

УДК 621.7.044:[004.942+519.6]

ЗАСТОСУВАННЯ АПАРАТУ МЕТОДА СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ ФІНІШНОЇ ОБРОБКИ ПОВЕРХОНЬ ПЕРА ЛОПАТОК АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ

Суворов М.О.

Національний аерокосмічний університет імені М.С. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

У статті представлений стислий огляд методів, процесів і устаткування для фінішної обробки поверхонь пера лопаток авіаційних двигунів. Розглядаються сучасні програмні комплекси і системи автоматизованого проектування і розрахунку в якості інструментів аналізу і візуалізації фізико-механічних складових вищезазначеного технологічного процесу. Перспективне використання апарату конструктивної теорії серендипових апроксимацій та інформаційної технології на її основі для виконання майбутніх поставлених задач.

Ключові слова: фінішна обробка, лопатка компресора, шліфування і полірування, технологічний процес, МСЕ, САПР, серендипів скінченний елемент, інформаційна технологія.

Постановка проблеми. Якість поверхні з точки зору мікрогеометрії в багатьох випадках є визначальним фактором, що впливає на довговічність і надійність деталей машин під час експлуатації. Шорсткість поверхонь лопаток авіаційних двигунів є якісним критерієм довговічності лопаток, витрат палива, а також індикатором потужності роботи безпосередньо двигуна [1]. Інформація про коливання алмазної голки під час переміщення на досліджуваній поверхні є основою для визначення таких параметрів шорсткості, як середньоарифметичного відхилення профілю поверхні (R_a), висоти шорсткості профілю (R_z) і т. п. [2]. Лопатки компресора газотурбінного двигуна (ГТД) відчувають, у загальному випадку, складний комплекс статичних і динамічних навантажень [3]. Точність виготовлення пера лопаток турбін, як і лопаток компресора, регламентується галузевим стандартом ОСТ 1.02571-86 [4]. Якість обробки поверхні пера лопатки істотно впливає на її міцність [5]. Підвищення частоти обробки (при інших рівних умовах) дещо підвищує статичну міцність, особливо крихку, а також границю витривалості. Відомо, що нерівності, одержані під час обробки повер-

хонь, є ефективними концентраторами напружень і можуть в кілька разів знижувати втомну міцність деталі [5].

На вітчизняному АТ «Мотор Січ» широкого розповсюдження набули наступні фінішні технології обробки деталей ГТД [6]: електроалмазне шліфування робочих лопаток, стрічкове шліфування, глибинне шліфування хвостовиків і бандажних полиць турбіни. Були розроблені дві технологічні схеми електроалмазного шліфування пера великогабаритної лопатки з титанового сплаву ВТЗ-1, які мають місце після технологічної операції фрезерування. Шліфування виконувалось профільними алмазними кругами 1А 1300 × 127 × 20 × 5 АС 15... АС20400 / 315 М1-01 з односторонньою (поздовжня) і двосторонньою обробкою (поперечна). Двостороннє електроалмазне шліфування пера вентиляторних лопаток у порівнянні з односторонньою обробкою підвищує продуктивність в 2 рази і точність завдяки компенсації зусиль різання від двох алмазних кругів. Створено спеціальне обладнання: моделі ЗАШП-500 і ЗАШП-1000. Розроблено дві технологічні схеми формоутворення вхідних і вихідних кромки пера абразивною стріч-

кою: вільною гілкою і на контактному роликку. Функціонують спеціальні верстати моделей ЗЛШК-1000 і ЗЛШК-1000А. Технологія глибинного шліфування дозволяє:

- підвищити концентрацію технологічних операцій і за рахунок цього виключити негативний вплив технологічної спадковості;
- підвищити точність взаємного розташування різних ділянок складно профільних поверхонь, їх форми і геометричних параметрів;
- підвищити стабільність параметрів якості поверхневого шару;
- зменшити трудомісткість виготовлення лопаток в 2...2,5 рази;
- забезпечити автоматизацію циклу обробки.

Режими обробки спинки і корита пера лопатки відповідали встановленим для зазначених технологічних операцій критеріям (електроалмазне шліфування + стрічкове шліфування + глянсування сизалевими щітками з абразивними пастами) в серійному виробництві АТ «Мотор Січ». Після операції електроалмазного шліфування виконувалось стрічкове шліфування, величина припуску на якому становила $\delta = 0,1$ мм. Після цієї технологічної операції має місце технологічна спадковість попереднього електроалмазного шліфування. На поверхні корита утворюються залишкові напруження розтягнення, а на спинці – стиснення, що визначається технологічною спадковістю. Під час глянсування сизалевими щітками поверхню спинки і корита знімався припуск δ у діапазоні від 10 до 30 мкм. Після глянсування в поверхневому шарі спостерігаються залишкові напруження стиску з максимальним значенням 300...320 МПа на поверхні і глибиною поширення до 80...100 мкм. Негативний вплив технологічної спадковості можливо виключити шляхом збільшення величини припуску, що нівелюються на наступній операції, на величину, необхідну для виходу з області цього впливу. При цьому на наступній технологічній операції слід застосовувати фінішну обробку, яка в поверхневому шарі утворює стискаючі залишкові напруження. Слід також зазначити, що на стадії останньої технологічної операції фінішної обробки, коли величина припуску, що видаляється знаходиться у діапазоні 10...30 мкм, найбільш суттєво виявляється технологічна спадковість попередніх операцій. Нерівномірність зняття припуску в зазначеному діапазоні призводить до значної нестабільності величини залишкових напружень в поверхневих шарах, що призводить до високого рівня варіації витривалості при випробуванні лопаток на втому. Після електроалмазного шліфування в поверхневому шарі спинки і корита спостерігалась текстура, що свідчить про високий рівень залишкової деформації, що поширюється на глибину до 10...20 мкм. Встановлено, що під час електроалмазного шліфування пера лопатки на більш продуктивних режимах можуть виникати шліфувальні прижоги. Стрічкове шліфування пера лопатки, що виконується після електроалмазного шліфування, створює мікроструктуру в поверхневому шарі без слідів пластичної деформації і шліфувальних прижогів. Глянсування поверхонь пера лопатки сизалевими щітками з абразивними пастами покращує їх мікрогеометрію і мікроструктуру верхніх граничних шарів поверхневого шару.

На ВАТ «Пермському моторному заводі» остаточно обробку профілю пера лопаток виконують на полірувальній бабці полірувальними кругами на повстяній основі, торованими абразивним мікрошліфпорошком із застосуванням полірувальних паст [5]. Вказаний метод обробки має ряд недоліків, а саме:

- нестабільна якість інструменту;
- низька продуктивність обробки;
- остаточна обробка полірувальними кругами призводить до більшої ймовірності появи глибоких одиничних рисок (концентраторів напружень), прижогів і тріщин.

Після аналізу існуючих методів остаточної (фінішної) обробки високоточних деталей, автори [5] прийшли до висновку, що найефективніше полірування – нескінченною стрічкою з абразивної шкурки. Вибір абразивної стрічки пов'язаний з її явними перевагами у порівнянні з полірувальним кругом. Під час полірування абразивною стрічкою у зніманні металу беруть участь велика кількість абразивних зерен, еластично і рівномірно закріплених на полотні у вертикальному положенні (за рахунок нанесення зерна на інструмент в електростатичному полі), поліпшується якість і чистота поверхні, а також виключається можливість появи одиничних рисок. Крім того, температура у зоні різання значно нижче, ніж під час обробки кругом, так як додаються значно менші зусилля для зняття металу. Тепло, яке утворюється в процесі роботи, інтенсивно розсіюється, так як поверхня охолодження більша, що знижує ризик виникнення прижогів і тріщин.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В роботі [7] ретельно розглянуті теоретичні і експериментальні аспекти технологічного процесу тонкого шліфування складнопрофільних поверхонь (створена дослідно-промислова установка СР-300 М). Безумовно, новітній верстатний парк разом із сучасним програмним забезпеченням (в тому числі з контрольно-вимірювальною апаратурою (КВА)) відіграють ключову роль якісних інструментів для фінішної обробки поверхонь пера лопаток ГТД. Заслужують уваги наступні напрями і дослідження: 1. оптимізація процесу стрічкового шліфування на багатокординатних верстатах (шліфувальний верстат Metabo 6NC-1000) з числовим програмним керуванням (ЧПК) [8]; 2. перспективний технологічний процес виготовлення прецизійних компресорних лопаток [9], який містить у собі метод електрохімічного оброблення (ЕХО), варто зазначити результати роботи [10]; а також електролітно-плазмове полірування (комплекс ЕПП-250) і іонно-плазмове зміцнення [11]. Застосування електролітно-плазмове полірування пов'язано з необхідністю видалення поверхневих плівок і мікрорастравів, що виникають під час ЕХО, глибина яких може досягати 1 мкм. Електролітно-плазмове полірування дозволяє виключити появу прижогів у поверхневому шарі, характерних для ручного полірування; 3. схеми опорного одночасного полірування двох матеріалів лопатки, а саме нітрид титанового покриття і основного матеріалу пера лопатки – титанового сплаву [12]; 4. автоматизація технологічних процесів виготовлення лопаток ГТД із застосуванням вимірювальної системи BLAZER [13]. Застосування системи BLAZER в якості ви-

мірвального вузла забезпечить не тільки високу продуктивність, але і можливість перевірки цілісного контуру перерізу у процесі обробки, що запобіжить ненавмисного зменшення хорди і відповідного дефекту. Комплекс перевіряє лопатку і видає інформацію про фізичні поля на поверхні пера, які потребують доопрацювання. Компанією Metroptic розроблено технічне рішення для збереження єдності системи координат, засноване на конструкції спеціальної платформи. Платформу за допомогою плунжерного механізму можна закріпити у будь-якій площині, тобто шліфувати перо лопатки під різними кутами нахилу; 5. питання технологічного забезпечення стабільності заданих параметрів якості поверхневого шару і точності механічної обробки складнопрофільних заготовок методом стрічкового глибинного шліфування (СГШ), а також різноманітного прогнозування результатів обробки на стадіях проектування технологічного процесу [14]; 6. застосування методів дифракції рентгенівського випромінювання для дослідження напружено-деформованого стану (НДС) поверхневих шарів лопаток ГТД [15]; 7. перспективна схема пристрою для фінішної обробки поверхонь пера лопаток авіаційних двигунів [16, 17]. Варто зазначити, що в роботі [17] були розглянуті існуючі схеми пристроїв для обробки пера лопатки авіаційного двигуна, а також запропонована нова схема пристрою шляхом заміни пневматичної системи керування на електромагнітний привід з підвищеними демпфувальними можливостями, підвищеною швидкістю і застосуванням магніострикційних датчиків з більш високою чутливістю, натомість датчика типу «сопло-заслінка».

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Після появи методу скінченних елементів (МСЕ) [18], математики і інженери почали активно (з урахуванням потужностей обчислювальної техніки) застосовувати його у будівельній механіці, машинобудуванні, суднобудуванні, авіабудуванні і т. д. Апарат МСЕ [19, 20] використовується для аналізу і дослідження НДС (в тому числі температурних деформацій, термопружних напружень), польових функцій; і фактично є основоположним інструментом теорії пружності. Математичне забезпечення МСЕ слугує алгоритмічною основою наступних програмних комплексів (ПК) і систем автоматизованого проектування і розрахунку (САПР): Nastran, Штуцер, Ansys, Solid Works, Cosmos, Mars, Maple і т. п. [21]; які, в свою чергу, виступають невід'ємною складовою автоматизованої системи фінішної обробки деталей ГТД (зокрема для фінішної обробки поверхонь пера лопаток). Варто відзначити, у вказаному аспекті, наступні роботи: засоби статичного і динамічного моделювання ПК Ansys [22]; новий метод оцінки шорсткості поверхні за допомогою дослідного комплексу, який включає оптико-електронні засоби і програмне забезпечення, що дозволяє обробляти відеозображення досліджуваних поверхонь [1]; НДС конструктивно неоднорідних лопаток турбомашин при їх вібраціях із застосуванням ПК Ansys [23]; методика визначення деформації заготовок лопаток, які виникають під час операції ЕХО під дією термопружних напружень, які моделюються з використанням ПК ANSYS [10].

Розробка і створення нового покоління ПК (САПР), на основі серендипових скінченних елементів (ССЕ) [19 – 20] високих порядків (2-го, 3-го і 4-го порядків), в якості ефективного і невід'ємного інструменту автоматизованого комплексу фінішної обробки поверхонь пера лопаток авіаційних двигунів є актуальною задачею сьогодення.

Формулювання цілей статті. Основна ціль роботи – перспективне використання апарату конструктивної теорії серендипових апроксимацій та інформаційної технології на її основі для виконання майбутніх поставлених задач.

Виклад основного матеріалу дослідження. Термін «скінченні елементи» (СЕ) увів Клаф [24]. Лагранжеві скінченні елементи (ЛСЕ) мають вузли в середині СЕ. Внутрішні вузли збільшують об'єм обчислень та не використовуються під час ансамблювання скінченних елементів. Вказані недоліки відсутні в ССЕ. Первісна мета створення ССЕ – можливість перетворення довільного чотирикутника у квадрат і зменшення обсягу обчислень за рахунок вилучення «зайвих» внутрішніх вузлів. Такий криволінійний елемент з'явився під час розрахунку споруд у роботі [25] і отримав назву «серендипів скінченний елемент» [21]. Чим вище порядок ССЕ – тим більша точність розрахунку. Квадратний СЕ добре комбінується з трикутним симплексом, утворюючи ефективну сітку МСЕ. При дискретизації плоскої області довільної конфігурації квадратні комірки зручні всередині області, а трикутні – у приграничній смузі [26]. Ключову роль у МСЕ відіграє базисна функція, тому її фізично адекватний вигляд має принципове значення. ССЕ інтерполюють функцію на границі елемента та апроксимують усередині його. Головний недолік стандартних базисів ССЕ [19-20, 25, 27] – протиприродний повузловий розподіл навантаження від одиничної масової сили: у кутових вузлах навантаження від'ємні (парадокс Зенкевича) [19]. Роль стандартних функцій форми (базисів Зенкевича) – подвійна: їх використовують в ізопараметричній техніці. У стандартної моделі додаткових ступенів волі немає, тому що вона сконструйована за «жорсткими» [28] рецептами матричної алгебри в межах інтерполяційної гіпотези Лагранжа [21]. Перші альтернативні (фізично адекватні) моделі ССЕ з'явилися у 1982 році [29-30] через неможливість знайти раціональне пояснення протиприродного повузлового розподілу рівномірної масової сили [21]. Сьогодні існують декілька методів побудови альтернативних моделей [21, 31]. ССЕ із від'ємними навантаженнями у вузлах непридатні для комп'ютерного тестування. Поява альтернативних серендипових моделей, які реалізують адекватний розподіл рівномірної масової сили, пов'язана з розробкою А. Н. Хомченка ймовірно-геометричного методу конструювання базисних функцій [26]. Фактично А. Н. Хомченко започаткував і його послідовники розвинули конструктивну теорію серендипових апроксимацій (КТСА), результати якої конструктивно доводять, що роль базисних функцій ССЕ – потрійна і четверна [21].

Жоден із сучасних САПР не містить у своїй складовій основі альтернативних базисів ССЕ [21]. Результати КТСА закладені (в якості алгоритмічних основ) у двох інформаційних техно-

логіях [32-33] розроблених на Turbo Pascal і C# відповідно, а також у автоматизованій підсистемі [34], розробленій на Delphi.

Сформулюємо два перспективних класи задач досліджень із застосуванням КТСА в аспекті фінішної обробки поверхонь пера лопаток авіаційних двигунів:

1. Тестування (візуалізація) поверхонь (не)стаціонарних фізичних щоднів, тобто польових функцій виду $U(x, y, t) = \sum N_i \times f_i(t)$, N_i – стандартний або альтернативний базис ССЕ, t – час, i – номер вузла, m – кількість вузлів ССЕ, $f_i(t)$ – закон зміни за часом фізичної величини у граничних вузлах ССЕ (залишкові напруження, температура і т. п.). Залежно від технологічного методу (стадії) фінішної обробки пера лопаток (електроалмазне шліфування, стрічкове шліфування, СГШ і т. д.), із використанням сучасної КВА (наприклад рентгенівських дифрактометрів (Xstress 3000 G3R [15]), лазерних інтерферометрів, роботів-маніпуляторів з ганіометрами Xstress Robot, системи BLAZER [13] і т. п.), новітня інформаційна технологія «Тестирование нестационарных температурных полей с динамическими термоэлементами» [33], яка створена на основі КТСА (з використанням фізично адекватних базисів ССЕ), здатна здійснити необхідну візуалізацію (рендеринг у режимі реального часу) польових функцій. Тобто, маючи у розпорядженні множини (спектр) шуканих фізичних величин (залишкові напруження ($\sigma_{ал}$), залишкові напруження розтягнення, термпружні напруження, температура (в тому числі сплеск температури у точках зміни траєкторії руху інструменту [35]) і т. д.) або відповідний закон зміни за часом ($\sigma_{ал} = f(t)$, $T = f(t)$) і т. п., аналітичний вид закону $f(t)$ для яких був знайдений завдяки інтерполяції, екстраполяції, прогнозуванню, індукції тощо) у контрольних точках (КТ) поверхні – можна дослідити градієнт, рельєф, проблемні ділянки, зони концентрації і т. п. відповідного стаціонарного (нестационарного) фізичного поля для шуканої ділянки поверхні пера лопатки, які моделюють польові функції $U(x, y)$ або $U(x, y, t)$. Розглянемо окремо кожен із задач 1-ого класу. В силу ізопараметричного перетворення [21] – область поверхні пера з криволінійною границею не має значення.

1а. Трикутник: 3 вузла (ССЕ · 3) – рис. 1.

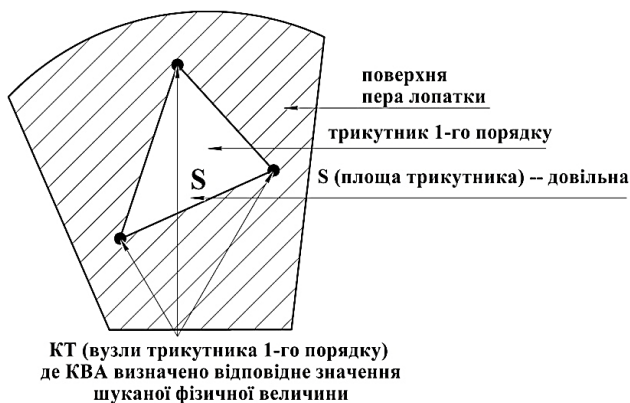


Рис. 1. Трикутна область поверхні пера з трьома КТ (ССЕ · 3)

Відповідний базис [19]:

$N_1(x, y) = L_1; N_2(x, y) = L_2; N_3(x, y) = L_3$, де L_1, L_2, L_3 – барицентричні координати двовимірному симплексу.

1б. Трикутник: 6 вузлів (ССЕ · 6) – рис. 2.

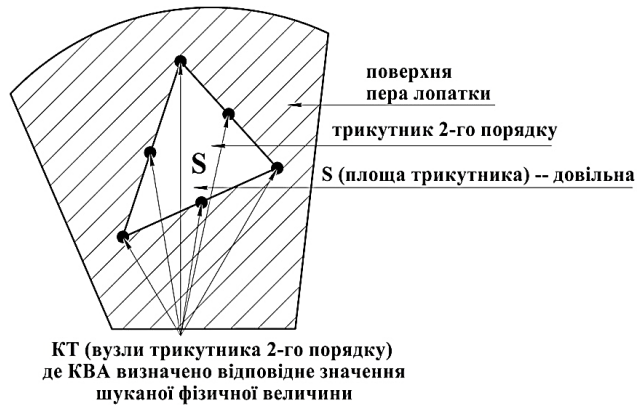


Рис. 2. Трикутна область поверхні пера з шістьма КТ (ССЕ · 6)

Відповідний базис [19]:

$$N_1(x, y) = L_1(2L_1 - 1); N_2(x, y) = L_2(2L_2 - 1); N_3(x, y) = L_3(2L_3 - 1); N_4(x, y) = 4L_1L_2; N_5(x, y) = 4L_2L_3; N_6(x, y) = 4L_1L_3.$$

1в. Квадрат: 4 вузла (ССЕ · 4) – рис. 3.

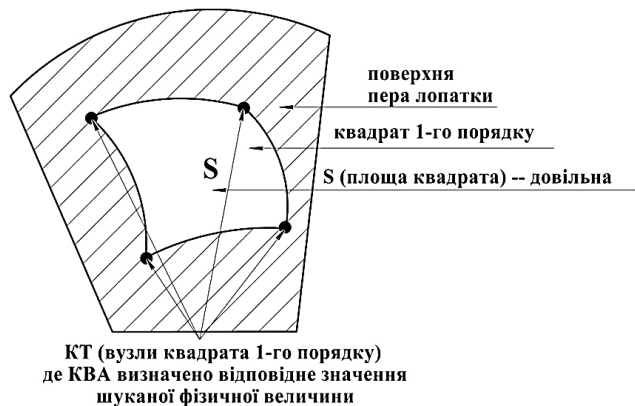


Рис. 3. Квадратна область поверхні пера з чотирма КТ (ССЕ · 4)

Відповідний базис [19]:

$$N_i = \frac{1}{4}(1 + x_i x)(1 + y_i y), \quad x_i, y_i = \pm 1, \quad i = \overline{1, 4}.$$

1г. Квадрат: 8 вузлів (ССЕ · 8) – рис. 4.

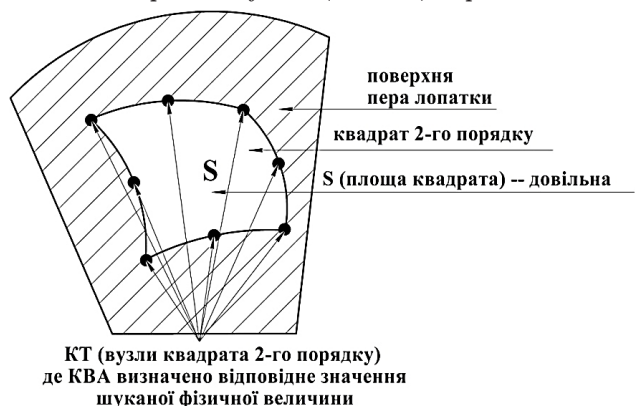


Рис. 4. Квадратна область поверхні пера з вісьмома КТ (ССЕ · 8)

Стандартний базис [36]:

$$N_i = \frac{1}{4}(1 + x_i x)(1 + y_i y)(x_i x + y_i y - 1), \quad x_i, y_i = \pm 1, \quad i = \overline{1, 4},$$

$$N_i = \frac{1}{2}(1 - x^2)(1 + y_i y), \quad y_i = \pm 1, \quad i = 5, 7,$$

$$N_i = \frac{1}{2}(1 - y^2)(1 + x_i x), \quad x_i = \pm 1, \quad i = 6, 8.$$

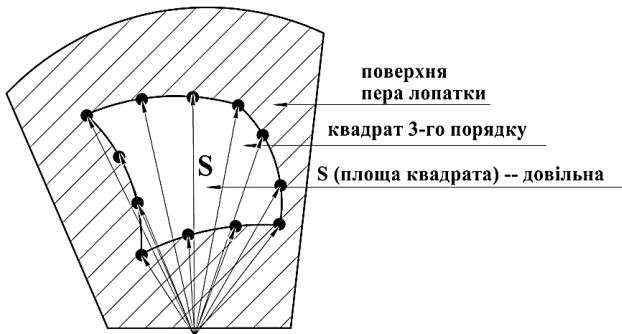
Альтернативний базис [37]:

$$N_i = \frac{1}{4}(1 + x_i x)(1 + y_i y)x_i y_i x y, \quad x_i, y_i = \pm 1, \quad i = \overline{1, 4},$$

$$N_i = \frac{1}{4}(1 - x^2)(1 + y_i y)^2, \quad y_i = \pm 1, \quad i = 5, 7,$$

$$N_i = \frac{1}{4}(1 - y^2)(1 + x_i x)^2, \quad x_i = \pm 1, \quad i = 6, 8.$$

1г. Квадрат: 12 вузлів (CCE · 12) – рис. 5.



КТ (вузли квадрата 3-го порядку) де КВА визначено відповідні значення шуканої фізичної величини

Рис. 5. Квадратна область поверхні пера з дванадцятьма КТ (CCE · 12)

Стандартний базис [38]:

$$N_i = \frac{1}{32}(1 + x_i x)(1 + y_i y)(9x^2 + 9y^2 - 10),$$

$$x_i, y_i = \pm 1, \quad i = \overline{1, 4},$$

$$N_i = \frac{9}{32}(1 - x^2)(1 + y_i y)(1 + 9x_i x), \quad x_i = \pm \frac{1}{3},$$

$$y_i = \pm 1, \quad i = 5, 6, 9, 10,$$

$$N_i = \frac{9}{32}(1 - y^2)(1 + x_i x)(1 + 9y_i y),$$

$$x_i = \pm 1, \quad y_i = \pm \frac{1}{3}, \quad i = 7, 8, 11, 12.$$

Альтернативний базис [29-30]:

$$N_i = \frac{1}{32}(1 + x_i x)(1 + y_i y)(9(1 - x_i x - y_i y)^2 - 1),$$

$$x_i, y_i = \pm 1, \quad i = \overline{1, 4},$$

$$N_i = \frac{9}{32}(1 - x^2)(1 + y_i y)(9x_i x + y_i y),$$

$$x_i = \pm \frac{1}{3}, \quad y_i = \pm 1, \quad i = 5, 6, 9, 10,$$

$$N_i = \frac{9}{32}(1 - y^2)(1 + x_i x)(x_i x + 9y_i y),$$

$$x_i = \pm 1, \quad y_i = \pm \frac{1}{3}, \quad i = 7, 8, 11, 12.$$

Виконаємо демонстрацію (змоделюємо уявний процес) інформаційної технології [33] (рис. 6) для стрічкового шліфування під час сплеску температури у точках зміни траєкторії руху інструменту. Використаємо чотири контрольних точки (CCE · 4). Нехай в 1-ій контрольній точці $T_1 = 250^\circ\text{C}$, в другій $T_2 = 350^\circ\text{C}$, в третій $T_3 = 400^\circ\text{C}$, в четвертій $T_4 = 420^\circ\text{C}$ і площа квадрата $S = 4$.

Польова функція $U(x, y) = \sum_{i=1}^4 N_i \times T_i$ моделює ста-

ціонарне температурне поле. З рисунка 6 можна зробити наступні висновки (з урахуванням повороту отриманої поверхні на дисплеї на 90° відносно барицентра мультиплексу): температурне поле має чіткий градієнт, рівномірний рельєф і зони розподілення температур (червоний колір у кутовому вузлі відповідає температурі 420°C , синій колір у кутовому вузлі – температурі 250°C , зелений колір у кутовому вузлі – 350°C).

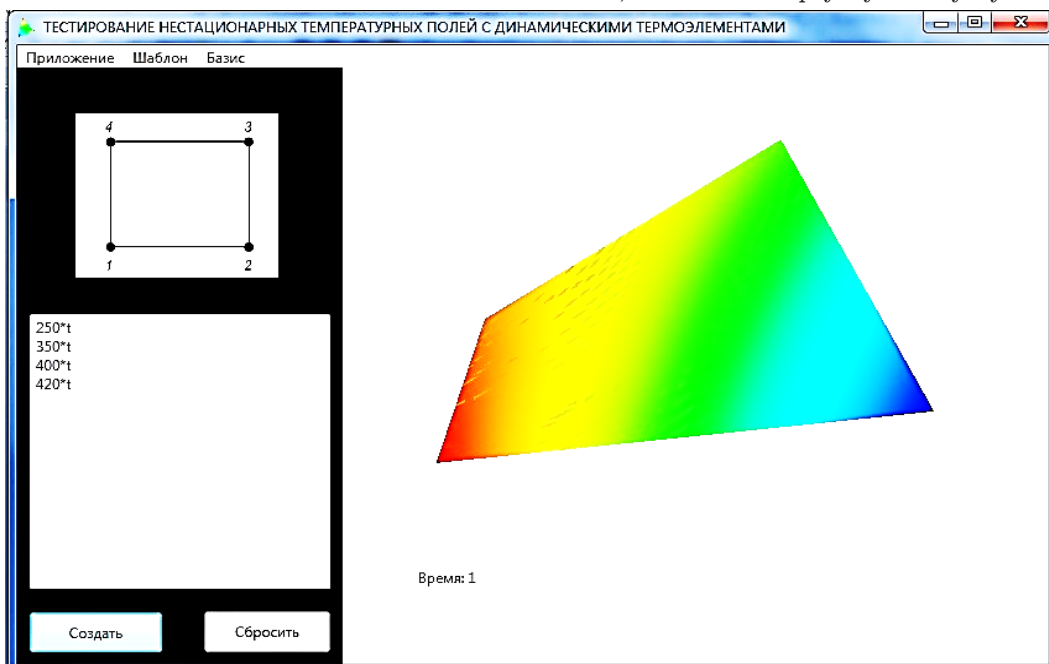


Рис. 6. Скриншот стаціонарного температурного поля

2. Майбутня розробка концепції, архітектури і створення нового ПК (САПР) у МСЕ для розрахунків НДС із залученням альтернативних базисів ССЕ. Названий перспективний ПК повинен стати невід'ємною і якісною структурною ланкою автоматизованого комплексу фінішної обробки поверхонь пера лопаток авіаційних двигунів; в тому числі можливість імплементації для досліджень [8, 13, 16, 17].

Висновки з даного дослідження і перспективи. У статті був зроблений огляд проблем та напрямів розвитку в області фінішної обробки авіаційної лопатки та запропонований новий напрям в області створення новітнього

ПК, який позбавлений недоліків, які присутні в основі вищесказаних системах автоматизованого проектування і розрахунку. Були окреслені два перспективних класи задач із залученням апарату конструктивної теорії серендипових апроксимацій і інформаційної технології на її основі для подальшого виконання їх у відповідності майбутніх вибраних методів (стрічкове шліфування, глибинне шліфування і т. п.) вищеназваного технологічного процесу. Також був змодельований уявний процес інформаційної технології для стрічкового шліфування під час сплеску температури у точках зміни траєкторії руху інструменту.

Список літератури:

1. Абрамов А. Д. Оценка микрогеометрии поверхности лопаток ГТД на основе анализа их автокорреляционных функций / А. Д. Абрамов // Вестник Самарского государственного университета. Серия: технические науки, 2007. – № 2(20). – С. 117-123.
2. Дунин-Барковский И. В. Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности / И. В. Дунин-Барковский, А. Н. Карташова. – М.: Машиностроение, 1987. – 232 с.
3. Нихамкин М. А. Комплексный расчетный анализ прочности лопаток компрессора при их повреждении посторонними предметами / М. А. Нихамкин, М. В. Семенова, О. Л. Любчик // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика, 2010. – № 3. – С. 19-30.
4. ОСТ 1.02571-86. Лопатки компрессоров и турбин. Предельные отклонения размеров, формы и расположения пера. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 36 с.
5. Макаров В. Ф. Математическое моделирование процесса полирования лопаток газотурбинных двигателей / В. Ф. Макаров, Е. Н. Бычина, А. О. Чуян // Авиационно-космическая техника и технология, 2011. – № 8. – С. 11-14.
6. Богуслаев В. А. Финишные технологии обработки деталей ГТД / В. А. Богуслаев, А. Я. Качан, В. Ф. Мозговой // Информационно-аналитический международный технический журнал «Промышленность в фокусе», 2013. – № 12. – С. 36-41.
7. Сергеев В. М. Разработка и внедрение технологического процесса тонкого шлифования сложнопровильных поверхностей со стабилизацией режимов обработки: дис. канд. техн. наук: 05.07.04 / Валерий Михайлович Сергеев. – Харьков, 1990. – 192 с.
8. Коряжкин А. А. Оптимизация процесса ленточного шлифования на многокоординатных станках с ЧПУ / А. А. Коряжкин // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета, 2011. – Т. 15. – № 3(43). – С. 84-89.
9. Галиев В. Э. Перспективный технологический процесс изготовления прецизионных компрессорных лопаток / В. Э. Галиев, Д. З. Фаткуллина // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета, 2014. – Т. 18. – № 3(64). – С. 97-105.
10. Смелов В. Г. Повышение эффективности ЭХО лопаток компрессора ГТД на основе компьютерного моделирования подготовки производства: дис. канд. техн. наук: 05.07.05 / Виталий Геннадиевич Смелов. – Самара, 2007. – 253 с.
11. Смыслов А. М. Влияние ионной имплантации и плазменной поверхностной обработки на эксплуатационные характеристики жаропрочного никелевого сплава / А. М. Смыслов, А. А. Быбин, Р. Р. Невьянцева // Физика и химия обработки материалов, 2007. – № 3. – С. 29-34.
12. Михайлов А. Н. Особенности полировки лопаток ГТД с эрозионно-коррозионными разрушениями вакуумных ионно-плазменных покрытий под напыление нового покрытия / А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов, А. П. Недашковский // Прогресивні технології і системи машинобудування, 2014. – № 1(47). – С. 207-212.
13. Гальперин В. Быстродействующая система для измерения геометрии лопаток ГТД BLAZERTM / В. Гальперин, В. Карповский // Станочный парк, 2013. – № 4(103). – С. 28-29.
14. Пирозерская О. Л. Разработка научно-методического аппарата прогнозирования точности и качества обработки сложнопровильных заготовок методом ленточного глубинного шлифования и технологических рекомендаций по его применению: дис. канд. техн. наук: 05.03.01, 05.02.08 / Ольга Леонидовна Пирозерская. – Санкт-Петербург, 1999. – 168 с.
15. Яблокова Н. А. Анализ напряженно-деформированного состояния лопаток компрессора из сплава ВТЗ-1 по рентгенодифракционным данным / Н. А. Яблокова // В мире неразрушающего контроля, 2012. – № 4(58). – С. 42-44.
16. Суворов М. А. Совершенствование финишной обработки поверхностей пера лопаток авиационных двигателей / М. А. Суворов // «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні»: Всеукраїнська науково-технічна конференція: тези доповідей. – Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «ХАІ», 2015. – Т. 1. – С. 122.
17. Суворов М. А. Перспективная схема устройства для финишной обработки поверхностей пера лопаток авиационных двигателей / М. А. Суворов, В. Ф. Сорокин // Научно-технический журнал «Вестник двигателестроения», 2016. – № 2. – С. 172-176.
18. Courant R. Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations / R. Courant // Bull. Amer. Math. Soc. – 1943. – V. 49. – № 1. – P. 1-23.
19. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
20. Зенкевич О. Конечные элементы и аппроксимация / О. Зенкевич, К. Морган. – М.: Мир, 1986. – 318 с.
21. Топчий Д. О. The theory of plafales: четверна роль базисних функцій серендипових скінченних елементів. Огляд результатів / Д. О. Топчий // Наукові праці Вінницького національного технічного університету, 2016. – № 2. – С. 1-7.

22. Букатый А. С. Повышение точности изготовления ответственных деталей двигателей средствами статического и динамического моделирования / А. С. Букатый // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2014. – Т. 16. – № 6(2). – С. 374-377.
23. Моргун С. А. Напряженно-деформированное состояние конструктивно неоднородных лопаток турбомашин при их вибрациях: дис. канд. техн. наук: 01.02.04 / Сергей Александрович Моргун. – Запорожье, 2015. – 157 с.
24. Clough R. W. The finite element method in plane stress analysis / R. W. Clough // J. Struct. Div., ASCE. – Proc. 2-d Conf. Electronic Computation. – P. 345-378.
25. Ergatoudis I. Curved isoperimetric «quadrilateral» elements for finite element analysis / I. Ergatoudis, B. M. Irons, O. C. Zienkiewicz // Internat. J. Solids Struct. – № 4. – 1968. – P. 31-42.
26. Астіоненко І. О. Моделі наближення функцій багатопараметричними поліномами серендипової сім'ї: дис. канд. фіз.-мат. наук: 01.05.02 / Ігор Олександрович Астіоненко. – Запоріжжя, 2012. – 200 с.
27. Оден Дж. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред / Дж. Оден. – М.: Мир, 1976. – 464 с.
28. Арнольд В. И. «Жёсткие» и «мягкие» математические модели / В. И. Арнольд. – М.: МЦНМО, 2008. – 32 с.
29. Хомченко А. Н. Некоторые вероятностные аспекты МКЭ / А. Н. Хомченко. – Ив.-Франк. ин-т нефти и газа: Ивано-Франковск, 1982. – 9 с. Деп. в ВИНТИ, № 1213.
30. Хомченко А. Н. Метод конечных элементов: стохастический подход / А. Н. Хомченко. – Ив.-Франк. ин-т нефти и газа: Ивано-Франковск, 1982. – 7 с. Деп. в ВИНТИ, № 5167.
31. Астіоненко І. А. Конструювання багатопараметричних поліномів на бікубічному елементі серендипової сім'ї / І. А. Астіоненко, Е. І. Литвиненко, А. Н. Хомченко // Научные ведомости. Серия: математика, физика. – Белгород: БелГУ, 2009. – Вып. 16. – № 5(60). – С. 15-31.
32. Литвиненко Е. И. Математические модели и алгоритмы компьютерной диагностики физических полей: дис. канд. техн. наук: 05.13.06 / Елена Ивановна Литвиненко. – Херсон, 1999. – 172 с.
33. Топчий Д. О. Программно-технический комплекс «Тестирование нестационарных температурных полей с динамическими термoelementами» / Д. О. Топчий // Электронный научный журнал «Отраслевые аспекты технических наук». – Издательство ИНГН, 2015. – Выпуск 4(46). – С. 27-37.
34. Астіоненко І. А. Автоматизована підсистема дослідження моделей кінцевих елементів / І. А. Астіоненко, П. Й. Гучек, Е. І. Литвиненко // Проблеми інформаційних технологій, 2014. – № 1. – С. 222-228.
35. Коряжкін А. А. Методологія адаптивного управління процесами контактної взаємодії при ленточному шліфуванні лопаток ГТД: дис. докт. техн. наук: 05.02.07 / Андрей Александрович Коряжкин. – Рыбинск, 2014. – 391 с.
36. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. – М.: Мир, 1979. – 392 с.
37. Астіоненко І. О. Ймовірно-геометричний метод побудови біквадратичного серендипового базису: нові варіанти / І. О. Астіоненко, О. І. Литвиненко, А. Н. Хомченко // Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного интеллекта: Материалы международной научной конференции. – Херсон: ХНТУ, 2014. – С. 24-26.
38. Коннор Дж. Метод конечных элементов в механике жидкости / Дж. Коннор, К. Бреббиа. – Л.: Судостроение, 1979. – 264 с.

Суворов М.А.

Национальный аэрокосмический университет имени Н.Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт»

ПРИМЕНЕНИЕ АППАРАТА МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПЕРА ЛОПАТОК АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Аннотация

В статье представлен краткий обзор методов, процессов и оборудования для обработки поверхностей пера лопаток авиационных двигателей. рассматриваются современные программные комплексы и системы автоматизированного проектирования и расчета в качестве инструментов анализа и визуализации физико-механических составляющих вышеназванного технологического процесса. перспективно использование аппарата конструктивной теории серендиповых аппроксимаций и информационной технологии на ее основе для выполнения будущих поставленных задач.

Ключевые слова: финишная обработка, лопатка компрессора, шлифования и полирования, технологический процесс, мсэ, сапр, серендипив конечный элемент, информационная технология.

Suvorov M.O.

National aerospace university named after N.E. Zhukovsky
«Kharkiv Aviation Institute»

APPLICATION OF THE METHOD OF FINAL ELEMENTS FOR THE FINISHED PROCESSING OF THE SURFACE OF THE LINE OF AVIATION ENGINES

Summary

The article presents a brief overview of methods, processes and equipment for finishing the surfaces of a pen of blades of aviation engines. Modern software complexes and systems of automated design and calculation as tools of analysis and visualization of physical and mechanical components of the aforementioned technological process are considered. Perspective use of the apparatus of the constructive theory of serendipitous approximations and information technology on its basis for the fulfillment of future tasks.

Keywords: finishing, compressor blade, grinding and polishing, technological process, itu, cad, serendipity finite element, information technology.