

РОЗРОБКА ТРИВИМІРНОЇ МОДЕЛІ ЛОПАТКИ КОМПРЕСОРА ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА, ЯКА ПІДДАЄТЬСЯ ОБРОБЦІ НЕПЕРЕРВНИМ ЛАЗЕРОМ

Запропоновано тривимірну модель лопатки компресора газотурбінного двигуна, яка піддається обробці неперервним променем лазера. Здійснені попередні розрахунки параметрів лазерної обробки поверхні лопатки та температурний розподіл у виробі зі складною конфігурацією поверхні методом скінченних елементів з використанням мультифізичної симуляції. Модель може бути базовою для подальшого відпрацювання оптимальних режимів лазерної обробки лопаток авіаційних газотурбінних двигунів.

Ключові слова: лопатка компресора, неперервний лазер, температурний розподіл, метод скінченних елементів.

Одним з найважливіших завдань сучасного виробництва двигунів є підвищення їх надійності з одночасним збільшенням ресурсу їхньої роботи. Це досягається як вибором нових перспективних жароміцних матеріалів та сплавів, так і оптимізацією методів обробки традиційних матеріалів. Надійність авіа- та газотурбінних двигунів значною мірою залежить від надійності роботи лопаток турбіни та компресора, оскільки вони є найбільш навантаженими деталями. Лопатки піддаються дії статичних, динамічних та циклічних навантажень. Крім цього, лопатки піддаються значному термічному впливу, експлуатуються за умов агресивного газового середовища і піддаються газовій корозії [1]. До них застосовуються підвищені вимоги стосовно структури, хімічного складу, механічних властивостей, геометричних розмірів, а їх матеріали підлягають необхідній сертифікації після великої кількості випробувань, що вимагають значного обсягу робіт та фінансових витрат.

Використання сучасних методів обробки поверхні деталей компресорів та газотурбінних двигунів з традиційних матеріалів, які дозволяють суттєво підвищити їх комплекс фізико-механічних властивостей, не змінюючи при цьому геометричні розміри та хімічний склад матеріалів, є актуальним завданням. Воно є важливим для їх упровадження в технологічні процеси виготовлення деталей цього типу у виробництво як резерв подальшого розвитку методів збільшення зносостійкості [2–7].

Модель

Об'єктом дослідження обрано лопатку компресора, яку виготовлено з титанового сплаву ВТ14 (таблиця 1),

Таблиця 1 – Склад титанового сплаву ВТ14

Fe	C	Si	Mo	V	N	Ti	Al	Zr	O
0,25	0,1	0,15	2,5÷3,8	0,9÷1,9	0,05	86÷92	3,5÷6,3	0,3	0,015

що зміцнюється шляхом проміжного гартування в температурному інтервалі 850–900 °С [8]. Були обрані середньостатистичні геометричні параметри лопатки: висота – 100 мм, ширина хорди – 30 мм, товщина стінки 3 мм. Базуючись на цих розмірах було побудовано тривимірну модель (рис. 1) лазерної обробки, яка дає можливість отримати в поверхневому шарі лопаток аморфну або аморфно-кристалічну структуру, що відповідає вимогам наявності високої поверхневої зносостійкості. До речі метод широко використовували японці для різкого підвищення зносостійкості магнітних головок з твердого пермалою (метод «lazer amorphization»).

У зв'язку з тим, що лопатка має складну геометрію (рис. 1), для вибору параметрів проміжного гартування найбільш ефективним є застосування локальної обробки, яке притаманне неперервному лазеру, що рухається уздовж поверхні виробу. Розмір лазерного променя варіювався в інтервалі 1,5÷15 мм, а потужність випромінювання – в інтервалі 100÷300 Вт.

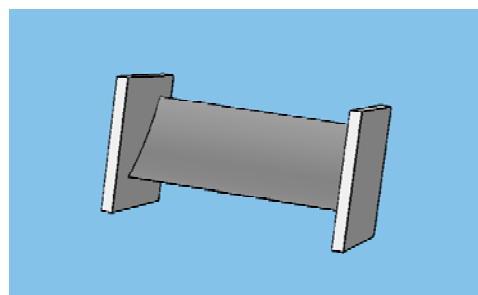


Рис. 1. Тривимірна модель лопатки компресора

Для коректного розрахунку методом скінченних елементів модель піддалася дискретизації на тетраедральні комірки (рис. 2).

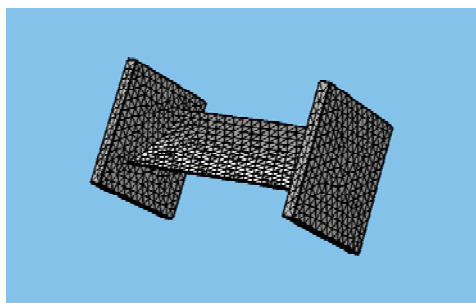


Рис. 2. Схема дискретизації трьохвимірної моделі лопатки на тетраедральні комірки

При цьому було використане рівняння теплопровідності:

$$\frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t} = a \Delta T(\vec{r}, t) + \frac{1}{\rho c} q_v(\vec{r}, t), \quad (1)$$

де $a = \lambda / \rho c$ коефіцієнт температуропровідності, λ – коефіцієнт теплопровідності.

У моделі, на відміну від попередніх моделей [9], обрано лазерний пучок неперервного лазера, що опромінює поверхню (x, y) , має Гаусовий профіль і поширюється уздовж осі z :

$$q(\vec{r}, t) = A q_0' \exp(-\alpha z) \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{r_0^2}\right), \quad (2)$$

де r_0 – радіус пучка, α – коефіцієнт поглинання середовища, q_0 – інтенсивність випромінювання. У моделі враховували стабілізацію температури, оскільки при русі лазерного променя уздовж поверхні до нагріву долучаються увесь час нові ділянки поверхні. Розподіл температури на поверхні в загальному вигляді відповідає залежності:

$$T_0(x, y) = \frac{P}{2\pi k \sqrt{x^2 + y^2}} e^{\frac{V}{2a}(x + \sqrt{x^2 + y^2})}, \quad (3)$$

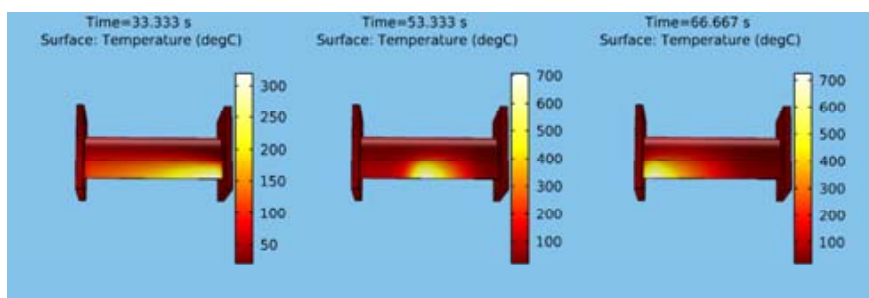


Рис. 4. Схема руху лазерного променя вздовж поверхні лопатки

де $P = qS$ – потужність джерела, S – площа, V – швидкість руху. Особливість нагрівання таким джерелом полягає в тому, що матеріал попереду прогривається слабо, а позаду залишається слабо гаснучий шлейф [10]. Результат залежить від співвідношення ефективного часу дії – тобто часу проходження плямою випромінювання свого діаметра $t_u = d_0 / V$ та теплопровідного часу $t_T = r_0^2 / a$.

Враховуючи особливості застосування методу скінченних елементів, були обрані контрольні точки з максимальними значеннями температур (рис. 3), які використовувалися в подальшому моделюванні [11].

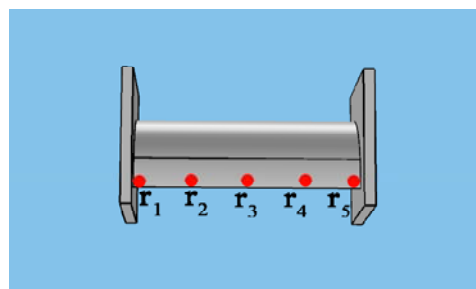


Рис. 3. Схема розміщення контрольних точок на поверхні лопатки

Результати розрахунків та їх обговорення

На рис. 4 схематично зображений розподіл температури від центру дії лазерного променя по поверхні і в глибину при одночасному русі його уздовж поверхні зі швидкістю $1,5 \cdot 10^{-3}$ м/с. Потужність лазерного випромінювання становила 150 Вт (при радіусі пучка 15 мм) і відповідала оптимальним температурним умовам обробки титанового сплаву в режимі зміцнення поверхні лопатки [12, 13].

Розрахунки показують, що для досягнення потрібних умов гартування необхідно $47 \div 57$ с часу. При одноразовому проходженні необхідні температурні умови не досягаються. Розподіл температури в поверхні на різних відстанях від краю лопатки показує, що найкращі температурні умови досягаються при швидкості, що не перевищує $2 \cdot 10^{-3}$ м/с на відстанях з кроком

25 мм від 0 до 50 мм, починаючи з краю лопатки (рис. 6). Збільшення швидкості руху лазера при обраній потужності є неефективним. У цьому випадку необхідно збільшувати потужність лазерного випромінювання або зменшувати швидкість його руху, чи змінювати обидва параметри одночасно за нелінійним законом.

Також були проведені попередні розрахунки розподілу температури в глибину від поверхні лопатки (рис. 6). Вони показують, що робочі температури досягалися на глибині, яка не перевищувала 120–170 мкм, що і визначало товщину зміцненого шару лопатки при обраних параметрах лазерного випромінювання.

Висновки

1. Отже, було створено тривимірну модель, яка дозволяє підібрати параметри лазерного випромінювання та швидкість руху його плями уздовж поверхні для

найбільш ефективного зміцнення лопаток компресора газотурбінного двигуна за обраними температурними умовами.

2. Модель показує адекватну оцінку характеристик і враховує як матеріал виробу, так і його теплофізичні характеристики.

3. Результати розрахунків свідчать про те, що зміцнений поверхневий шар має малу товщину, яка не перевищує 120–170 мкм і є достатньою для підвищення експлуатаційних характеристик лопаток.

За допомогою моделі можна визначити також умови лазерної обробки, а саме кількість проходів лазерного променя для досягнення необхідних результатів, враховуючи швидкість руху по поверхні неперервного променя. Запропонована модель буде корисною для використання у виробництві деталей газотурбінних двигунів.

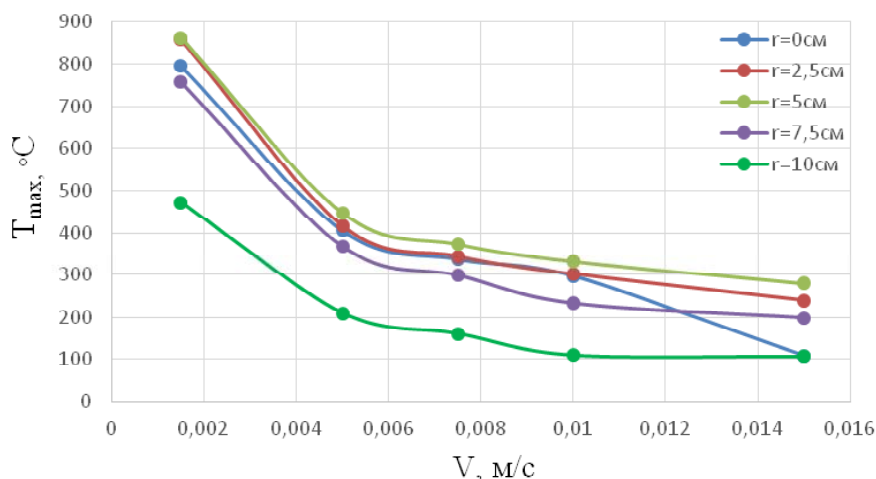


Рис. 5. Розподіл температури в поверхні на різних відстанях від краю лопатки при різних швидкостях руху лазера

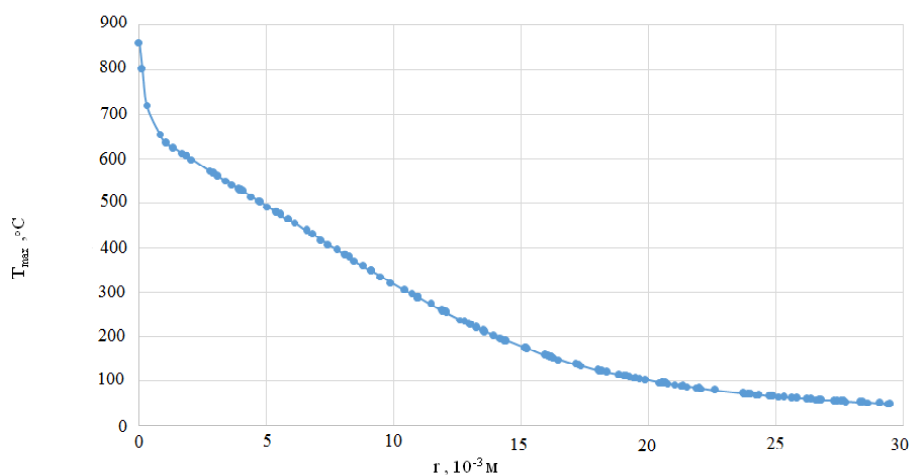


Рис. 6. Розподіл температури у глибину лопатки

Список літератури

1. Крымов В. В. Производство газотурбинных двигателей / В. В. Крымов, Ю. С. Елисеев, К. И. Зудин. – М. : Полет, 2002. – 376 с.
2. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. В 2-х ч. : Ч. 1 «Лопатки компрессора и вентилятора» / [В. А. Богуслав, Муравченко Ф. М., Жеманюк В. И. и др.]. – Запорожье : Издательский комплекс ОАО «Мотор Сич», 2003. – 396 с.
3. Петухов А. Н. Сопротивление усталости деталей ГТД / А. Н. Петухов. – М. : Машиностроение, 1993. – 240 с.
4. Лозицкий Л. П. Конструкция и прочность авиационных деталей / Л. П. Лозицкий. – М. : Воздушный транспорт, 1992. – 535 с.
5. Степанова Л. П. Про створення сприятливої кристаллогеометрії покриттів TiN на авіаційних лопатках з титанових сплавів / Степанова Л.П., Ольшанецкий В. Ю., Пухальська Г. В. // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2015. – № 2. — С. 11–16.
6. Масленников Н. М. Авиационные газотурбинные двигатели / Н. М. Масленников, Ю. Н. Шальман. – М. : Машиностроение, 1975. – 576 с.
7. Братухин А. Г. Современные технологии в производстве газотурбинных двигателей / Братухин А. Г. ; под ред. А. Г. Братухина, Г. К. Язова, Б. Е. Карасева. – М. : Машиностроение, 1997. – 416 с.
8. Титанові сплави в машинобудуванні /Б. Б. Чечулин, С. С. Ушков, И. Н. Разуваева, В. Н. Гольдфайн. – Л. : Машинобудування, 1977. – 248 с.
9. Влияние импульсного лазерного воздействия на перераспределение углерода в стали / [Величко И.Г., Данильченко В.Е., Недоля А.В., Титов И.Г.] // Доповіді НАНУ, 2008. – № 9. – С. 93–98.
10. Либенсон М. Н. Взаимодействие лазерного излучения с веществом / М. Н. Либенсон, Е. Б. Яковлев, Г. Д. Шандыбина. – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2006. – 84 с.
11. Solin P. Higher-Order Finite Element Methods, Washington DC: Chapman & Hall / Solin P., Segeth K., Dolezel I. – CRC Press, 2003. – 408 p.
12. Пат. 2183692 Российская Федерация, C22F1/18 C23C8/16. Способ лазерного упрочнения титана и его поверхности / В. В. Рыбин, В. И. Горынин, В. О. Попов, С. Н. Хомов; В. П. Кулик, А. Л. Пукшанский ; заявитель и патентообладатель : Государственное унитарное предприятие Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей». – № 2000116229/02 ; заявл. 20.06.00 ; опубл. 20.06.02.
13. Пат. 2522919 Российская Федерация, Способ формирования микроструктурированного слоя нитрида титана / Д. В. Абрамов, Д. А. Кочуев, С. А. Маков, В. Г. Прокошев, К. С. Хорьков ; заявитель и патентообладатель : Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых. – № 2013101817/14 ; заявл. 15.01.13 ; опубл. 21.05.14

Одержано 11.06.2016

Воловик Р.А., Недоля А.В., Ольшанецкий В.Е. Разработка трехмерной модели лопатки компрессора газотурбинного двигателя, которая подвергается обработке непрерывным лазером

Предложена трехмерная модель лопатки компрессора газотурбинного двигателя, которая подвергается обработке непрерывным лазером. Проведены предварительные расчеты параметров лазерной обработки поверхности лопатки и температурное распределение в изделии со сложной конфигурацией поверхности методом конечных элементов, используя мультифизическую симуляцию. Модель может быть базовой для дальнейшей отработки оптимальный режимов лазерной обработки деталей авиа- и газотурбинных двигателей.

Ключевые слова: лопатка компрессора, непрерывный лазер, температурное распределение, метод конечных элементов.

Volovik R., Nedolia A., Ol'shanetskii V. The three-dimensional model development of the compressor blade of a gas turbine engine at laser treatment

A three-dimensional model of gas turbine engine compressor blades, which is subjected to continuous laser treatment was proposed. Of the laser treatment parameters of the blade's surface and the temperature distribution in a product with a complex surface configuration using finite element method using multiphysics simulation were preliminary calculated. The model can be a base for further optimization of the laser processing modes parts of air and gas-turbine engines.

Key words: compressor blade, a continuous laser, temperature distribution, finite element method.