УДК 621.45.043

DOI:10.15421/452208

ЗАСТОСУВАННЯ СУХОЇ АБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ ПІДБІР МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ЧИСТОВОЇ ОБРОБКИ ЛОПАТОК ЗАКРИТОГО ТИПУ

Ю. А. Шашко[1,3] , С. В. Аджамський[2], С. В. Казєєв[3],
Р. Ф. Максимчук[3],О. В. Кулик[1]

[1]Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара,
(просп. Гагаріна, 72, Дніпро, 49000), Україна
[2]Additive Laser Technology of Ukraine,
(вул. Сергія Подолинського, 31, офіс 202, Дніпро, 49000),Україна
*[3]Flight Control LLC, (просп. Гагаріна, 115, Дніпро, 49050), Україна**

Анотація. Застосування адитивних технологій для виробництва деталей в авіа- та ракетобудуванні з кожним роком набуває все більшого поширення, оскільки даний метод має ряд значних переваг в порівнянні з традиційними технологіями такими як штампування, лиття та механічна обробка та розглядається як альтернативний метод виготовлення. Застосування даного методу дозволяє виготовляти різні деталі ракетно-космічної техніки насамперед робочі колеса турбін з лопатками закритого типу на одному типі обладнання за значно коротший час. Однак не дивлячись на значні переваги адитивних технологій, актуальною залишається проблема шорсткості та забезпечення кінцевої якості поверхні незалежно від просторового розташування елементів деталі. Причиною цьому є обмежений доступ традиційного ріжучого інструменту типу фрез чи шліфувальних головок. До цього часу традиційною технологією обробки подібних деталей типу закритих лопаток був метод електроерозійної обробки (ЕЕО), однак даний спосіб має ряд значних недоліків таких як: енергетичні затрати, складність підготовки технологічного процесу, складність виготовлення інструменту та реалізацію обробки. Метою роботи було вивчення можливостей застосування струменево-абразивної обробки і її різновидів (бластінг) та підбір абразивного матеріалу для забезпечення необхідної якості та шорсткості поверхні лопаток. У даній статті наведені результати експериментальної роботи по вивченню однократного короткотривалого механічного впливу абразивних матеріалів в середовищі стисненого повітря на зразки матеріалу зі сплаву Inconel 718 під певними кутами атаки. Отримані результати будуть використані при розробці реального технологічного процесу обробки проточних частин лопаток закритого типу та подальше впровадження у виробництво.

Ключові слова: ШОРСТКІСТЬ, БЛАСТІНГ, 3D-ДРУК, АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ, ЛОПАТКИ, АБРАЗИВНІ МАТЕРІАЛИ, АБРАЗИВНО-СТРУМЕНЕВА ОБРОБКА.

APPLICATION OF DRY ABRASIVE MACHINING AND EXPERIMENTAL SELECTION OF MATERIALS FOR FINISHING OF CLOSED-TYPE BLADES

Yu. Shashko[1,3], S. Adzhamsky[2], S. Kazeev[3],
R. Maksimchuk[3], A. Kulik[1]

[1]Oles Honchar Dnipro National University,
(Gagari Avenue, 72, Dnipro, 49000), Ukraine
[2]Additive Laser Technology of Ukraine,
(street Serhiy Podolinsky, 31, office 202, Dnipro, 49000), Ukraine
[3]Flight ControlPropulsion, (115 Gagarin Avenue, Dnipro, 49050), Ukraine

Annotation. The use of additive technologies for the production of parts in aircraft and rocket manufacturing is becoming more widespread every year, since this method has a number of significant advantages over traditional technologies such as stamping, casting and machining and is considered as an alternative manufacturing method. The application of this method makes it possible to manufacture various parts of rocket and space technology, first of all, impellers of turbines with closed-type blades on one type of equipment in a much shorter time. However,

© Ю. А. Шашко, С. В. Аджамський, С. В. Казєєв,
Р. Ф. Максимчук, О. В. Кулик

despite the significant advantages of additive technologies, the problem of roughness and ensuring the final surface quality, regardless of the spatial arrangement of the part elements, remains relevant. The reason for this is limited access to traditional cutting tools such as milling cutters or grinding heads. Until now, the traditional technology for processing such parts such as closed blades has been the method of electrical discharge machining (ESM), however, this method has a number of significant disadvantages, such as: energy costs, the complexity of preparing the process, the complexity of tool manufacturing and processing implementation. The purpose of the work was to study the possibilities of using jet-abrasive processing and its varieties (blasting) and the selection of abrasive material to ensure the required quality and roughness of the surface of the blades. This article presents the results of experimental work on the study of a single short-term mechanical action of abrasive materials in a compressed air environment on material samples from the Inconel 718 alloy at certain angles of attack. The results obtained will be used in the development of a real technological process for processing the flow parts of closed-type blades and subsequent implementation in production.
Key words: ROUGHNESS, BLASTING, 3D PRINTING, ADDITIVE TECHNOLOGIES, BLADES, ABRASIVE MATERIALS, ABRASIVE BLASTING.

Вступ

Активна комерціалізація космосу та високий рівень конкуренції з кожним роком збільшується, залучення колосальних інвестицій сприяє розвитку даної тенденції. В умовах високої конкуренції та зниження об`ємів виробництва, важливим завданням є пошук нових методів та підходів до виготовлення та обробки деталей ракетно-космічної техніки.

В умовах одиничного та дрібносерійного виробництва перспективним методом, який набуває широкого застосування є адитивні технології, які за якістю не поступаються виготовленої продукції не поступаються традиційним методам таким як лиття або штамповка.

Не дивлячись на те, що адитивні технології вимагають використання складного наукомісного, високовартісного обладнання, даний метод має ряд переваг що дозволяє спростити та прискорити процес виготовлення з мінімальним припуском на обробку та меншою собівартістю. Одними зі значних переваг даного методу є: покращені властивості готової продукції, значна економія сировини, можливість виготовлення деталей зі складною геометрією, мобільність виробництва, тощо [1]. Однак не дивлячись на ці переваги, залишається проблема шорсткості поверхонь, особливо це проявляється на складнопрофільних деталях таких як закриті лопатки турбін.

В роботі [2] в результаті дослідження було виявлено залежність шорсткості від просторового розташування деталі при друкові та не залежить від форми. Найменша шорсткість при друкові, яку вдалося отримати на вертикальних поверхнях становила Ra 1,6…2,5. Чим більше поверхня відхиляється від вертикалі тим більша величина шорсткості. Необхідна шорсткість лопаток для забезпечення надійної роботи турбіни та необхідних характеристик становить Ra 0,63 [3]. Тому для забезпечення належної якості поверхонь закритих лопаток є актуальним проблемою по причині ускладненого а подекуди неможливого доступу інструменту до оброблюваної поверхні. Для стимуляції розвитку технології обробки необхідний пошук нових методів та технологічних рішень для виготовлення подібних деталей з високою якістю.

Постановка задачі досліджень

Автором роботи [4] було зазначено, що від шорсткості поверхні залежить якість наступних технологічних операцій, таких як: термічна обробка, нанесення захисних плівок та покриттів. Профіль закритих лопаток турбін має свої особливості геометрії (нависаючі та похилі частини, тонкі стінки, радіусні поверхні, мінімальні розміри міжлопаткових каналів) вимагають спеціальних умов обробки поверхонь для забезпечення заданої шорсткості, що регламентується конструкторською та технологічною документацією. З огляду на високі вимоги до деталі даної конструкції була проведена експериментальна робота з вивчення можливостей використання струменевої обробки та підбору необхідного абразивного матеріалу. Об’єктом дослідження є процес

змінишосткості поверхні закритих лопаток турбіни турбонасосного агрегата виготовленого зі сплаву Inconel 718 адитивним методом.

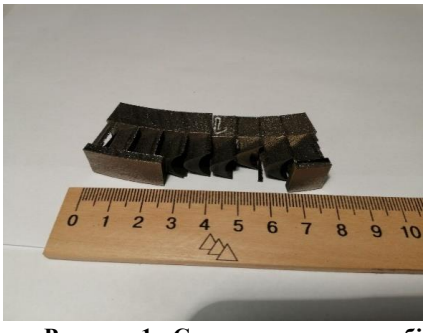


Рисунок 1 - Сегмент лопатки турбіни

Як видно на рис.1, поверхня деталі має нерівномірну шорсткість, яка не задовольняє експлуатації та конструкторської документації. Виходячи з проблематики питання основним завданням є обґрунтування можливості адаптації піскоструменевої обробки для забезпечення необхідної якості поверхні лопаток та визначення відповідного абразивного матеріалу.

Вирішення завдання

Проаналізувавши існуючі та доступні методи обробки було прийнято рішення про детальне вивчення абразивно-струменевої обробки та адаптацію для вирішення проблеми забезпечення необхідної шорсткості та якості поверхні.

Піскоструменева обробка - це метод холодної обробки поверхні, каменю, скла, металевих виробів шляхом пошкодження її поверхні піском або іншим абразивним порошком, що розпилюється потоком повітря або повітря з водою (пневмогідроструменевий метод). Даний метод був вперше запатентований американцем Бенджаміном Чу Тилгманом (1821-1901) в 1870 році (патент США 108408) [5].

Сутність технології

При струменевій обробці частини прискорюються з абразивноструменевого обладнання за допомогою енергії стисненого повітря. Для високої ефективності абразивноструменевої обробки потрібна професійна майстерність, високоякісне обладнання та контроль якості. Кожний елемент впливає на результат роботи всієї системи. Даний спосіб обробки дозволяє очищувати поверхню від різних забруднень, бітуму, окалини, іржі та іншого. Частини для струменевої обробки традиційно мають гострі грані що дозволяє змінювати шорсткість та форму поверхні деталі.

Можливості піскоструменевої оброрбки та її різновиду – бластінгу (обробка м'яким абразивом) дуже різноманітні [6]. Нові більш м'які види абразивів (включаючи пластик та пшеничний крохмаль), а також спеціальне абразивно-струминне обладнання з низьким тиском використовується для сухого способу видалення покриттів з сучасних композиційних матеріалів. Це дозволяє очищати корпуси літаків, гелікоптерів, кузови легкових та вантажних автомобілів, човнів тощо. Крім того даний метод є екологічно чистим, виключає можливість впливу на працівників токсичних речовин, що дозволяє уникнути затрат на їх утилізацію. Також абразивно-струменевий метод обробки застосовувався для лопаток турбін реактивних двигунів (посилання на статтю) в якості середовища використовується струмінь води під тиском, що дозволило отримати рівномірно матову поверхню з величиною шорсткості Ra 0,5 [7].

Експериментальна частина

Конструкція сегменту турбіни відмінна від одинарної авіаційної лопатки що ускладнює можливість обробки. Для проведення експериментальних робіт як зразки сегментів турбіни так і плоскі зразки-свідки були виготовлені з ідентичного матеріалу Inconel 718.

Для відповідності експлуатаційним вимогам згідно конструкторської документації всі зразки пройшли необхідні етапи термічної обробки, що включають в себе загартовування та старіння згідно стандарту SAE AMS 5664, що дозволило

отримати твердість дослідних зразків на рівні 46 HRC (рис.2)



Рисунок 2 - Сегмент турбіни після термічної обробки

Шорсткість обох типів зразків майже однакова, величини на рівні 3-4 класу.

Виходячи з обмеженої кількості зразків та раціональності використання досліджуваного матеріалу експериментальні роботи проводилися на плоских зразках. При аналітичному відборі було обрано сім видів абразивних матеріалів майже однієї фракції, але різні за твердістю та походженням (як штучні так і природні), одним з критеріїв відбору була доступність та вартість в порівнянні з традиційними абразивами типу електрокорунд.

Для проведення експерименту використовувалась камера струменевого очищення, з пневматичним обладнанням робочий тиск якого становив 10 атм. В якості інструменту використовувалося сопло та оснащення власної конструкції, щоб проводити обробку як у фіксованому стані інструменту, так і в ручному. Беручи до уваги якість та характер механічного впливу на зразки, для контролю шорсткості традиційні інструменти типу профілометрів застосовувати не правильно, а інколи і недоцільно, оскільки це може призвести до пошкодження та виходу з ладу самого приладу. В якості контролю отриманих величин використовувався метод тіньового перетину що реалізується за допомогою мікроскопу МИС-11. Даний метод дозволяє завдяки методиці розрахунку відносно точно визначити середню величину шорсткості.

З семи обраних абразивів було чотири, характер взаємодії зі зразками яких було вивчено більш детально.

На рис. 4а и 4б зображено зразки з зонами обробки; номер зони обробки відповідає номеру зразка абразиву.

Перед початком експерименту було виконано вимірювання шорсткості поверхні зразка після 3D-друку (див.рис.3).

Величина апертури при вимірюванні становила 0,13, що відповідає коефіцієнту k=0,85.

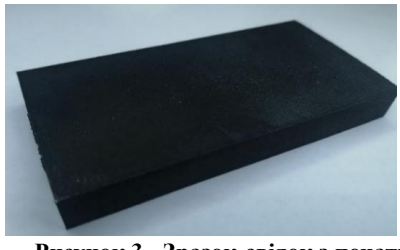


Рисунок 3 - Зразок-свідок з початковою шорсткістю

В результаті вимірювання були отримані величини висот та впадин мікровиступів в певному полі зору зразка:
H_1=37 мкм; H_2=45 мкм; H_3=42 мкм;
H_4=14 мкм; H_5=39 мкм; H_6=36 мкм;
H_7=37 мкм; H_8=50 мкм; H_9=50 мкм;
H_{10}=46 мкм;

Розрахунок середнього значення здійснювався за формулою (1)

$$H_{ср} = \frac{H_{1\ldots}+H_{10}}{10} = 39{,}6 \text{ мкм} \quad (1)$$

Розрахунок Rz за формулою (2).

$$R_z = H_{cp} \cdot k \quad (2)$$

Rz=39,6·0.85=33.66

Перерахунок параметру Rz в Ra за формулою (3) і (4).

$R_a = \frac{R_z}{4}$ – для грубих поверхонь (3)

$R_a = \frac{R_z}{5}$ - для більш чистих поверхонь (4)

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

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

Перевірку вимірювань проводимо завдяки заміні апертури на 0,3, з використання формул 1-4.

Апертура 0,3 коефіцієнт k=0,47:
H_1=50 мкм; H_2=65 мкм; H_3=75 мкм;

H_4=55 мкм; H_5=40 мкм; H_6=60 мкм;
H_7=65 мкм; H_8=80 мкм; H_9=80 мкм;
H_{10}=75 мкм;

$$H_{ср} = \frac{H_{1\ldots}+H_{10}}{10} = 64{,}5 \text{ мкм} \quad (1)$$

$$R_z = H_{cp} \cdot k \quad (2)$$

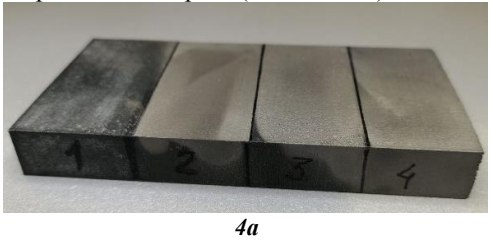
Rz=64,5·0.47=30.315

Перерахунок параметру Rz в Ra за формулою (3)

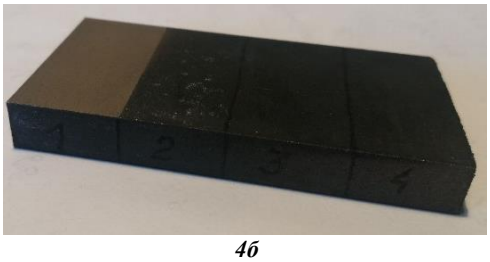
$$R_a = \frac{30{,}315}{4} = 7{,}578$$

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

Таким чином виконавши подібні розрахунки для чотирьох зон обробки дозволили розрахувати шорсткість та зрозуміти на яку величину змінилась шорсткість поверхні (див. табл. 1).



4а



4б

Рисунок 4 - Зразки-свідки (а і б) з розділенням зон обробки

Таблиця 1 - Результати експериментального відбору

Зразок № 1 варіант а	Ra 8.415 – 4 клас (після 3D-друку)
Зразок № 2 варіант а	Ra 0.8624 – 7 клас
Зразок № 3 варіант а	Ra 3.437 – 5 клас
Зразок № 4 варіант а	Ra 0.71628 – 7 клас
Зразок № 1 варіант б	Ra 4.2417 – 5 клас

Таблиця 2 - Режим обробки зразків

Показник	Значення
Тиск	10 атм
Тривалість обробки	10-15 сек
Кут атаки струменя	10º…15º

Наукова новизна

Вперше для обробки нікелевих сплавів, зокрема Inconel 718, доведено ефективність застосування бластінгу як методу обробки поверхні з метою покращення її властивостей: зниження шорсткості, надання не тільки рівномірного рельєфу та естетичного вигляду, але і підготовку поверхні під нанесення покриття, тощо.

Висновки

Запропонований метод та режим обробки показали найбільші значення заниження шорсткості на зразках, в експериментальний технологічний процес, який буде адаптований під обробку безпосередньо сегментів лопаток турбін.

В результаті однократної обробки зразків деякі з абразивних матеріалів дозволили понизити початковий клас шорсткості на три класи. Це є підтвердженням, того що струменева обробка та її комбінації (бластінг) можуть використовуватися не тільки для очищення поверхні, але і для покращення її морфології поверхні після друку, гнучкого коригування шорсткості та активації поверхні для нанесення жаротривких покриттів. Даний метод має значні перспективи широкого застосування для обробки деталей подібної конструкції, одними з його переваг над традиційними методами такими як ЕЕО є: простота процесу, відсутність використання складного та високовартісного обладнання, високовартісних матеріалів та високий рівень екологічності.

В наступних роботах, будуть висвітлені більш детальні дані стосовно абразивних матеріалів режимів обробки та результати обробки безпосередньо лопаток турбін.

Бібліографічні посилання

1. Ю.А. Шашко, О.В. Кулик, С.В. Казєєв, С.В. Аджамський Аналіз можливості та перспективи використання методу бластінгу при чистовій обробці закритих лопаток моноколіс турбін , виготовлених адитивним методом за технологією SLM.: Вісник Дніпровського університету серія: ракетно-космічна техніка, №4, випуск 24 2021. С. 132-137.

2. Горбатов И.В. Орлов Ю. А., Антюфев В. А., Тельгерекова Т. В., Орлова Н. Ю. Определение геометрической точности и шероховатости поверхности малогабаритных деталей круглого и квадратного сечения, получаемых в зависимости от расположения в рабочем пространстве принтера по технологии селективного лазерного плавления из стали марки 12Х18Н10Т: Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей», №1, 2019. С. 59-67.

3. Аджамский, С.В. Песрпективы применения аддитивных технологий в авиа и ракетостроении [текст] / С.В. Аджамский, А. А. Кононенко, Р. В. Подольский// Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2020. - №7 (167). – С. 59-65. DOI: 10.32620/aktt.2020.7.09

4. Елизаров Д. Б., Полянский С.Н., Бутаков С.В. Применение струйных технологий в производстве. Инновационные технологии в науке и образовании: материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. (Чебоксары, 24 июля 2016 г.). редкол.: О.Н. Широков [и др.]. Чебоксары. 2016. С. 180-182

5. http://gravitukraine.com/news/piskostrumienievie-ochishchiennia-povierkhon_n (дата звернення 05.06.2022).

6. Andreas W. Blasting and Coating of Steel Structures: Germany. 2018. 205 c. DOI 10.1016/B978-1-85617-395-7.X5000-8.

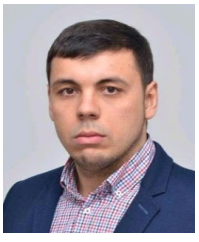
7. Елизаров Д. Б. Применение струйных технологий в производстве [Текст] / Д.Б. Елизаров, С.Н. Полянский, С.В. Бутаков // Инновационные технологии в науке и образовании : материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. (Чебоксары, 24 июля 2016 г.) / редкол.: О.Н. Широков [и др.] – Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2016. – 180-182 с.

Надійшла до редколегії 21.12.2020р.

Відомості про авторів



Шашко Юрій Анатолійович. Україна. Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара. Аспірант; інженер технолог «Flight Control LLC»
Сфера інтересів - технології виробництва літальних апаратів, адитивні технології



Аджамський Сергій Вікторович.
Україна
PhD, LLC «Additive Laser Technology of Ukraine»; технічний директор
Сфера інтересів - адитивні технології



Казєєв Сергій Володимирович.
Україна .«Flight Control LLC»; головний технолог
Сфера інтересів – технології машинобудування



Кулик Олексій Володимирович Україна. Дніпровський національний університет ім. Олеся Гончара. Кандидат технічних наук. Доцент кафедри технології виробництва
Сфера інтересів - технології виробництва літальних апаратів, аерокосмічна техніка



Максимчук Роман Федосійович Керівник відділу турбонасосних агрегатів КБ « Flight Control LLC» Сфера інтересів – конструювання та проектування турбонасосних агрегатів