

УДК 621.791.725

Ю.А. Шашко, О. В. Кулик, А.Ф. Санін

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

ВИКОРИСТАННЯ АДТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ЗАГОТІВОК ДИСКІВ ТУРБІН ТУРБОНАСОСНИХ АГРЕГАТИВ

В даній роботі приведені результати науково-дослідної роботи, головним завданням якої, була оцінка можливостей та перспектив використання Direct Metal Laser Sintering-технологія прямого спікання порошку) DMLS для виготовлення заготовок дисків турбін турбонасосів з лопатками (ротор турбіни) , а також проведення аналітичної роботи для виявлення як переваг так і недоліків, над іншими традиційними методами.

Ключові слова: технологічність, оснащення, диск турбіни, метод DMLS, KBM.

В данной работе приведены результаты научно-исследовательской работы, главной задачей которой была оценка возможностей и перспектив использования Direct Metal Laser Sintering - технология прямого спекания порошка) DMLS для изготовления заготовок дисков турбин турбонасосов с лопатками (ротора турбины), а также проведение аналитической работы для выявления как преимуществ, так и недостатков над другими традиционными методами.

Ключевые слова: технологичность, оснащение, диск турбины, метод DMLS, KIM.

This paper presents the results of research work, the main task of which was to assess the possibilities and prospects of using Direct Metal Laser Sintering - the technology of direct sintering of powder) DMLS for the manufacture of blanks for turbine turbine disk blades with blades (turbine rotor), as well as conducting analytical work to identify both advantages and disadvantages over other traditional methods.

Keywords: manufacturability, equipment, turbine disk, DMLS method, MUF.

Вступ. Ротор турбіни – це диск із рядом робочих лопаток, який має профільну частину і стовщений обід, на якому кріпляться робочі лопатки. Ротор є однією з найбільш відповідальних деталей турбонасосних агрегатів (ТНА), що призначений для приведення в роботу насосів, які подають компоненти палива до двигуна, матеріал диска турбіни та лопаток повинен задовольняти ряд технологічних вимог: володіти достатньою жаростійкістю, високими ливарними властивостями, добре зварюватися та оброблятися різанням, а також конструктивним вимогам: працювати у високотемпературному середовищі корозійно-активних газів, важливо також зберігати високу міцність і надійність [11].

Матеріал який традиційно застосовується для виготовлення дисків турбін це сталі - 30ХГСА, 18ХН4ВА, ОХНЗМ, 37Х12Н8Г8МФБ(ЭП 481) та сплави ХН77ЮР(ЭП 437Б), ХН70ВТЮ (ЭИ 617), ХН65МВТКЮЛ (ЖС6К) та матеріал

лопаток – 12Х18Н9Т, 30ХГСА, 4Х14Н14В2М (ЭИ69) та ВЛ7-20, ЖСЗ [11].

Однак забезпечення цих вимог, серед іншого, забезпечується використанням унікальних і наукомістких технологій виготовлення як штампування заготовок дисків турбін так і методів подальшого їх складання з лопатками, зварювання (рис.1), випробування, наявності спеціального технологічного обладнання, пристосувань (рис.4) і працівників високої кваліфікації. Наслідком цього є те, що в собівартості ротора турбіни найбільша складова – це технологічна собівартість.

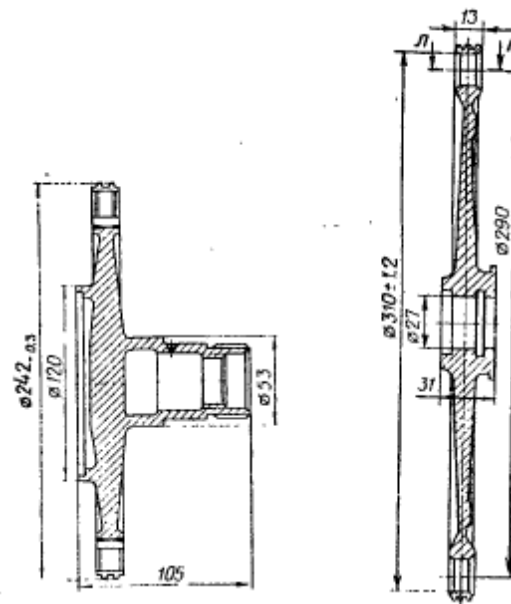


Рис.1. Конструкція зварного і литого диска [11]

Для найбільш поширених з конструкцій ротора турбіни, на сьогоднішній день, традиційний метод виготовлення оболонок – це штампування заготовок дисків турбін в закритих штампах (рис.3), механічна обробка дисків турбін (рис.4), виготовлення лопаток, з'єднання лопаток з диском шляхом паяння або зварюванням (рис.2), велика кількість контрольних операцій, але через невеликі обсяги виробництва даний метод втрачає свою привабливість по причині високої собівартості одного ротора турбіни.

Основною метою роботи є порівняльний аналіз існуючих технологій виготовлення ротору турбіни ТНА і дослідження можливості зниження технологічної собівартості шляхом використання сучасних адитивних технологій методом DMLS (метод прямого спікання порошку).

Метод DMLS дозволяє надрукувати в прямому сенсі ротор турбіни одночасно виконаний з лопатками, при цьому значно зменшити кількість засобів технологічного оснащення і кількість переобладнання обладнання, на порядок менша собівартість виготовлення, суттєве скорочення виробничого циклу.

В роботі розглянутий склад технологічного обладнання та пристосувань для виробництва ротора турбіни DMLS методом, необхідне оснащення та матеріал.

Для забезпечення достойної конкурентної спроможності продукції ракетно-космічної промисловості України на міжнародному ринку, враховуючи сучасне становище даної галузі, потрібно знаходити нові рішення які позитивно вплинуть на технологічність та собівартість виробів РКТ.

Актуальність проблеми. Ротори турбін ТНА для двигунів ракет-носіїв (РН) є відповідальними деталями, яким властиві високі вимоги до їх міцності, здатності працювати в середовищі високотемпературних корозійно-активних газів, надійності, точності посадкових місць повинна відповідати 7-12 квалітетам, радіального биття зовнішніх посадкових місць відносно осі ротора і центральної виточки отвору або шийки повинно знаходитися в межах 0,001-01, максимальний дисбаланс дисків не більше 5г·см на плече в 100 мм, поверхня диска, задля уникнення концентрації напружень, не повинна мати рисок та різких переходів [11]. Забезпечення цих вимог, серед іншого, забезпечується використанням унікальних і наукомістких технологій виготовлення із залученням спеціального технологічного обладнання, пристосувань і працівників високої кваліфікації а також використання традиційного довготривалого циклу виробництва. Наслідком цього є те, що в собівартості одиниці ротора найбільша складова – це технологічна собівартість.

Традиційний метод виготовлення, включає паралельне використання не тільки декількох технологічних процесів а й паралельно організованих окремих виробництва - виготовлення заготовки диску турбіни штампуванням в закритих штампах або лиття одночасно з лопатками (рис.2), з наступною механічною обробкою з однієї сторони, та виготовлення лопаток турбіни литтям за витоплюваними моделями з механічною чистовою обробкою, з іншої сторони і окремий технологічний процес складання (рис.2) самого ротора турбіни. При традиційному методі лише підготовка виробництва займає декілька діб.

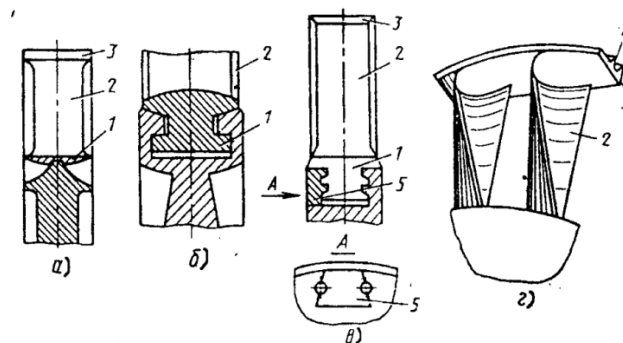


Рис.2. Типи з'єднань лопаток з диском турбіни [11]:
 а - зварюванням; б - Т-подібним замком; в - «ялинковий» замок;
 1-ніжка; 2-перо;3-бандаж;4-гребені ущільнення; 5-замок;

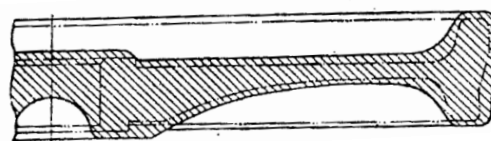


Рис.3. Заготівка диска отримана штампуванням [11].

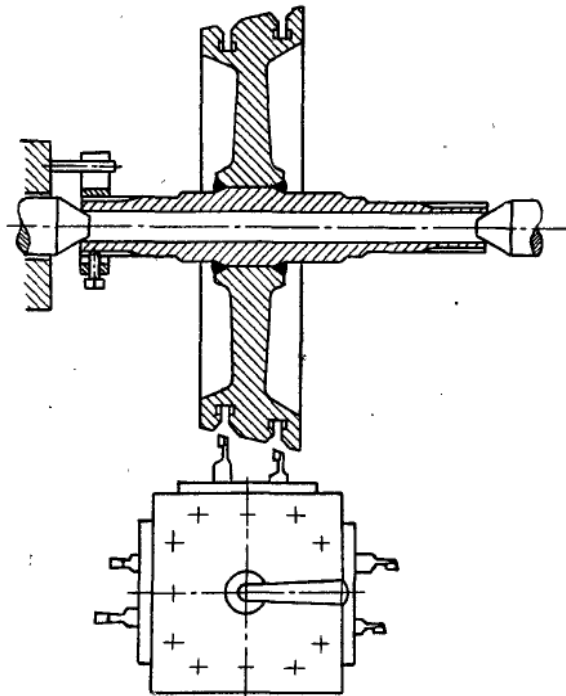


Рис.4. Проточування Т-подібних пазів[11]

Головною перевагою зварних дисків є їх виготовлення з мінімальним кроком лопаток, а недолік – висока трудомісткість механічної обробки замків лопаток та штампованого диска.

Крім того, при зварюванні змінюється положення лопаток в дискові, що порушує геометрію газового тракту та його стабільність. Лиття дисків з лопатками за витоплюваними моделями дозволяє значно знизити трудомісткість виготовлення та підвищити стабільність вихідних параметрів.

При цьому важливо враховувати що, найбільша конструктивна міцність при мінімальній масі диска досягається, коли лопатка виконана як одне ціле з диском і обод виходить легшим. Однак виготовити такі диски складніше, особливо з точки зору отримання точного профілю лопаток.

На кожен турбіню потрібна велика кількість лопаток, тому навіть при дрібно серійному виробництві ТНА доцільно організувати потокове виробництво лопаток з використанням спеціального обладнання та високопродуктивного оснащення. Однак необхідність кріплення окремо виконаних лопаток турбін до диску за допомогою замків ускладнює технологічний процес та збільшує масу диска турбіни (рис.2). Цього недоліку значною мірою уникають шляхом з'єднання лопаток з диском турбіни зварюванням. Наявність на в конструкції коліс турбін такого елемента, як бандаж, виконаного як одне ціле з лопатками, покращує їх характеристики, але виготовити такі лопатки точним литтям за витоплюваними моделями досить складно через наявності похибок закритих профілів обробка лопаток ускладнена.

Сутність технології Direct Metal Laser Sintering.

Direct Metal Laser Sintering, що перекладається як пряме лазерне спікання металу - це один із способів відтворення деталі по її комп'ютерної моделі. Сьогодні в країнах СНД більше вживають термін 3D-друк, він більш образний і зрозумілий для розуміння простого користувача [1].

Цей процес полягає у термічному впливі на металевий порошок лазером, з метою його спікання і утворення на площині єдиної фігури, заданої геометрії. Таким чином виріб будується поступово шар за шаром (рис.5).

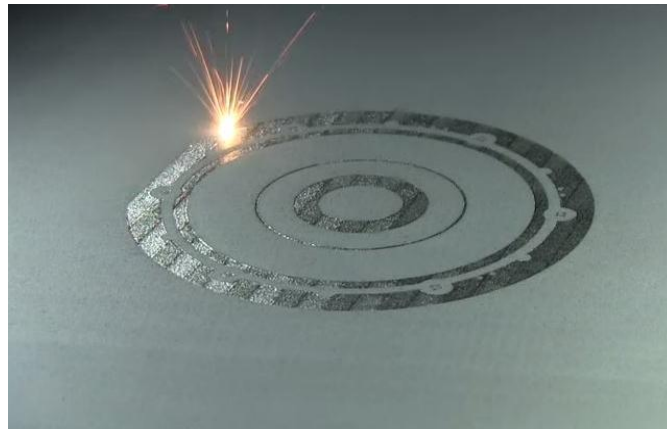


Рис. 5. Побудова шару матеріалу деталі

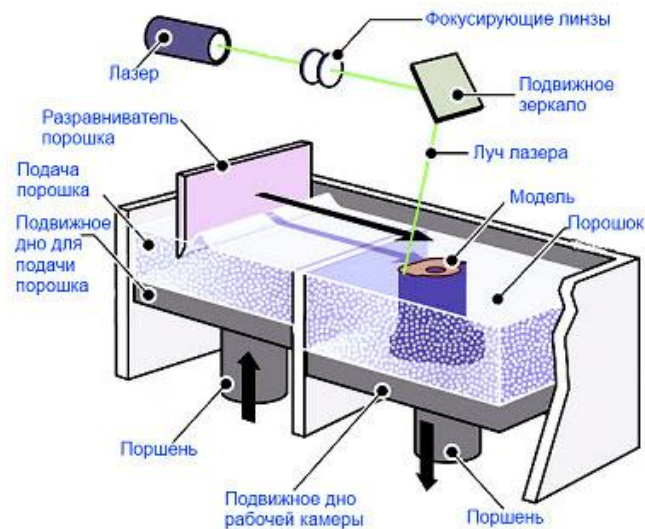


Рис.6. Схема роботи 3D принтера за технологією Direct Metal Laser Sintering

У комп'ютер, підключений до машини, завантажується тривимірна модель в * .stl форматі.

В середині 3D-принтера на спеціальній платформі завантажується і розрівнюється початковий шар з металевого порошку, перший «шар» майбутньої конструкції, товщина якого може складати 0,020 мм або 20 мкм.

Далі, лазером, потужністю від 200 до 1000 Вт, проводиться спікання порошку за координатами, переданих комп'ютером. Таким чином, отримують перший поверх (шар) конструкції. Наноситься другий шар порошку і процес повторюється.

В якості матеріалу використовуємо металевий порошок зі сплаву Inconel 718[2]. Жароміцний сплав, призначений для роботи при температурах до 980 °С, один з найбільш поширених сплавів сімейства інконель. Розроблено та запатентовано (патент США № 3046108 від 24.07.1962), автор Айзелштайн (Eiselstein) [10]. У 1970-ті роки в США на частку сплаву інконель 718 припадало понад 50% валового випуску промислових жароміцних сплавів.

Сплав спочатку застосовувався як обшив очний матеріал для надзвукових літаків [2]. Зміцнення сплаву досягається за рахунок повільного виділення інтерметаліди них сполук нікелю з титаном і ніобієм, сплав легко оброблюються тиском і добре зварюється.

Сплав застосовується для виготовлення лопаток компресора авіаційних двигунів, а також інших деталей.

Таблиця 1

Характеристики сплаву Inconel 718 [2]

Обробка	$t_{\text{вип.}}, ^\circ\text{C}$	Межа міцності $\sigma_{\text{в}}, \text{кгс/мм}^2$	Межа текучості $\sigma_{0,2}, \text{кгс/мм}^2$	Подовження $\delta, \%$	Тривала міцність, кгс/мм^2
Наклеп и старіння при 720 °С 8 год; охолодження в печі до 620 °С 10 год.; охолодження на повітрі	20	153	145	9,5	-
	426	-	-	-	130
	538	-	-	-	88
	648	-	-	-	31
Нагрівання до 950 °С і старіння при 720 °С 8 год.; охолодження в печі до 620 °С 10 год.; охолодження на повітрі	20	145	122	17,3	-
	426	-	-	-	120
	538	-	-	-	102
	648	-	-	-	38
Нагрівання до 1065 °С і старіння при 720 °С 8 год.; охолодження в печі до 620 °С 12 год.; охолодження на повітрі	20	143	124	20,5	-
	426	-	-	-	112
	538	-	-	-	95
	648	-	-	-	53



Рис.7. Заготівка колеса турбіни зі сплаву Inconel 718, виготовленого методом Direct Metal Laser Sintering

Порівняльний аналіз Direct Metal Laser Sintering з традиційними технологіями.

Використання штампування, зварювання та лиття за витоплюваними моделями мають значну кількість переваг до того ж вони добре освоєні, але беручи до уваги сучасне становище та зменшення об'ємів випуску, переваги поступають за кількістю недоліків серед яких: складність процесу, висока собівартість відливок, модельного оснащення, закритих штампів та їх елементів, висока тривалість підготовки, необхідність організації окремого виробництва.

3D-друк за технологією Direct Metal Laser Sintering [1].

Основні переваги:

- вироби можуть мати геометрію будь-якої складності.
- деталі мають меншу вагу, ніж при виробництві методом лиття, за рахунок більшої точності та високого коефіцієнту використання матеріалу.
- висока міцність.
- висока міцність при термічному впливі (сплав Inconel 718).
- короткі терміни на підготовку виробництва.
- можливість отримання деталей складної конфігурації (рис.7);
- точне виконання дрібних елементів деталей;
- можливість побудови двох різних деталей на одній плиті;
- низька собівартість виготовлення;

До недоліків даного методу можна віднести:

- застосування ручної праці при видаленні підтримок;
- габарити деталей обмежені розмірами робочої плити;
- обмежений перелік порошків металів та сплавів для друку ;
- наявність пористості в мікроструктурі (залежить від режимів виготовлення, значно зменшується при термообробці);
- метод неефективний при крупносерійному та масовому виробництві.

Висновки. Традиційні методи виготовлення в сучасних умовах, з урахуванням малих об'ємів виробництва, складності процесу та використання

значної кількості дорогого оснащення та обладнання втрачає свою економічну привабливість.

Аддитивний метод виготовлення за технологією Direct Metal Laser Sintering має значну кількість переваг над традиційними методами, враховуючи значні всі перелічені недоліки, даний метод теоретично має всі передумови для впровадження на виробництві для виготовлення таких відповідальних деталей як турбіни турбонасосних агрегатів, сучасних умовах, повністю замінивши традиційні технології, при цьому позитивно впливаючи культуру виробництва а також на економічну складову технологічного процесу.

Бібліографічні посилання

1. <http://3dprofy.ru/pryamoe-lazernoe-spekanie-metallov-dmls/>
2. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Инконель>
3. В. А. Богуслаев, А.Я. Качан, Н.Е. Калинина и др. Авиационно-космические материалы и технологии. Учебник/.–Запорожье: Мотор Сич, 2007. – 383с.
4. Смуров И.Ю., Мовчан И.А., Ядройцев И.А. и др. Аддитивное производство с помощью лазера // Вестник МГТУ «Станкин». 2011. Т. 2. № 4. С. 144-146.
5. Шишковский И. В. Синтез функциональных изделий из градиентных материалов методом селективного лазерного спекания// Перспективные материалы, 2001, №5.- С.60-64.
6. Назаров А.П. Перспективы быстрого прототипирования методом селективного лазерного спекания /плавления // Вестник МГТУ «Станкин». 2011. Т. 1. № 4. С. 46-52.
7. Hugh Yack. Rapid Prototyping Course/ Version 1/0/ August 31, 2001, Copyright. <http://claymore.Engineer.gvsu.edu/eod/manufact-302.htm/pgfId-510663>.
8. Zinchenko V. P. Information technologies for modeling the layout of a complex technical object / V. P. Zinchenko, D. I. Konotop, A. P. Sidorenko, V. V. Borisov // Information systems, mechanics and control. – 2011. – № 6. – P. 27–35.
9. Кулиш А.М. Структура и свойства образцов из сплава In718, полученных методом коаксиального лазерного плавления // Молодежний научно-технический вестник, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва 2016, 10с.
10. Calleja A., Tabernero I., Lamikiz A. Optimal Parameters for 5-axis Laser Cladding // Procedia Engineering. Vol. 63. 2013. P.45-52. DOI:10.1016/j.proeng.2013.08.229.
11. Воробей В.В., Логинов В.Е. Технология производства жидкостных ракетных двигателей: учебник. –М.: Изд-во МАИ, 2001.-496с.: ил. ISBN 5-7035-2328-1.

Надійшла до редколегії 24.09.2019