

УДК 629.7.036:539.4

Л. Й. Івченко¹, О. І. Крестьяніков², Т. І. Прибора¹

¹ Запорізький національний технічний університет, ² ТОВ «Промислово-технологічна компанія»;
м. Запоріжжя

ХАРАКТЕР ПЕРЕМІЩЕННЯ КОНТАКТУЮЧИХ ПОВЕРХОНЬ Z-ПОДІБНИХ БАНДАЖНИХ ПОЛИЦЬ ЛОПАТОК ГТД

За допомогою методу кінцевих елементів проведено дослідження характеру переміщення контактуючих поверхонь Z-подібних бандажних полиць лопаток ГТД в умовах динаміки навантаження. Виходячи з отриманих даних, встановлено, що контакт між поверхнями Z-подібних бандажних полиць нерівномірний та має складну форму.

Ключові слова: лопатка, бандажна полиця, перо лопатки, знос.

Вступ

У сучасних ГТД з метою зменшення чутливості лопаток до збудження коливань, підвищення їх вібраційної надійності широко застосовуються робочі лопатки з бандажними полицями, які в умовах експлуатації утворюють кільцевий зв'язок всіх лопаток вінця.

Такі лопатки дозволяють зменшити чутливість до порушення коливань, забезпечити необхідний рівень демпфування вібраційних напружень у пері лопатки та зменшити кінцеві втрати, а отже, збільшити ККД турбіни. Проте, в процесі тривалої експлуатації двигуна часто спостерігається інтенсивне зношування контактуючих поверхонь бандажних полиць, саме величина якого значною мірою визначає міжремонтний ресурс лопаток ГТД.

На даний момент в практиці конструювання робочих лопаток турбін широко використовуються Z-подібні бандажні полиці.

Знос бандажних полиць робочих лопаток турбіни деяких конструкцій двигунів може викликати майже десятикратне підвищення вібраційних напружень у пері лопатки [1], що може призвести до руйнування від втоми останньої і відмови двигуна в цілому. Якщо врахувати, що тільки в одному робочому колесі турбіни кількість таких лопаток може бути більше 100 (залежно від конструкції двигуна), то можливість відмови виробу при руйнуванні лопатки значно підвищується.

Знос контактуючих поверхонь полиць нерівномірний, і зміна його діапазону по робочому колесу турбіни може становити досить значну величину, що обумовлено можливістю розподілу навантажувальних факторів, таких як: амплітуда власних коливань лопаток, характер переміщення полиць, питомий тиск в зоні контакту між полицями, температура, частота переміщень контактуючих поверхонь. Крім цього, на знос кон-

тактуючих поверхонь полиць лопаток ГТД впливають також конструктивні фактори – наявність розкиду розмірів в межах допусків на виготовлення бандажних полиць та неточності монтажу, технологічні дефекти робочих коліс, які виникають у процесі їх виготовлення, втомні тріщини різної природи, що виникають у різних зонах робочих лопаток при їх експлуатації. Одним з найбільш впливових факторів на знос контактичних поверхонь є їх характер переміщення в процесі роботи, тобто величини зазорів (натягів), які значно залежатимуть від конструкції лопаток і на даний момент не досить повно вивчені.

Тому *метою роботи є* дослідження характеру переміщення контактуючих поверхонь Z-подібних бандажних полиць лопаток ГТД в умовах динаміки навантаження.

Методи рішення

Поставлене завдання вирішується за допомогою методу кінцевих елементів МКЕ [2], основних положень авіадвигунобудування і моделювання трибологічних процесів.

3D модель сектору лопаток (рис. 1) створено за допомогою програмного забезпечення PowerShape 2014 та SolidWorks 2012.

Для створення кінцево-елементної моделі використовувалась універсальна програмна система кінцево-елементного (МКЕ) аналізу – ANSYS Multiphysics 14.5. Вхідними даними для розрахунку КЕ моделі були фізичні та механічні властивості випробуваних жароміцного зносостійкого матеріалу – ХТН-61; припущення дії відцентрових сил, що виникають при робочій частоті ротора турбіни $\omega = 1600$ об/хв (1675,5 рад / с); монтажному натязі по бандажним полицям $\Delta_{м.н.} = 0,02$ мм; робочій температурі 950 °С; коефіцієнті тертя в зоні контакту $\Delta_m = 0,3$; числі мод $n = 50$.

Граничні умови забезпечуються розрізанням полиці на дві частини, одна з яких повертається в циліндричній системі координат на кут, рівний $\frac{2\pi}{N}$, де N – кількість лопаток в диску. Таким чином моделюється натяг по контактних поверхнях S . Оскільки в нашому випадку число лопаток, у вінці, не парне ($N = 51$ шт.) то на відміну від джерела [3], особливістю розбивки досліджуваних полиць є їх криволінійне розрізання, для дотримання умов рівномірної циклосиметрії, рівної

$$\frac{360}{N}.$$

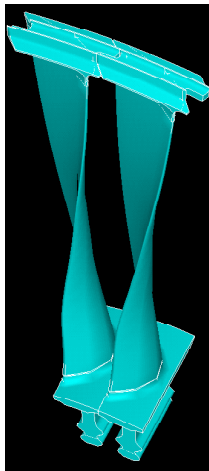


Рис. 1. 3D модель сектору лопаток із Z- подібними бандажними полицями

Для моделювання різних умов контакту: зсуву, тертя, зчеплення, проковзування, залежними від натягу або зазору, які виникають між бандажними полицями, використовуються контактні елементи «поверхня – поверхня». При моделюванні контакту між полицями, замкове з’єднання вважаємо жорстко закріпленим по контактних поверхнях ялинкового хвостовика.

В ANSYS проводиться модальний, статичний і динамічний аналіз контактуючих поверхонь бандажного зв’язку.

Оскільки, при моделюванні поличного з’єднання, необхідно дослідити характер переміщень в зоні контактних поверхонь, між бандажними полицями, на контактуючих поверхнях останніх розміщуємо вузлові точки (рис. 2), слідкуючи за переміщеннями яких, можна відобразити переміщення всієї контактуючої поверхні. Для цього в ANSYS проводиться модальний аналіз, у результаті якого отримуються величини власних частот коливань лопаток.

Щоб опрацювати цей масив даних, вибрати з файлів переміщення вузлових точок, які знаходяться на контактних поверхнях бандажних полиць, та за цими даними побудувати графіки пе-

реміщення вузлових точок залежно від частоти, використовується мова php (широко використовується мова сценаріїв загального призначення з відкритим вихідним кодом).

У текстовому редакторі «Блокнот» створюється програма на php, за допомогою якої відокремлюються з лістингу Ansys конкретні вузлові точки, які знаходяться на контактуючих поверхнях бандажних полиць лопаток ГТД.

Результати досліджень

В результаті аналізу кінцево-елементної моделі отримали графіки зміщення вузлових точок по довжині контактуючих поверхонь бандажних полиць турбіни від частоти власних коливань лопаток.

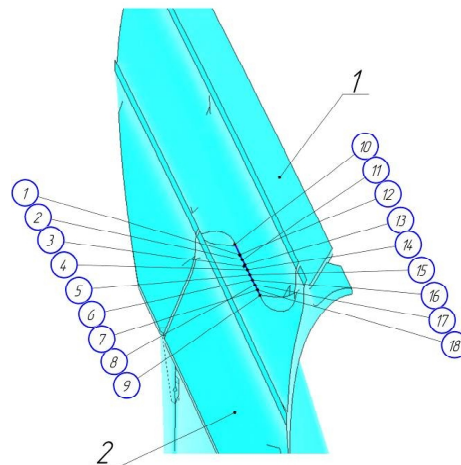


Рис. 2. Схема розміщення вузлових точок на контактуючих поверхнях бандажних полиць; 1...9 – вузлові точки бандажної полиці 2, 10...18 – вузлові точки бандажної полиці 1

На графіках, вісь x відповідає радіальному переміщенню контактуючих поверхонь бандажних полиць (вгору та вниз) одна відносно іншої. Вісь y відповідає тангенціальному переміщенню контактуючих поверхонь (вліво та вправо). Вісь z відповідає відстані між контактуючими поверхнями (осьове переміщення), тобто з графіків осі z можна оцінювати зазор, чи натяг між контактуючими поверхнями бандажних полиць.

Так на рис. 3 для першої отриманої частоти власних коливань (1 форма коливань) – 335 Гц, графік *a*) показує переміщення вузлових точок по осі x , де відстань між кривими є величиною переміщення контактуючих поверхонь у радіальному напрямку. Аналогічно, довжина переміщення контактуючих поверхонь у тангенціальному напрямку показана на графіку *б*).

На графіку *в*) – вісь z , ми бачимо, що з одного кінця бандажних полиць контактуючі поверхні розімкнуті, тобто утворюється зазор, а з іншого кінця, зазор зменшується до нуля та починає утворюватися натяг.

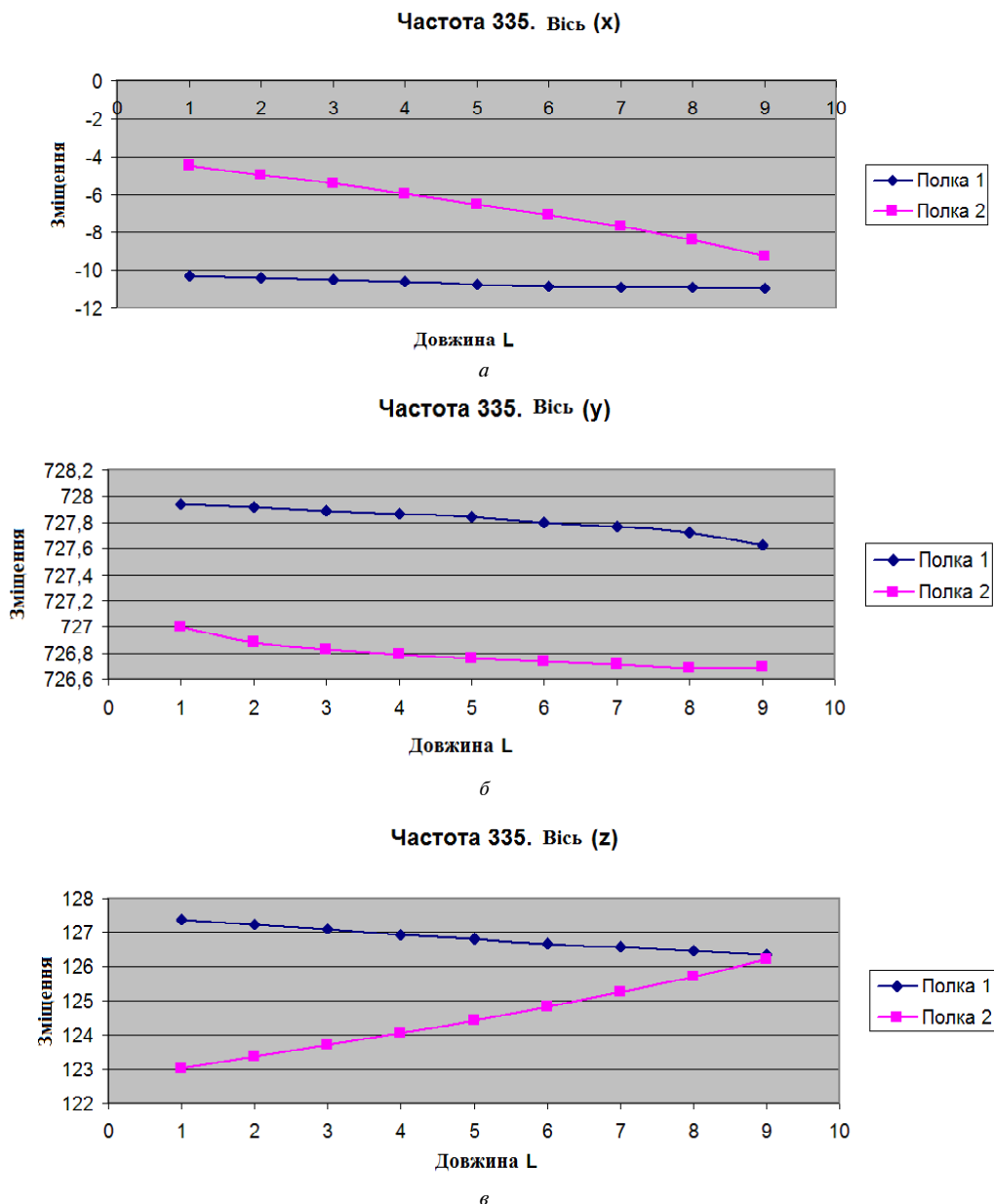


Рис. 3. Отримані графіки переміщення вузлових точок на контактуючих поверхнях бандажних полиць, для першої форми коливань (335 Гц), по осям: а) x, б) y, в) z

Проаналізувавши графіки переміщення вузлових точок контактуючих поверхонь бандажних полиць, отриманих методом КЕ моделі, у осьовому (z), радіальному (x) та тангенціальному (y) напрямках можна сказати що:

- згідно з отриманими графіками сумарного переміщення по трьом координатам (x, y, z) при частотах до 7000 Гц коливання вузлових точок контактуючих поверхонь синхронне та проходить з однаковою амплітудою (рис. 4);

- при постійній частоті обертання турбіни ротора ($n = 16000$ об/хв), спостерігається збільшення амплітуди коливань вузлових точок першої (лівої) контактуючої поверхні бандажної полиці,

при цьому амплітуда вузлових точок другої (правої) контактуючої поверхні залишається практично незмінною, фази коливань збігаються (залишаються тими же) (рис. 5);

- на частотах власних коливань лопаток $\approx 15000, 30000, 36000$ Гц спостерігається найбільш щільний контакт між контактуючими поверхнями бандажних полиць лопаток ГТД, а на частотах 18000, 25000, 33000 Гц спостерігається максимальне віддалення однієї контактуючої поверхні від іншої (утворюється зазор);

- отримані графіки можна умовно поділити на 3 діапазони (рис. 5). В I (від 0 до 15000 Гц) та III діапазоні (від 36000 до 40500 Гц) спостерігається

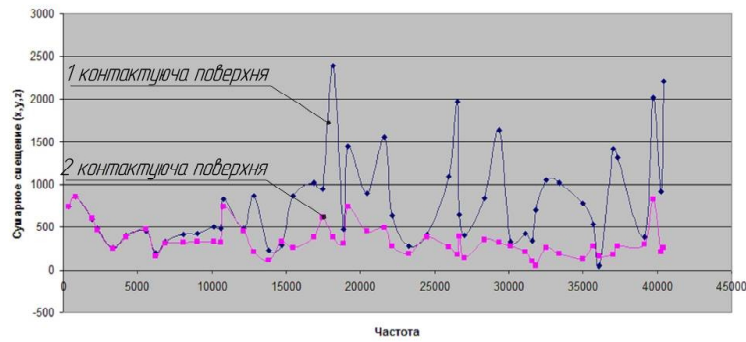


Рис. 4. Графік переміщення, протилежних один одному, вузлових точок контактуючих поверхонь 1 та 2

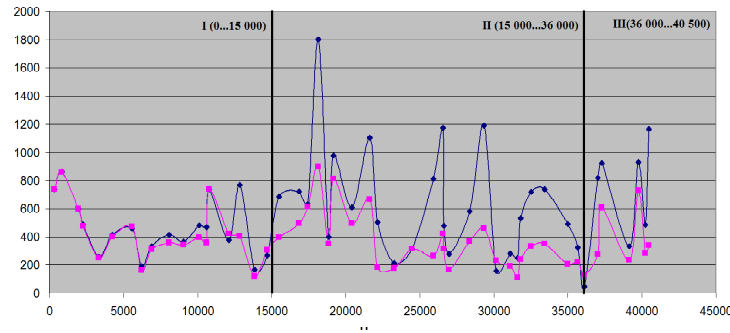


Рис. 5. Характер контакту полиць в різних діапазонах частот коливань ротора турбіни

зміщення вузлових точок контактуючих поверхонь бандажних полиць, яке призводить до проковзування, однієї контактуючої поверхні відносно іншої, без розриву контакту між ними (при умові невеликої різниці в амплітуді коливань). У II діапазоні (від 15000 до 36000 Гц) спостерігається розрив контакту між контактуючими поверхнями бандажних полиць, внаслідок значної різниці амплітуд коливань однієї та другої полиць, отже в цьому діапазоні може спостерігатися удар з проковзуванням, тобто режим роботи буде іншим;

- за напрямками x (радіальне переміщення), y (тангенціальне) для контактуючих поверхонь 1 та 2 фази коливань залишаються тими самими одна відносно іншої, а амплітуда однієї відносно іншої збільшується;

- за напрямком z (осьове переміщення) спостерігається синхронна робота контактуючих поверхонь до 15000 Гц, а зі збільшенням власних частот спостерігається різниця амплітуд та напрямів переміщень, тобто може відбуватись удар із проковзуванням або створюватись зазор між контактуючими поверхнями.

З наведеного виходить, що для розглянутої моделі лопаток турбіни ГТД бажано працювати в I діапазоні власних частот коливань до 15000 Гц, який можливо забезпечити конструктивними методами, наприклад, демпфуванням коливань лопаток, різношаговістю лопаточних вінців та ін.

Висновки

Отримані графіки показують, що контакт між поверхнями Z-подібних бандажних полиць не-

рівномірний та має складну форму. Між контактуючими поверхнями може проявлятися зазор і натяг, а це в свою чергу призводить до нерівномірного зносу по довжині контактуючих поверхонь бандажних полиць. Такі результати спростовують думку про те, що по всій площі контакту, між полицями діє однакове навантаження.

Список літератури

1. Івшенко Л. Й. Процеси контактної взаємодії в трибоз'єднаннях і зносостійкість жароміцних сплавів в екстремальних умовах : автореф. дис. на здобуття ступеню доктора техн. наук : спец. 05.02.04 «Тертя та зношування в машинах» / Івшенко Л. Й. — Хмельницький : Технологічний університет Поділля, 1999 р. — 36 с.
2. Шереметьев А. В. Использование компьютерного моделирования при проектировании дисков компрессоров авиационных ГТД / Шереметьев А. В., Прибора Т. И. // Вестник двигателестроения. — 2006. — № 2. — С. 32–37.
3. Зиньковский А. П. Влияние нарушений идентичности контактного взаимодействия бандажных полок на характеристики статического и динамического напряженного состояния лопаточных венцов / Зиньковский А. П., Крутий Я. Д. // Проблемы прочности. — 2012. — № 2. — С. 44–60.

Поступила в редакцию 11.05.2016

Ившенко Л.И., Крестьяников А.И., Прибора Т. И. Характер перемещения контактирующих поверхностей Z-образных бандажных полок лопаток ГТД

С помощью метода конечных элементов проведено исследование характера перемещения контактирующих поверхностей Z-образных бандажных полок лопаток ГТД в условиях динамики нагружения. Исходя из полученных данных, установлено, что контакт между поверхностями Z-образных бандажных полок неравномерный и имеет сложную форму.

Ключевые слова: лопатка, бандажная полка, перо лопатки, износ.

Ivschenko L., Krestianikov A., Prybora T. Character movement contacting surfaces Z-shaped bandage shelves gte blades

Using the finite element method studied character moving contacting surfaces Z-shaped bandage shelves GTE blades in terms dynamics load. Based on the data, found that the contact surfaces between Z-shaped bandage shelves uneven and has a complicated shape.

Key words: a shoulder-blade, bracer shelf, feather of shoulder-blade, wear.