

УДК 629.7.036:539.4

Д.А. ГРИГОРЬЕВА¹, Ю.А. ГУСЕВ², А.В. ШЕРЕМЕТЬЕВ¹, А.В. ПЕТРОВ¹¹ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина²Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДАМИ ФОТОУПРУГОСТИ И МКЭ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗАМКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ РАБОЧИХ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРОВ ГТД

Обоснована актуальность применения методов физического и математического моделирования для повышения точности определения напряженно-деформированного состояния деталей ГТД. Показано применение методов фотоупругости и конечных элементов для определения НДС замковых соединений рабочих лопаток компрессоров ГТД типа «ласточкин хвост». Разработан подход для обеспечения идентичности напряженного состояния реальной детали и модели при применении метода фотоупругости. Проведено сравнение результатов определения НДС в зонах концентрации напряжений замкового соединения при максимальной нагрузке и при ее равномерном возрастании. Получена хорошая сходимость расчетных и экспериментальных результатов.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, замковое соединение, метод конечных элементов, метод фотоупругости, изохрома, изоклина, полярископ, модель.

Введение

В связи с непрерывным ростом ресурсов и перевода на эксплуатацию по техническому состоянию ГТД возникла необходимость обеспечивать их назначенный ресурс путем более тщательного прогнозирования рабочего состояния, возможных отказов и неисправностей.

Рабочие лопатки и диски компрессоров в значительной степени определяют прочностную надежность двигателя. На конструктивную прочность лопаток и дисков существенно влияют концентрация напряжений, цикличность изменения режима нагружения, технология изготовления, свойства покрытий и другие факторы. Разрушение замковых соединений может происходить по хвостовику лопатки и по межпазовым выступам диска. В целях устранения дефектов и предотвращения появления их в будущем, расчетным путем определяют критические зоны появления опасных напряжений в замковом соединении, чтобы вовремя внедрить мероприятия по их устранению.

1. Методика исследования

В результате проведенного анализа известных методов экспериментального и расчетного определения напряженно-деформированного состояния (НДС) [1, 2, 4] сделан вывод, что в решении проблемы прогнозирования рабочего состояния замковых соединений рабочих лопаток компрессоров

АГТД одним из наиболее перспективных направлений является применение метода фотоупругости [1] (рис. 1), как экспериментального метода верифицирующего МКЭ, использующего модели в трехмерной постановке с учетом контактного взаимодействия в соединениях [2] (рис. 2) Метод фотоупругости и по сей день не теряет своей актуальности. Он существенно дешевле тензометрирования, применение которого для определения статических напряжений в замковых соединениях лопаток связано с значительными трудностями.

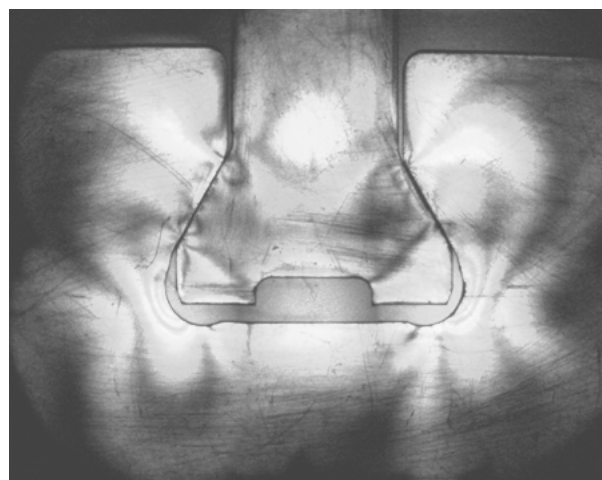


Рис. 1. Картина полос, полученная методом фотоупругости в модели при максимальной нагрузке

Для исследования НДС замкового соединения типа «ласточкин хвост» создана плоская конечно-

элементная модель замкового соединения КВД ТРДД.

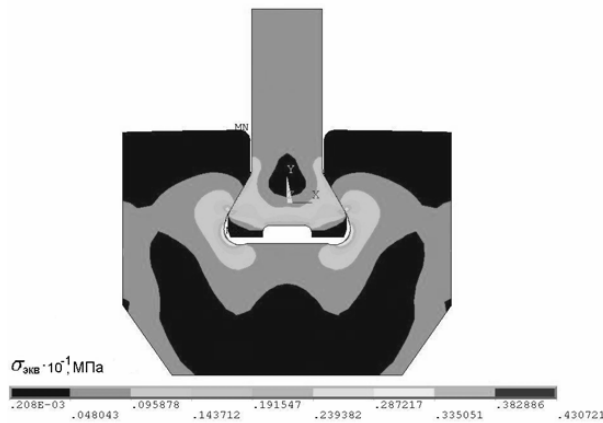


Рис. 2. Распределение эквивалентных напряжений МКЭ в модели при максимальной нагрузке

Для верификации результатов МКЭ методом фотоупругости создана плоская модель замкового соединения из оптически-чувствительного материала - поликарбоната.

Для корректного применения метода фотоупругости и отождествления полученных результатов с реальной деталью необходимо выполнить пересчет нагружения с реальной детали на экспериментальную модель по формуле (1) [3]:

$$\left(\frac{\sigma}{E}\right)_{\text{мод.}} = \left(\frac{\sigma}{E}\right)_{\text{констр.}} = \text{idem}, \quad (1)$$

где σ – напряжение, МПа;
 E – модуль упругости, МПа.

Исходные данные и результаты пересчета нагрузок приведены в табл. 1.

Таблица 1
 Пересчет величины нагружения реальной детали на экспериментальную модель

Параметр	Модель	Лопатка
Материал	Поликарбонат	ВТ-8
$E \cdot 10^{-1}, \text{МПа}$	200	11900
$F, \text{мм}^2$	430	60,3
$\rho, \text{г/см}^3$	1,2	4,43
$\sigma \cdot 10^{-1}, \text{МПа}$	0,07	4,06
Коэффициент трения	0,44	0,3
Нагрузка	Руст ≈ 30 кг	Слоп = 245 кг

Эксперимент выполнен на поляризационной установке ИМАШ-КБ-2. Интерференционные картины, наблюдаемые на изображении модели (рис. 2.), представляют собой картины полос или картины изохром. [4].

Результатами эксперимента стали фотографии распределения изохром в модели при нагрузках 5, 10, 15, 20, 25, 30 кг (рис. 2). После тарировки поля-

ризационной установки с экспериментальной модели была снята картина изоклин при максимальной нагрузке (рис. 3).

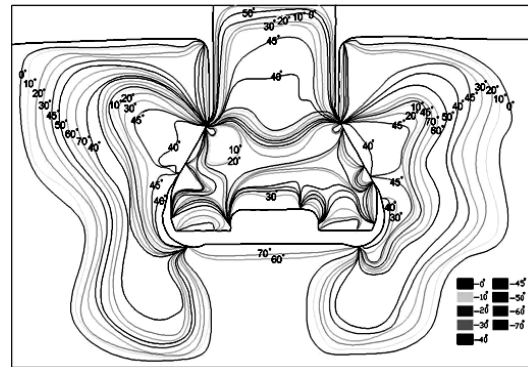


Рис. 3. Поле изоклин

Поле изоклин необходимо для построения траекторий главных напряжений (изостат) – линий, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением одного из главных нормальных напряжений. Картина изостат в напряженной модели дает наглядное представление о характере поля напряжений. МКЭ также может выдавать подобное поле напряжений, но в виде векторов главных напряжений (рис. 4).

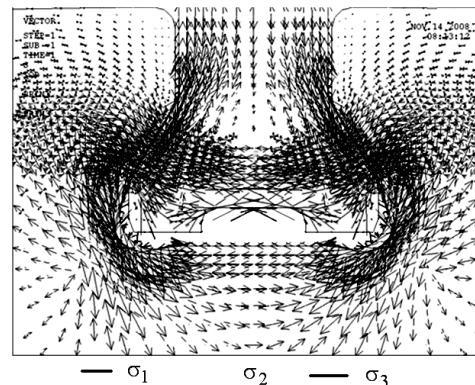


Рис. 4. Вектора главных напряжений МКЭ

Параллельно выполнялся расчет конечно-элементной модели замкового соединения, результатом которого стали значения всех компонент напряжения модели при разных нагрузках (рис. 1).

Для обеспечения возможности сравнения результатов метода фотоупругости с МКЭ, оптические параметры, полученные в результате эксперимента, переведены в значения действующих напряжений в модели. Основные используемые зависимости [4]:

1. Цена полосы материала:

$$\sigma_0^{1-0} = \frac{8 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot n}, \quad \frac{\text{кг}}{\text{мм}}, \quad (2)$$

где P – нагрузка, кг;
 D – диаметр тарировочного кольца, мм;
 n – порядок полосы.

2. Главные напряжения определены способом разности касательных напряжений:

$$(\sigma_x)_n = (\sigma_x)_0 - \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta\tau_{xy}}{\Delta y} \Delta x \right)_i, \quad (3)$$

где $(\sigma_x)_n$ – значения напряжения в точке модели, МПа;

$(\sigma_x)_0$ – значения напряжения в начальной точке, МПа;

$$\sigma_y = \sigma_x - \frac{n \cdot \sigma_0^{1-0}}{2d} \cos 2\alpha, \quad (4)$$

где α – параметр изоклины (рис. 3);

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} [\sigma_x + \sigma_y + (\sigma_1 - \sigma_2)], \quad (5)$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{2} [\sigma_x + \sigma_y - (\sigma_1 - \sigma_2)], \quad (6)$$

2. Анализ результатов

Для сравнения и анализа результаты, полученные экспериментальным и расчетным методами, представлены в виде двух видов зависимостей:

- распределение напряжения вдоль сильно нагруженных линий модели при постоянной нагрузке (рис. 6, 7);
- распределение напряжения в характерных точках с увеличением нагрузки (рис. 8 – 11).

Схема расположения характерных линий и точек замкового соединения показана на рис. 5.

Сильно нагруженными линиями в замковом соединении являются линия зоны контактного взаимодействия между диском и лопаткой – линия АВ и линия зоны концентрации напряжения в радиусах переходов межпазовых выступов (МПВ) диска – линия CD.

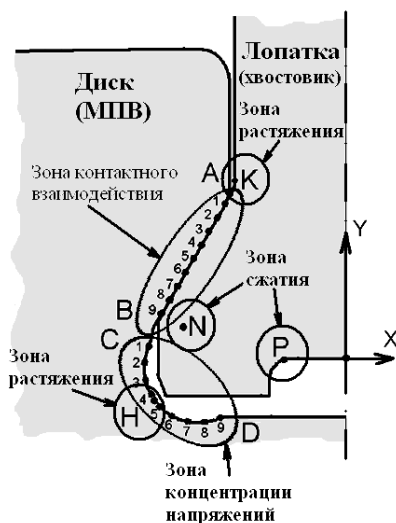


Рис. 5. Характерные точки и система координат

Значение напряжений по основным линиям взяты в девяти точках. Выбранные точки на теле модели К, N, H, P характеризуют основные зоны растяжения и сжатия в замковом соединении. На графиках линиями представлены результаты полученные расчетным путем, точками – экспериментальным

Значения напряжений вдоль основных линий определены при действии максимальной нагрузки в 30кг, соответствующей значению напряжения в реальной детали под действием центробежной силы на максимальном взлетном режиме (табл. 1).

На рис. 6 представлено распределение компонент напряжения вдоль линии контактного взаимодействия лопатки с диском под действием максимальной нагрузки.

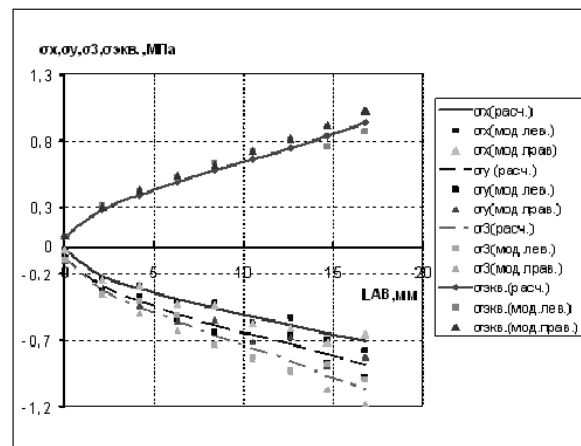


Рис. 6. Распределение напряжений по линии АВ

Из зависимости видно, что с последовательным перемещением вдоль линии АВ в МПВ, напряжения в диске практически линейно возрастают и вместе с тем увеличивается погрешность сходимости расчетных и экспериментальных значений напряжений.

Рис. 7 характеризует распределение напряжений по линии радиусного перехода МПВ диска при действии максимальной нагрузки. Наиболее напряженный участок линии CD – место перехода от линии контактного взаимодействия на радиус МПВ диска. В точке 5 (рис. 5), по середине радиусного перехода МПВ диска σ_x и σ_y уравнивают свои значения, при том что в начале радиусного перехода определяющим были σ_y , а в конце σ_x . Определяющий вклад в значение $\sigma_{экв}$, как видно из графика, вносят значения главных напряжений σ_1 .

Анализируя распределение компонент напряжения в выбранных точках К, N, H, P с ростом нагрузки (рис. 8 – 11), можно сделать заключение, что с ростом нагрузки напряжения в точках линейно

возрастают и погрешность в сходимости расчетных и экспериментальных результатов возрастают также. Наиболее нагруженной точкой из ряда выбранных оказалась точка Н, расположенная на радиусном переходе МПВ диска.

Поскольку в расчетах использовалась симметричная конечно-элементная модель, к которой прикладывалась осевая нагрузка вдоль оси симметрии, то получаемое НДС было также симметричным. Поэтому расчетные значения напряжений, показанных на рис. 6 – 11 приведены только для одной из сторон замкового соединения. Различия между экспериментально полученными напряжениями на левой и правой сторонах замкового соединения возможно связаны с технологическими отклонениями (в пределах допуска) при изготовлении модели.

Таким образом, проведенная расчетно-экспериментальная оценка НДС показала хорошую сходимость расчетных результатов с экспериментом с достаточным для практики уровнем точности – 5 – 10%.

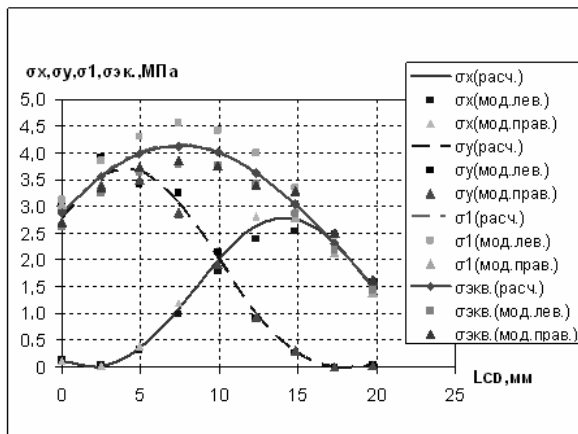


Рис. 7. Распределение напряжений по линии CD

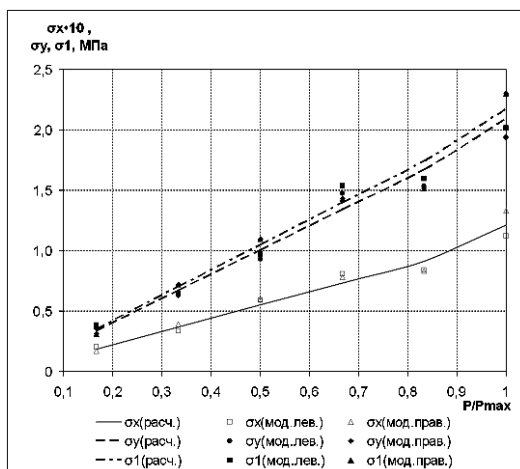


Рис. 8. Распределение напряжений $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_1$ в зависимости от роста нагрузки в точке К

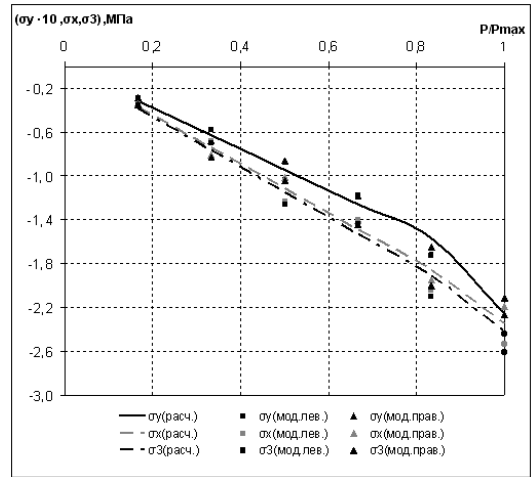


Рис. 9. Распределение напряжений $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_3$ в зависимости от прироста нагрузки в точке Р

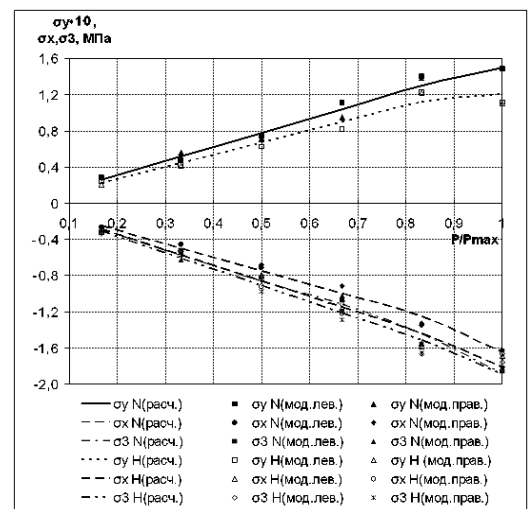


Рис. 10. Распределение напряжений $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_3$ в зависимости от прироста нагрузки в точках N и H

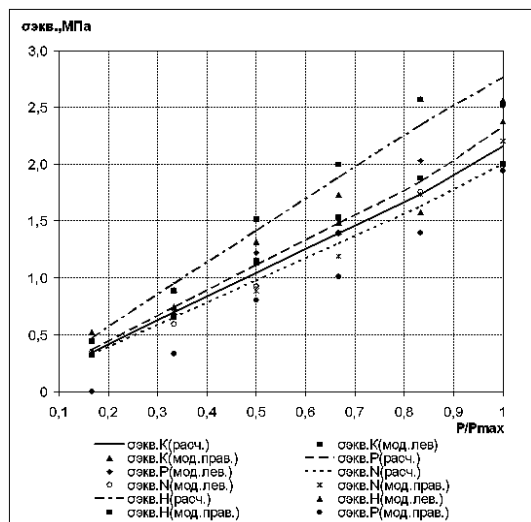


Рис. 11. Распределение напряжений $\sigma_{экв}$ в зависимости от прироста нагрузки в точках К, Р, N и H

Заключение

1. Проведено сравнение результатов двух методов расчетного – МКЭ и экспериментального – метода фотоупругости.

2. Получено хорошее совпадение результатов.

3. Дальнейшие исследования планируется по следующим направлениям:

– получение качественных и количественных оценок напряжения методом фотоупругости для замковых соединений других типов на трехмерных моделях;

– моделирование возможных технологических отклонений формы замковых соединений на физических моделях.

Литература

1. Doyle J.F. *Modern Experimental Stress Analysis completing the solution of partially specified problems* / J.F. Doyle. – Jon Wiley & Sons Ltd, 2004. – 424 p.

2. Сегерлинд Л. *Применение метода конечных элементов в технике: пер. с англ.* / Л. Сегерлинд. – М.: Мир, 1979. – 428 с.

3. Третьяченко Г.Н. *Моделирование при изучении прочности конструкции* / Г.Н. Третьяченко. – К.: Наукова думка, 1979. – 323 с.

4. Москаленко А.С. *Экспериментальное исследование напряженного состояния деталей авиационного двигателя методом фотоупругости: учеб. пособие* / А.С. Москаленко, Ю.А. Гусев. – Х.: ХАИ, 1993. – 43 с.

Поступила в редакцию 12.05.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой С.В. Епифанов, Харьковский национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДАМИ ФОТОПРУЖНОСТІ ТА КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗАМКОВИХ З'ЄДНАНЬ РОБОЧИХ ЛОПАТОК КОМПРЕСОРІВ ГТД

Д.О. Григор'єва, Ю.О. Гусєв, О.В. Шереметьєв, О.В. Петров

Обґрунтована актуальність використання методів фізичного і математичного моделювання для підвищення точності визначення напружено-деформованого стану (НДС) деталей ГТД. Наведено використання методів фотопружності і кінцевих елементів для визначення НДС замкових з'єднань робочих лопаток компресорів ГТД типу «ластівкін хвіст». Розроблен підхід для забезпечення ідентичності напруженого стану реальної деталі і моделі при використанні метода фотопружності. Проведено порівняння результатів визначення НДС в зонах концентрації напружень замкового з'єднання при максимальному навантаженні та при її рівномірному зростанні. Отримана добра збіжність розрахункових та експериментальних результатів.

Ключові слова: напружено-деформований стан, замкове з'єднання, метод кінцевих елементів, метод фотопружності, ізохрома, ізокліна, полярископ, модель.

INVESTIGATION BY METHODS OF PHOTOELASTICITY AND FEA OF STRESS-STRAIN STATE OF GTE'S COMPRESSORS BLADE-DISK JOINTS

D.A. Grigoryeva, U.A. Gusev, A.V. Sheremetyev, A.V. Petrov

The urgency of application of physical and mathematical modeling methods for accuracy increase of definition of GTE's parts stress-strain state is grounded. Application of photoelasticity and finite element methods for stress-strain state definition of dovetail blade-disk joints of GTE's compressors is shown. The approach for ensuring of stress state identity between the real detail and the model is developed at photoelasticity method application. Comparison results of stress-strain state definition in stress concentration zones of blade-disk joints is carried out at the maximal loading and at its uniform increase. Good convergence between calculated and experimental results is received.

Key words: stress-strain stat, blade-disk joints, finite element method, photoelasticity method, isochromat, isoclinical, polariscope, model.

Григор'єва Дар'я Александровна – магістр, інженер-конструктор ГП «Івченко-Прогрес», Запоріжжє, Україна, e-mail: 03530@ivchenko-progress.com.

Гусєв Юрій Алексєєвич – канд. техн. наук, професор, професор кафедри конструкції авіаційних двигателів і енергетических установок Національного аэрокосмічного університету ім. Н.Е. Жуковського «ХАИ», Харків, Україна, e-mail: aedlab@gmail.com.

Шереметьєв Александр Викторович – канд. техн. наук, начальник відділу прочностних розрахунків і досліджень ГП «Івченко-Прогрес», Запоріжжє, Україна, e-mail: 03530@ivchenko-progress.com.

Петров Алексєй Владимирович – канд. техн. наук, ведучий інженер ГП «Івченко-Прогрес», Запоріжжє, Україна, e-mail: 03530@ivchenko-progress.com.