

## 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 моноколіс 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 моноколіс 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., Казєєв 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., Казєєв 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>