhu, Y.F. Overview on Five-Axis Precision EDM Techniques. *Procedia CIRP* 2013, 6, 192–198.

22. Ayesta, B.J.I. Optimum electrode path generation for EDM manufacturing of aerospace components. *Robot. Comput. Manuf.* 2016, 37, 273–281.

23. Kang, X.; Liang, W.; Yang, Y.; Zhao, W. Maximum free distance method for electrode feeding path planning in EDM machining of integral shrouded blisks. *Precis. Eng.* 2018, 51, 514–520.

24. Плєскач В.М. Сучасні технології у порошковій металургії. Досягнення і перспективи [Текст]/ В. М. Плєскач // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. - 2017. - № 2. - С. 118-121. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nmt_2017_2_24.

25. Сергієнко О. С. Вплив гарячого ізостатичного пресування на структуру та механічні властивості жароміцних нікелевих сплавів / О. С. Сергієнко, Г. А. Бялік // Металл и литье Украины. - 2011. - № 2. - С. 5-7. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/MLU_2011_2_3.

26. Воробьев В. М. Развитие процессов точной штамповки при производстве двигателей и турбоагрегатов [Текст]/ В. М. Воробьев, А. В. Соколов // Двигатель. - 2010.-№ 5(71). – С. 51- 54.

27. Зленко М.А. Аддитивные технологии в машиностроении [Текст] / Попович А.А., Мутылина И.Н.. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2013 – 222 с.
28. Santos E.C. и др. Rapid manufacturing of metal components by laser forming // Int. J. Mach. Tools Manuf. 2006. Т. 46, № 12-13. С. 1459–1468.
29. Аджамский С.В. Перспективы применения аддитивных технологий в авиа и ракетостроении [Текст] / Кононенко А.А., Подольский Р.В. *«Авиационно-космическая техника и технология» ХАИ*. 7-2020, С. 59-65.
30. Adikari Appuhamillage, Gayan. (2018). NEW 3D PRINTABLE POLYMERIC MATERIALS FOR FUSED FILAMENT FABRICATION (FFF). 10.13140/RG.2.2.31264.43526.
31. (дата звернения 04.03.2020)
32. Atzeni E., Salmi A. Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2012. Т. 62, № 9-12. С. 1147–1155.
33. Волосова М.А. Пути оптимизации процесса селективного лазерного плавления при помощи выбора стратегии обработки лазерным лучом [Текст]/ Окунькова А.А. / Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14, № 4. С. 587–591.
34. Wycisk, E., Solbach, A., Siddique, S., Herzog, D., Walther, F., Emmelmann, C. Effects of defects in laser additive manufactured Ti-6Al-4V on fatigue properties //Physics Procedia. – 2014. – Т. 56. – С. 371-378.
35. Yasa E., Deckers J., Kruth J. The investigation of the influence of laser remelting on ensity , surface quality and microstructure of selective laser melting parts // Rapid Prototyp. J. 2011. Т. 17, № 5. С. 312–327.
36. Vaithilingam, J., Goodridge, R. D., Hague, R. J., Christie, S. D., & Edmondson, S. The effect of laser remelting on the surface chemistry of Ti6al4V components fabricated by selective laser melting //Journal of Materials Processing Technology. – 2016. – Т. 232. – С. 1-8.
37. Аджамский С.В., Сазанишвили З.В., Ткачев Ю.В. (2018). Повышение гибкости опытно-эксперементального производства изделий космической

техники. Збірник наукових праць «Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки» 22, 8-15.

38. Аджамский С.В., Кононенко А.А., Подольский Р.В. (2020). Перспективы применения аддитивных технологий в авиа и ракетостроении. «Авиационно-космическая техника и технология» ХАИ. 7-2020, 59-65.

39. Аджамський С. В., Кононенко Г. А., Подольський Р. В. (2021) Виготовлення тракту охолодження вдосконаленої конструкції для камери згоряння рідинного ракетного двигуна за допомогою адитивних технологій. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*, 171 (3), 42–48.

40. Najmon, J. C., Raeisi, S., & Tovar, A. (2019). Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry. Additive manufacturing for the aerospace industry, 7-31.

41. Кутин А.А., Туркин М.В. Передовые технологии производства сложнопрофильных изделий авиадвигателестроения на примере изготовления моноколес газотурбинных двигателей. Межотраслевая информационная служба. 2012. № 4. С. 52-57.

42. Uhlmann, E., Kersting, R., Klein, T. B., Cruz, M. F., Borille, A. V. Additive manufacturing of titanium alloy for aircraft components //Procedia CIRP. – 2015. – T.35. – С. 55-60.

43. Tayon, W., Shenoy, R., Bird, R., Hafley, R., Redding, M. Texture-Induced Anisotropy in an Inconel 718 Alloy Deposited Using Electron Beam Freeform Fabrication. – 2014. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20150000561>(дата звернення 15.11.2020).

44. Jia Q., Gu D. Selective laser melting additive manufacturing of Inconel 718 superalloy parts: Densification, microstructure and properties // J. Alloys Compd. Elsevier B.V., 2014. T. 585. С. 713–721.

45. Wang Z. и др. The microstructure and mechanical properties of deposited IN718 by selective laser melting // J. Alloys Compd. Elsevier B.V., 2012. T. 513. С. 518–523.

46. Mumtaz K.A., Erasenthiran P., Hopkinson N. High density selective laser melting of Waspaloy® // J. Mater. Process. Technol. 2008. T. 195, № 1-3. С. 77–87.
47. Kanagarajah P. и др. Inconel 939 processed by selective laser melting: Effect of microstructure and temperature on the mechanical properties under static and cyclic loading // Mater. Sci. Eng. A. Elsevier, 2013. T. 588. С. 188–195.
48. Vilaro T. и др. Microstructural and mechanical approaches of the selective laser melting process applied to a nickel-base superalloy // Mater. Sci. Eng. A. Elsevier B.V., 2012. T. 534. С. 446–451.
49. Shunmugavel M., Polishetty A., Littlefair G. Microstructure and mechanical properties of wrought and additive manufactured Ti-6Al-4V cylindrical bars //Procedia Technology. – 2015. – Т. 20. – С. 231-236.
50. Mukhtarov S., Ermachenko A. Mechanical properties of nanostructured nickel based superalloy Inconel 718 //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2010. – Т. 240. – №. 1. – С. 012118.
51. Jeff Allen, The Potential for Aero Engine Component Manufacture using Additive Layer Manufacturing// AERODAYS Conference. 2011. Madrid.
52. National Institute of Standards and Technology, Measurement Science Roadmap for Metal-Based Additive Manufacturing, prepared by Energetics Incorporated, Columbia, Maryland, for NIST, U.S. Department of Commerce, May 2013, p. 19.
53. Лещенко А.И. Формирование качественных показателей сложнопрофильных поверхностей при обработке на станках с ЧПУ. [Электронный ресурс]. // Прогресивні технології і системи машинобудування. 2012. № 1 (44). С.135-141.Режим доступа: <http://uran.donetsk.ua/~masters/2013/fimm/korol/library/article4.pdf>. – (Дата звернення: 06.02.2020).
54. Мозговой В.Ф., Балушок К.Б., Котов И.И., Панасенко В.А., Бирук М.К. Стратегии обработки лопаток монокристаллов на обрабатывающих центрах с ЧПУ с переменной 3d-коррекцией авиационно-космическая техника и технология, 2013, № 7 (104) С. 22-28.

55. Выбойщик А.В. Повышение точности и производительности фрезерования пространственно-сложных поверхностей на станках с ЧПУ: дис. канд. техн. наук: 05.02.08. / Выбойщик Александр Владимирович. - Челябинск, 2000. – 182с.

56. Качан А.Я. Технология обработки моноколёс высокоскоростным фрезерованием / А.Я. Качан, С.А. Петров, В.А. Панасенко, С.В. Мозговой, Г.В. Карась. – Запорожье: Вестник двигателестроения. – 2006.– №1. – С. 106 – 117.

57. Юнусов Ф.С., Лунев А.Н., Юнусов Р.Ф. Формообразование сложнопрофильных и крупногабаритных поверхностей полусвободным инструментом: Монография. Казань: Изд-во Казан. гос.техн. ун-та, 2011. - 280с.

58. Внуков Ю.Н. Применение технологических сред при фрезеровании тонкостенных деталей : монография / Ю. Н. Внуков, А.И. Гермашев, В.Ф. Мозговой и др. – Запорожье : ЗНТУ, 2016. – 187 с.

59. Жеманюк П.Д. Формообразование сложно-профильных поверхностей моноколес высокоскоростным фрезерованием/ П.Д. Жеманюк, В.Ф. Мозговой, А.Я. Качан, В.П. Карась // Газотурбинные технологии, 2003 г. — №5 (26) — С. 18-21.

60. Overview on five-axis precision EDM techniques / D.Y. Yang, F.G. Cao, J.Y. Liu, L.G. Yang, K. Zhang, Y.F. Zhu // Procedia CIRP. – 2013. – Is. 6. – P. 192 – 198.

61. Yigit I.E., A solid modeler based engagement model for 5-axis ball end milling / I.E. Yigit, S. Ehsan Layegh K., I. Lazoglu // Procedia CIRP. – 2015. – 31. – P. 179 – 184.

62. Качан А. Я. Технология обработки осевых моноколёс высокоскоростным фрезерованием / А. Я. Качан, С. А. Петров, В. А. Панасенко, С. В. Мозговой, Г. В. Карась // Авиационно-космическая техника и технология. - 2006. - № 9. - С. 12–18. - Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/aktit_2006_9_4.

63. Тернюк, И. А. Постановка задачи и алгоритм комплексной оптимизации схемы срезания припуска при механической обработке поверхностей моноколес газотурбинных двигателей [Текст] / И. А. Тернюк, В. Ф

Сорокин // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац.Аэрокосмического ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Вып. 66. Х., 2014.– С. 53 – 63.

64. Акулович, Л.М. Основы магнитно-абразивной обработки металлических поверхностей / Л.М. Акулович, Л.Е. Сергеев, В.Я. Лебедев. – Минск: БГАТУ, 2012. – 316 с.

65. Барон, Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов [Текст] / Ю.М. Барон. - Л.: Машиностроение, 1986. – 264 с.

66. Майборода, В. С. Магнитно-абразивная обработка деталей сложной формы [Электронный ресурс] / В. С. Майборода, И. В. Слободянюк, Д. Ю. Джулий ; М-во образования и науки Украины, Нац. техн. ун-т Украины “Киев. политехн. ин-т им. И. Сикорского”. 2017. – 272 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/27484>

67. В.С. Майборода, И.В. Слободянюк, Д.Ю. Джулий Магнитно-абразивная обработка деталей сложной формы. - (рос. мов). Житомир.: ПП «Рута», 2017. – 272 с. ISBN 978-617-581-336-2.

68. Барон Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Барон Ю.М. – Л.: Машиностроение, 1986. – 176 с.

69. Майборода В.С. Основи створення і використання порошкового магнітно-абразивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь. Дис. ... докт.техн.наук. – Київ, 2001. – 404 с.

70. Олиker В.Е. Порошки для магнитно-абразивной обработки и износостойких покрытий / В.Е. Олиker. – М.: Металлургия, 1990. – 176 с.

71. Степанов О.В. Исследование процесса формирования магнитно-абразивного порошкового инструмента для обработки деталей сложной геометрической формы: дис. канд. техн. наук: 05.16.06 / Степанов Олег Васильевич. – Киев, 1997. – 145 с.

72. Барон Ю.М. Трение магнитно-абразивных порошков: внутреннее и в контакте с металлическими поверхностями / Ю.М. Барон, Е.М. Желтобрюхов // Ленинград. – 1985. –10 с. – Деп. во ВНИИТЭМР №235 мш.

73. 134. А.с. 403537 СССР, М.Кл. В 24b 31/10 Устройство для объемной полировки: / Е.Г. Коновалов, Ф.Ю. Сакулевич Л.М. Кожуро и др. – №1666214/25-8; Заявлено 03.06.71.; Опубл. 26.10.73., Бюл. №43. – 4с.ил.

74. А.с. 462707 СССР, М.Кл. В 24b 31/10 Устройство для объемной полировки: / Ф.Ю. Сакулевич, Л.М. Кожуро, Г.А. Семенюк и др. – №1948081/25-8; Заявлено 24.07.73.; Опубл. 05.03.75., Бюл.№9. – 3с.ил.

75. Гридасова Т.Я. Магнитно-абразивная обработка лопаток на установке типа кольцевая ванна / Т.Я. Гридасова, В.С. Майборода, В.Я. Шлюко и др. // Авиационная промышленность. – 1985. – №8. – С. 19 – 20.

76. Ефремов В.Д. Технологическое обеспечение качества рабочих кромок инструмента и деталей. / В.Д.Ефремов, П.И.Ящерицын Мн.: БАТУ. - 1997. – 251 с.

77. Майборода В.С. Магнитно-абразивная обработка специальных деталей : дис. канд. техн. наук: 05.02.08 / Майборода В.С. – Киев, 1988. – 170 с.

78. Степанов О.В. Анализ динамических характеристик ферроабразивного инструмента при магнитно-абразивной обработке / О.В. Степанов, В.С. Майборода, В.Я. Шлюко и др. // Технология и автоматизация машиностроения. – 1989. – №43. – С. 94 – 97.

79. Сакулевич, Ф.Ю. Основы магнитно-абразивной обработки / Ф.Ю. Сакулевич. – Минск : Наука и техника, 1981. – 328 с.

80. Барон, Ю.М. магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов/ Ю.М. Барон. – Л.:Машиностроение, Ленингр. Отд-ние, 1986. – 176 с.

81. Бабичев, А.П. Основы вибрационной техники [Текст] / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев // Ростов н/Д: ДГТУ, 1999. - 528 с.

82. Хейфец, М.П. Проектирование процессов комбинированной обработки [Текст] / М.П. Хейфец. - М.: Машиностроение, 2004. - 320 с.

83. Сухочев, Г.А. Технологии производительного формирования комбинированными методами поверхностей полостей и каналов под нанесение защитных покрытий [Текст] / Г.А. Сухочев, Е.Г. Смольяникова, С.Н. Коденцев,

Д.М. Небольсин // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2009. - №11(59). - С. 49-54.

84. Нечай Е. В. Пічугін Н. І. Аналіз фінішних методів обробки деталей у середовищі вільних абразивів // Вібрації в техніці та технологіях. – 2010. – № 2. – С. 152–166.

85. Магеррамова Л. А. Применение биметаллических блисков, изготавливаемых методом ГИП из гранулируемых и литейных никелевых суперсплавов, для увеличения надежности и ресурса газовых турбин. Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2011. Т. 15 № 4. С. 33-38.

86. Фомичев Е.О., Воронин Н.Н. Анализ существующих способов восстановления лопаток компрессора газотурбинного двигателя. Двигатель. 2013. № 5 (89). С. 20-21.

87. Сухочев, Г.А. Технологии производительного формирования комбинированными методами поверхностей полостей и каналов под нанесение защитных покрытий [Текст] / Г.А. Сухочев, Е.Г. Смольяникова, С.Н. Коденцев, Д.М. Небольсин // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2009. - №11(59). - С. 49-54.

88. Стоцько З.А., Стефанович Т.О., Побудова і дослідження розподілу швидкостей робочого середовища при струминній обробці поверхонь виробів//ДонНТУ Міжнародний зб.наукових праць:Прогресивні технології і системи машинобудування. – 2006. - №32. – С.212-220.

89. Проволоцкий А.Е. Струйно-абразивная обработка деталей машин. – К.:Техника, 1989. – 177 с.

90. Шашко Ю.А., Казеєв С.В., Аджамський С.В., Кулик О.В., Максимчук Р.Ф.(2022). Застосування сухої абразивної обробки та експериментальний підбір матеріалів для чистової обробки лопаток закритого типу. *Journal of Rocket-Space Technology*, 4(T30), 51-56.

91. Девкин М.М., Севостьянов Н.Д. Очистка поверхностей деталей металлическим песком. – М.:Машгиз, 1963 – 89 с.

92. X. Li and C. Jiang, "Numerical Simulation Analysis of Shot Peening Residual Stress on Aluminum Alloy Surface Based on Finite Element Method," 2019 6th International Conference on Dependable Systems and Their Applications (DSA), pp. 183-190, 2020, doi: 10.1109/DSA.2019.00030.

93. W. S. Slat, V. Malau and P. T. Iswanto, "The Effects of Shot Peening Treatment on the Hardness and Fatigue Strength of HQ 805," 2018 International Conference on Applied Science and Technology (iCAST), 2018, pp. 142-145, doi: 10.1109/iCAST1.2018.8751516.

94. Ruihong Wang, Jie Xu and Guangyi Li, "Intelligent prediction of jet shot peening surface roughness," 2015 4 International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT), 2015, pp. 786-789, doi:10.1109/ICCSNT.2015.7490859.

95. J. Liu and R. Liao, "Simulation of Shot Peening Process Using Combined Hardening Model," 2010 International Conference on E-Product E-Service and E-Entertainment, 2010, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICEEE.2010.5660980.

96. Саленко О.Ф., Струтинський В.Б., Загірняк М.В., "Ефективне гідрорізнання," Кременчук: КДПУ, С. 488, 2005.

97. Salenko A.F., Shchetinin V.T., Gabuzyan G.V., et al., "Cutting of Polycrystalline Superhard Materials by Jet Methods," Journal of Superhard Materials, vol. 38, no 5, pp. 351-362, 2016, doi:10.3103/S1063457616050063.

98. Stotsko Z.A., Stefanovych T.O., "Investigations on the Machine Parts Treatment by Non-bound Blast Particles, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering," vol. 49, no 2, pp. 440-459, 2011, [url:http://jamme.acmsse.h2.pl/papers_vol49_2/49236.pdf](http://jamme.acmsse.h2.pl/papers_vol49_2/49236.pdf).

99. Новіков Ф. В. Основи струминно-абразивної обробки дрібних деталей: монографія / Ф. В. Новіков, О. О. Анділахай. - Х. : Вид. ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2014. - 348 с.

100. Анділахай А. А. Методы, перспективы защиты каналов сопел струйно-абразивных установок от износа / А. А. Анділахай // Вісник Харківського

національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – Х. : ХНТУСГ, 2011. – Вип. 118. – С. 37–44.

101. Андилахай А. А. Определение областей эффективного применения абразивной обработки затопленными струями / А. А. Андилахай // Захист металургійних машин від поломок : міжвуз. темат. зб. наук. праць. – Маріуполь : ПДТУ, 2012. – Вип. 14. – С. 217–223.

102. Андилахай А. А. Технологические возможности абразивной обработки деталей затопленными струями / А. А. Андилахай // Вісник НТУ "ХП" : зб. наук. праць. Темат. вип.: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ "ХП", 2010. – № 49. – С. 140–143.

103. Козлов, Д.Ю. Бластинг. Гид по высокоэффективной абразивоструйной очистке [Текст] / Д.Ю. Козлов. – Екатеринбург, 2007. – 220 с.

104. Тарасов В. А., Полухин А. Н. Оценка геометрических параметров формируемой поверхности при гидроабразивной обработке // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2012. № 1. С. 107–116.

105. Полянский С. Н., Бутаков С. В., Александров В. А. Обоснование оптимальных технологических режимов обработки поверхности методом ГАО при ремонте сельскохозяйственной техники // Аграрный вестник Урала. 2012. № 11. С. 49–51.

106. Нестеренко М.М. Галтовочный метод обработки деталей / М.М. Нестеренко, Г.Ф. Дураченко, Кушка М.М. // Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки : матеріали V Всеукр. наук.-техн. конференції (22 квіт. 2021 р., м. Полтава). – Полтава : Національний університет імені Юрія Кондратюка, 2021. – С. 25-27.

107. Иванников, В.А. Повышение показателей качества поверхностного слоя износостойких покрытий сложного профиля [Текст] / В.А. Иванников, В.Н. Гореликов//Прогрессивные технологии и оборудование в машиностроении и металлургии: сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. Часть I. - Липецк, ЛГТУ, 2006, С. 107-111.

108. Wang Z. и др. The microstructure and mechanical properties of deposited IN718 by selective laser melting // J. Alloys Compd. Elsevier B.V., 2012. Т. 513. С. 518–523.
109. Mumtaz K.A., Erasenthiran P., Hopkinson N. High density selective laser melting of Waspaloy // J. Mater. Process. Technol. 2008. Т. 195, № 1-3. С. 77–87.
110. Дудніков, А. А., Дудник, В. В., Бурлака, О. А., Канівець, О. В., & Кривонос, С. М. (2020). ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ПОВЕРХНЕВИМ ПЛАСТИЧНИМ ДЕФОРМУВАННЯМ. *Scientific Progress & Innovations*, (4), 251-258. <https://doi.org/10.31210/visnyk2020.04.32>
111. Кремень, З.И. Качество поверхности при обработке потоком абразивных зерен [Текст] / З.И. Кремень, М.Л. Массарский, В.З. Гузель // Станки и инструменты, 1979, № 6. - С. 25-26.
112. Кабалдин, Ю.Г. Адаптивное управление электроэрозионным станком на основе анализа устойчивости процесса обработки [Текст] / Ю.Г. Кабалдин, С.В. Биленко, М.Ю. Сарилон // Вестник КНАГТУ. Вып. X. Управление наноструктурированием металлических материалов и динамическими системами. Сборник научных трудов. - Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КНАГТУ», - 2008. - С. 89-96.
113. Бабичев, А.П. Основы вибрационной техники [Текст] / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев // Ростов н/Д: ДГТУ, 1999. - 528 с.
114. Бакуто, И.А. О факторах, влияющих на образование покрытий при электроискровом способе обработки [Текст] / И.А. Бакуто, М.К. Мицкевич // Электронная обработка материалов, 1977, №3. - С. 17-19.
115. Волков, Д.И. Модель соударения микрошарика с упрочняемой поверхностью при дробеструйной обработке [Текст] / Волков Д.И., Гущин А.Ю. // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. - Рыбинск, 2005. - С. 131-139.
116. Андилахай А. А. Условия повышения производительности абразивной обработки / А. А. Андилахай // Вісник НТУ "ХПІ": зб. наук. праць.

Темат. вип.: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ "ХПІ", 2012. – № 53. – С. 42–47.

117. Волков Д.И. Определение параметров поверхностного слоя при упрочнении микрошариками [Текст] / Волков Д.И., Гущин А.Ю. // Упрочняющие технологии. - 2006. - №11. - С. 12-14.

118. Rajurkar, K.P.; Zhu, D.; McGeough, J.A.; Kozak, J.; De Silva, A. New Developments in Electro-Chemical Machining. *CIRP Ann. Manuf. Technol.* 1999, 48, 567–579.

119. Rajurkara, K.P.; Sundaraman, M.M.; Malshe, A.P. Review of Electrochemical and Electrodischarge Machining. The Seventeenth CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM). *Procedia CIRP* 2013, 13–26.

120. Chen, X.; Xu, Z.; Zhu, N.; Fang, Z.; Zhu, D. Experimental research on electrochemical machining of titanium alloy Ti60 for a blisk. *Cin. J. Aeronaut.* 2016, 29, 274–282.

121. Klocke, F.; Klink, A.; Veselovac, D.; Aspinwall, D.K.; Soo, S.L.; Schmidt, M.; Schilp, J.; Levy, G.; Kruth, J. Turbomachinery component manufacture by application of electrochemical, electro-physical and photonic processes. *Cirp Ann. Manuf. Technol.* 2014, 63, 703–726.

122. Zhang, J.; Zhu, D.; Xu, Z.; Zhang, K.; Liu, J.; Qu, N.; Zhu, D. Improvement of trailing edge accuracy in blisk electrochemical machining by optimising the electric field with an extended cathode. *J. Mater. Process. Technol.* 2016, 231, 301–311.

123. Аронов Б.М. Профилирование лопаток авиационных газовых турбин М.: Машиностроение, 1975. — 192 с.

124. Съянов, С.Ю. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя деталей при электроэрозионной обработке: дис. ... канд. техн. наук / С.Ю. Съянов. – Брянск: БГТУ, 2002. –166 с.

125. Liu X. Liang Electrode feeding path searching for 5-axis EDM of integral shrouded blisks / X. Liu, X. Kang, W. Zhao, W. Liang //Procedia CIRP. – 2013. – Is. 6. С. 107 - 111.

126. Багров С.В., Уваров Л.Б. Оптимизация технологических процессов изготовления осевых моноколес компрессоров газотурбинных двигателей // Полет. Изд-во: Машиностроение. – 2009. №12. – С. 24-32.
127. Wei, B. Patent US 6787728, publ. 2004. Method and apparatus for near net shape rapid rough electromachining for blisks / B. Wei [et al].
128. Wei, B. Patent US 6858125, publ. 2005. Multiaxis numerical control electro-machining of bladed disks / B. Wei [et al].
129. Burns, N. A. Patent US 4851090, publ. 1989. Method and apparatus for electrochemically machining bladed disks / N. A. Burns [et al].
130. Lamphere, M. S. Patent US 7204926, publ. 2007. Tandem blisk electrochemical machining /M. S. Lamphere [et al].
131. ECM - электрохимическая обработка. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2013. № 2 (62). С. 6-12.
132. Klocke F. Experimental research on the electrochemical machining of modern titanium- and nickel-based alloys for aero engine components / F. Klocke, M. Zeis, A. Klink, D. Veselovac // Procedia CIRP. – 2013. – Is. 6. – P. 368 – 372.
133. Dong Z., Di Z., Zhengyang X., Laishui Z. Trajectory control strategy of cathodes in blisk electrochemical machining. Chinese Journal of Aeronautics. 2013. T. 26 № 4. С. 1064 - 1070.
134. Liu X. Liang Electrode feeding path searching for 5-axis EDM of integral shrouded blisks / X. Liu, X. Kang, W. Zhao, W. Liang //Procedia CIRP. – 2013. – Is. 6. С. 107 - 111.
135. Полетаев В.А., Сыркин И.С. Разработка и управление ходом технологического процесса электроэрозионной обработки// Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2007. № 1. С. 60-66.
136. Zhao W. A novel high efficiency electrical erosion process – Blasting erosion arc machining / W. Zhao, L. Gu, H. Xu, L. Li, X. Xiang // Procedia CIRP. – 2013. – Is.6. – P. 621 – 625.

137. Полетаев В.А. Технология автоматизированного производства лопаток газотурбинных двигателей. Учебное пособие Москва, 2006. Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2010. № 10. С. 9-12.

138. Кожина Т.Д., Курочкин А.В./ Результаты исследовательских работ испытаний лопаток компрессора газотурбинного двигателя, полученных методом электрохимической обработки./ Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы современного машиностроения» в ЮТИ ТПУ ст.169-176.

139. http://dspace.univer.kharkov.ua/bitstream/123456789/6010/2/Metallography_samples.pdf

140. Павлик І.В. Комп'ютерна графіка: конспект лекцій [Текст] / І.В. Павлик, Л.Є. Шкіца, С.С. Чаплінський. – Івано-Франківськ: Факел, 2005. – 137 с.

141. Тику Ш. Эффективная работа: SolidWorks 2006 [Текст] / Ш. Тику. – СПб.: Питер, 2007. – 720 с.

142. Аджамский С. В. Симуляция влияния остаточных напряжений и параметров SLM-технологии на формирование области границ изделия из жаропрочного никелевого сплава INCONEL 718 / С. В. Аджамский, А. А. Кононенко, Р. В. Подольский. // Ministry of Education and Science of Ukraine The National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, 17 – 19 March, 2020. – 2020. – №1. – С. 4–6 - Режим доступа до ресурсу: DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2020.01.00.

143. Аджамский С. В. Двумерное моделирование нестационарного температурного поля единичного трека из жаропрочного сплава INCONEL 718 / С. В. Аджамский, А. А. Кононенко, Р. В. Подольский. // Матеріали всеукраїнської науково-методичної конференції "Прблеми математичного моделювання". – 2020. – №1. – С. 42–45 Режим доступу: https://www.dstu.dp.ua/uni/downloads/material_konf_traven_%202020.pdf .

144. Аджамский С. В. Использование SLM-технологии в деталях и узлах авиационно-космического назначения / С. В. Аджамский, А. А. Кононенко, Р. В.

Подольский. // 11 Всеукраїнська конференція молодих вчених "Молоді вчені - 2020". – 2020. – №1. – С. 6–9.

145. Аджамский С. В. Исследование влияния режимов SLM-процесса на качество в области контура изделий [Электронный ресурс]/ С. В. Аджамский, А. А. Кононенко, Р. В. Подольский. // міжнародна конференція «Університетська наука - 2020». – 2020. – №1. – С. 157–158. Режим доступа до ресурсу: http://eir.pstu.edu/bitstream/handle/123456789/17421/%D0%A3_%D0%BA%D0%B0%D1%8F%20%D0%BD%D0%B0%D1%83%D0%BA%D0%B0_2020_%D0%A2_1.pdf

146. Аджамский С. В. Разработка технологии изготовления изделий для авиационно-космической техники методом выборочного лазерного плавления [Электронный ресурс] / С. В. Аджамский, А. А. Кононенко, Р. В. Подольский // МАТЕРІАЛИ XII Міжнародної науково-технічної конференції "Нові матеріали і технології в машинобудуванні". – 2020. – Режим доступа до ресурсу: https://foundry.kpi.ua/wp-content/uploads/2020/06/conferenziya_2020.pdf#page=29.

147. Adzhamskii S. V. Investigation of deep penetration conditions when making samples from high-temperature alloy Inconel 718 by the method of selective laser melting [Электронный ресурс] / S. V. Adzhamskii, A. A. Kononenko // Avtomaticheskaya Svarka (Automatic Welding), #6, 2019, pp.65-70. – 2019. – Режим доступа до ресурсу: <https://doi.org/10.15407/as2019.06.11>.

148. Аджамский С. В. Реализация SLM - технологии для изготовления образцов из жаропрочного сплава INCONEL 718, применяемого в авиационно-космической технике [Электронный ресурс] / С. В. Аджамский // АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ, 2019, № 2(154). – 2019. – Режим доступа до ресурсу: doi: 10.32620/aktt.2019.2.09.

149. Аджамський С.В. Синтез конструкторсько-технологічних рішень для виготовлення деталей ракетно-космічної техніки із застосуванням вибіркового лазерного плавлення: дис. ...д-ра філософії: Дніпро, 2021. 202 с.

150. D. Zhang, W. Niu, X. Cao, Z. Liu, Effect of standard heat treatment on the microstructure and mechanical properties of selective laser melting manufactured

Inconel 718 superalloy, Mater. Sci. Eng. A 644 (2015) 32–40, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.06.021>

151. Y. Zhang, Z. Li, P. Nie, Y. Wu, Effect of heat treatment on niobium segregation of laser-cladded IN718 alloy coating, Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci. 44 (2013) 708–716, <https://doi.org/10.1007/s11661-012-1459-z>

152. Thomas G. Gallmeyera, Senthamilaruvi Moorthya, Branden B. Kappesa, Michael J. Millsb, Behnam Amin-Ahmadia, Aaron P. Stebner. Knowledge of process-structure-property relationships to engineer better heat treatments for laser powder bed fusion additive manufactured Inconel 718\ Additive Manufacturing 31 (2020) 100977, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100977>

153. <https://energosteel.com/uk/shkala-moosa-universalnij-metod-viznachennya-tverdosti-materialiv/>

154. Thermally Exfoliated Graphite. [Текст]: US 2007/0092432;C01B 31/04 (2006.01) Robert K. Prud'Homme, Ilhan A.Aksay, Douglas Adamson, Ahmed Abdada; Filed: Oct.14,2005; Pub.Date: Apr.26, 2007.

155. Басов К.А. Графический интерфейс комплекса ANSYS.М.: ДМК Пресс, 2006.

156. Басов К.А. ANSYS: справочник пользователя. М.: ДМКПресс, 2005.

157. Henk Kaarle Versteeg, Weeratunge Malalasekera (2007). Pearson Education Limited.

158. Launder, B.E.; Spalding, D.B. (March 1974). «The numerical computation of turbulent flows». Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 3 (2): 269—289.

159. P Bradshaw (1987), «Turbulent Secondary Flows», Annual Review of Fluid Mechanics, 19: 53–74.

160. Basov K.A. Graficheskij interfejs kompleksa ANSYS. M.: DMK Press, 2006.

161. Basov K.A. ANSYS: spravochnik pol'zovatelja. M.: DMK Press, 2005.

162. Shashko, Y. (2023). 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*, 31(4), 121-127.

163. Ю.А. Шашко, О. В. Кулик. Вдосконалення процесу обробки абразивно-повітряним струменем робочих поверхонь лопаток моноколів закритого типу на основі даних чисельного моделювання за допомогою програмного комплексу ansys cfx: *Авіаційно-космічна техніка і технологія*, 2023, №5(191), 55–68.

ДОДАТОК А

ЗАТВЕРДЖУЮ»

В.о. директора

ТОВ «ФЛАЙТ КОНТРОЛ»

Олександр ДОНДІК

АКТ РЕАЛІЗАЦІЇ

результатів дисертаційної роботи

аспіранта Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара
Шашко Юрія Анатолійовича

Комісія ТОВ "ФЛАЙТ КОНТРОЛ" (Flight Control LLC) у складі голови служби головного технолога, дослідно-виробничого комплексу з розробки рідинних ракетних двигунів, С.В. Казєєва, директора департаменту виробництва П.Ю. Губаренка, склали цей акт, про те що, результати дисертаційної роботи Шашко Ю.А. *«Розробка технології чистової обробки лопаток турбіни ТНА, виготовленої методом 3D-друку»*, представляють науковий інтерес і практичну цінність для виготовлення відповідальних деталей ракетно-космічної техніки.

Встановлено, що мета та результати дисертаційної роботи сприяють вирішенню задач ракетобудівної галузі, а загальна спрямованість відповідає напрямку роботи ТОВ "ФЛАЙТ КОНТРОЛ" (Flight Control LLC).

Комісія підтверджує, що результати досліджень Шашко Ю.А., використані під час експериментального відпрацювання технології виготовлення деталей турбонасосних агрегатів ракетно-космічної техніки адитивним методом за технологією SLM з жароміцного нікелевого сплаву Inconel 718.

Результати дисертаційної роботи Шашко Ю.А. можуть бути використані в умовах виробництва ТОВ "ФЛАЙТ КОНТРОЛ" (Flight Control LLC).

Головний технолог _____

Директор департаменту _____

виробництва _____



Казєєв С.В.

Губаренко П.Ю.

ДОДАТОК Б

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

В.о.проректора
з науково-педагогічної роботи
Дніпровського національного
університету імені Олеся Гончара
професор Наталія ГУК



2023 р.

АКТ

впровадження дисертаційного дослідження аспіранта PhD
Шашко Юрія Анатолійовича «Розробка технології чистової обробки лопаток
турбіни ТНА, виготовленої методом 3D-друку»
у навчальний процес Дніпровського національного університету
імені Олеся Гончара

Комісія Фізико-технічного факультету Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара у складі голови – в.о.декана, завідувача кафедри ракетно-космічних та інноваційних технологій професора Саніна А.Ф, та членів комісії: доцента Бондаренка О.В., доцента Ткачова Ю.В., доцента Хуторного В.В. констатує, що результати досліджень і розробки, що відображені в дисертаційній роботі Шашко Юрія Анатолійовича на здобуття наукового ступеня доктора філософії PhD «Розробка технології чистової обробки лопаток турбіни турбонасосного агрегату, виготовлених методом 3D друку», використовуються при проведенні лекційних, практичних занять та лабораторних занять, що викладаються у відповідності з освітніми програмами бакалаврів та магістрів за такими дисциплінами: «Технологія виробництва типових деталей» за спеціальністю 133 – Галузеве машинобудування, «Основи виробництва літальних апаратів та енергетичних

двигунних установок» 134 – Авіаційна та ракетно-космічна техніка, та «Адитивні технології та економічна ефективність у виробництві нової техніки» спеціальність – 132 Матеріалознавство.

Застосування результатів досліджень Шапко Ю.А. в навчальному процесі дозволило значно підвищити науково-практичну складову дисциплін, що викладаються за темами адитивних виробництв.

Голова комісії



Санін А.Ф.

Члени комісії



Бондаренко О.В.



Ткачов Ю.В.



Хуторний В.В.