

УДК 621.452.3.03-226:681.787

doi: 10.32620/aktt.2021.4sup1.12

М. Р. ТКАЧ¹, С. Б. КУЛИШОВ², В. А. ПОЛИЩУК¹, В. С. КЛЮЧНИК¹,
Ю. Г. ЗОЛОТОЙ¹, И. Ю. ЖУК³, А. Ю. ПРОСКУРИН¹, Ю. Н. ГАЛЫНКИН¹

¹ *Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев*

² *ДП НВКГ "Зоря" - "Машипроект", Николаев, Украина*

³ *Черноморский национальный университет имени Петра Могилы, Николаев*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА РАБОЧИХ ЛОПАТОК ГТД

Даны схема и описание стенда на основе цифрового спекл-интерферометра с диффузной опорной волной, позволяющего определять собственные частоты и формы колебаний лопаток в реальном времени. В диапазоне частот 100...3000 Гц, проведено экспериментальное исследование вибрационных характеристик рабочей лопатки турбины газотурбинного двигателя, при свободных граничных условиях, которые достигались путем размещения лопатки на мягких силиконовых стойках. Габаритные размеры лопатки: высота по выходной кромке – 288 мм, хорда в среднем сечении – 88,5 мм. Выявлено 7 форм колебаний. Приведена технология создания твердотельной геометрической модели рабочей лопатки на основе фасетного тела, полученного 3D сканированием с точностью 0,01 мм. Методом конечных элементов, используя вариационный принцип Лагранжа, приведен расчет значений собственных частот и форм колебаний лопатки на основе разработанной геометрической модели. Применительно к диапазону частот 100...3000 Гц, с помощью программного комплекса Ansys Workbench, проведена серия расчетов резонансных частот лопатки, методом конечных элементов, в диапазоне варьирования значений механических свойств: модуль Юнга $E = 200...230$ ГПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,26...0,3$. Плотность материала: $\rho = 7830$ кг/м³, определена экспериментально, методом гидростатического взвешивания. Конечный элемент, использованный в расчете - (тетраэдр) SOLID 187, минимальный размер элемента 0,6 мм. Общее количество элементов порядка $1,5 \cdot 10^6$. На основе двумерной сплайн интерполяции расчетных данных, построена зависимость среднего квадратического отклонения расчетных и экспериментальных значений от принятых механических свойств материала рабочей лопатки. В диапазоне значений $E = 215...217$ ГПа и $\mu = 0,295...0,3$ достигнуто минимальное среднее квадратическое отклонение расчетных частот от их экспериментального значения – 0,73 %. При условии значения среднего квадратического отклонения частот 1%, диапазон значений механических свойств составит: $E = 211...220$ ГПа и $\mu = 0,26...0,3$. Показано, что сужение исследуемого диапазона значений модуля Юнга и коэффициента Пуассона не оказывает существенное влияние на полученные результаты.

Ключевые слова: спекл-интерферометрия; свободные колебания; лопатки ГТД; метод конечных элементов; резонансные частоты.

Введение

Механические свойства металла рабочей лопатки, которые являются исходными данными при проектировании, традиционно определяют статическим и динамическим методами.

Статические методы основаны на непосредственном измерении взаимосвязи напряжений и деформаций, которым подвергаются специально подготовленные образцы во время механических испытаний (растяжение, сжатие, изгиб, кручение и т. д.). Данные методы требуют привлечения значимого диапазона данных напряжение–деформация [1] при этом, образец разрушается.

Динамические методы [2], позволяют использовать образцы с большим разнообразием форм и

размеров, обеспечивают неразрушающие измерения в широком диапазоне температур [3]. Эти методы достаточно условно разделяют на волновые и резонансные.

Волновой метод основан на измерении либо скорости распространения ультразвуковой волны через образец, либо времени ее распространения являются надежными и быстрыми в реализации, но чувствительными к локальным неоднородностям и форме объекта исследования.

Устранение указанные недостатки, простота использования и относительно недорогое оборудование, привели к широкому использованию резонансных методов, как в исследовательских лабораториях, так и в промышленных условиях [4 – 6]. Распространенным резонансным методом исследо-

вания вибрационных характеристик твердых тел является бесконтактный оптический метод, основанный на когерентных свойствах лазерного излучения [7, 8]. Характерный их представитель – метод голографической интерферометрии [9] позволяет в реальном времени визуализировать дислокацию узловых линий, т.е. определять формы и резонансные частоты колебаний. Разрешение голографических интерферограмм позволяет с высокой точностью определить распределение амплитуд колебаний по поверхности лопатки, но техника их получения предполагает использование фотопластин, их точного позиционирования. фотохимическую обработки, хорошую виброзащиту стенда и высококогерентное излучение лазера. Весьма близкой полнотой информации, но с более низким разрешением интерференционных полос, обладает метод электронной спекл-интерферометрии [10, 11]. При существенно менее жестких требованиях к технике эксперимента и принципиально меньшей трудоемкости, этот метод позволяет оперативно (без применения фотохимического процесса) наблюдать форму колебаний лопатки на экране компьютера и в реальном времени и определять резонансную частоту колебаний.

Известны варианты реализации метода электронной спекл-интерферометрии. На спекл-интерферограммах, получаемых с помощью интерферометра со спекл-модулированной опорной волной, контраст полос при прочих равных условиях ниже, чем на интерферограммах с гладкой опорной волной [12]. Однако оптическая схема такого интерферометра достаточно громоздка, чрезвычайно сложна в юстировке и требует периодического её мониторинга из-за низкой устойчивости к внешним возмущениям. Оптическая схема цифрового спекл-интерферометра с совмещёнными пучками и повышенной помехоустойчивостью представлена в [13].

Для определения вибрационных характеристик деталей широко используют расчетные методы. Аналитические точные и приближенные (вариационные, аппроксимационные) методы позволяют определять резонансные частоты исследуемого объекта достаточно простой формы. В инженерной практике расчёт резонансных характеристик конструкций в основном производится численно, методом конечных элементов, реализованным в современных программных комплексах (ANSYS, SolidWorks, NASTRAN, COSMOS и др). Вместе с тем, несоответствие геометрии расчетной модели объекту исследования, погрешности моделирования граничных условий и отклонение действительных значений свойств от рекомендованных их значений, снижают достоверность расчетных данных и практически всегда требуют их экспериментальной верификации.

Высокоточное экспериментальное определение параметров вибрации лопаток имеет определяющее значение для реализации расчетно-экспериментального метода исследований: данные эксперимента используются для определения механических свойств материала и формирования граничных условий, а численный метод - для детального анализа распределения амплитуд, деформаций и напряжений во всем объеме исследуемого объекта. Это позволяет повысить точность и снизить трудоемкость определения динамических параметров [14, 15].

Целью данной работы, является создание экспериментально-расчетной технологии определения механических свойств материала рабочих лопаток ГТД.

1. Экспериментальная часть

1.1. Описание экспериментального стенда

В процессе экспериментального определения вибрационных характеристик лопатки использован цифровой спекл-интерферометр с диффузной опорной волной и отдельными каналами распространения опорного и предметного пучков (рис. 1) [16].

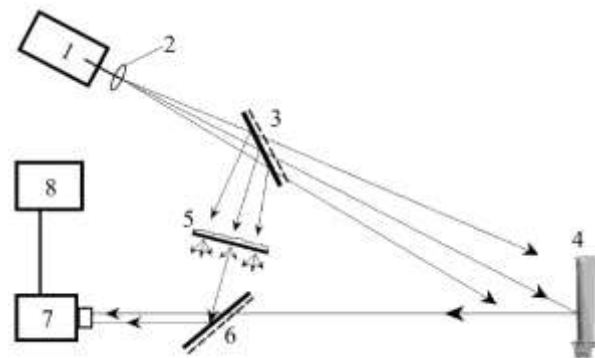


Рис. 1. Оптическая схема стенда:

- 1 – лазер; 2 – микрообъектив;
- 3, 6 – светоделители; 4 – объект исследования (лопатка); 5 – пропускающий диффузор;
- 7 – видеокамера; 8 – персональный компьютер

Луч лазера 1 расширяется микрообъективом 2 и делится светоделителем 3 на проходящий и отражённый. Проходящий пучок освещает поверхность лопатки 4, диффузно отражается от ее поверхности, образуя предметную волну. Световой пучок, отражённый светоделителем 3, рассеивается пропускающим диффузором 5 и создает диффузную опорную волну. Совмещенные светоделителем 6 и объективом видеокамеры 7 предметный и опорный пучки формируют на светочувствительной матрице, результирующее спекл-поле - спеклограмму. При ре-

зонансной вибрации лопатки в ней зашифрована интерферограмма колебательной формы, которая декодируется на компьютере 8, методом определения динамической картины спеклов [17].

Детальное описание схемы установки, а также методов получения и алгоритмов обработки голограмм даны в [16, 18].

1.2. Граничные условия эксперимента

Объектом исследований является рабочая лопатка турбины газотурбинного двигателя: высота по выходной кромке – 288 мм, хорда в среднем сечении – 88,5 мм. Экспериментальное определение вибрационных характеристик лопатки выполнено при граничных условиях, максимально приближенным к свободным, что обеспечено ее вертикальным размещением на мягких силиконовых стойках (рис. 2).

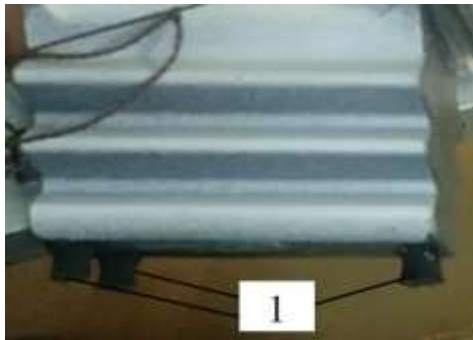


Рис. 2. Схема установки лопатки:
1 – силиконовые стойки

Возбуждение лопатки, реализовано приклеенным в корневом сечении биморфным пьезоэлементом (диаметром 12 мм) возбуждаемым синусоидальным сигналом (рис. 3).

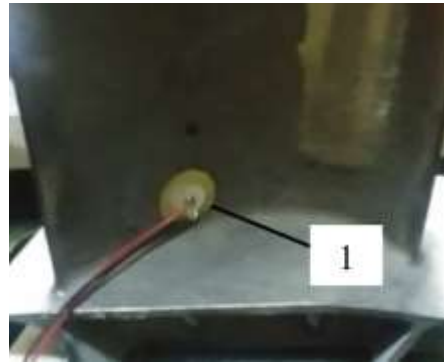


Рис. 3. Реализация возбуждения колебаний лопатки: 1 – биморфный пьезоэлемент

1.3. Экспериментальное определение собственных частот и форм колебаний свободной лопатки

Резонансные частоты и соответствующие им формы колебаний лопатки получены с использованием стенда (подраздел 1.1) при граничных условиях опирания лопатки (подраздел 1.2).

Формы и частоты резонансных колебаний, выявленные экспериментально, представлены в табл. 1.

2. Теоретическая часть

2.1. Разработка математической модели лопатки

С целью обеспечения расчета вибрационных характеристик *реальной* лопатки создана ее геометрическая модель на базе 3D сканирования (сканер Solutionix Rexscan CS2+) с точность сканирования 0,01 мм.

Таблица 1

Экспериментальные формы колебаний и частоты колебаний свободной лопатки

530 Гц	750 Гц	1191 Гц	1800 Гц	1949 Гц	2352 Гц	2659 Гц

Полученное фасетное тело, представлено на (рис. 4, а). Используя систему автоматизированного проектирования NX, на базе фасетного тела, функциями "Reverse engineering", создана 3D модель реальной рабочей лопатки турбины судового ГТД (рис. 4, б). Полученная геометрическая модель лопатки представлена на рис. 4в.

Расчет значений собственных колебаний лопатки методом конечных элементов основан на вариационном принципе Лагранжа [19, 20]:

$$\frac{\partial L}{\partial q_i} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) = 0, \quad (1)$$

$$i = (1, \dots, n),$$

где $L = \Pi - T$ – функция Лагранжа;

Π – потенциальная энергия деформации конечного элемента;

T – кинетическая энергия колебаний конечного элемента;

q_i – обобщенная координата i -го узла;

n – количество узлов элемента.

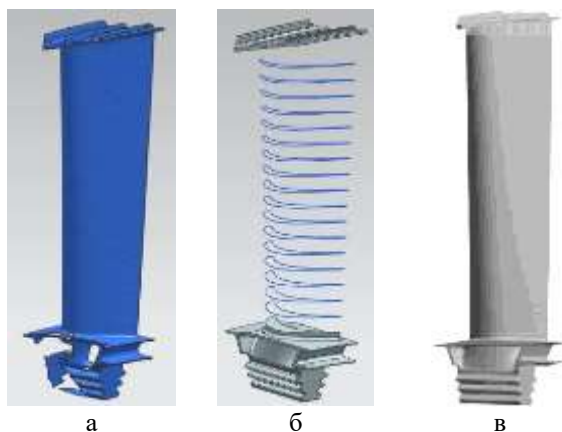


Рис. 4. К построению геометрической модели лопатки:

а – 3D скан лопатки; б – построение геометрической модели лопатки; в – 3D модель лопатки

Потенциальная и кинетическая виды энергии конечного элемента:

$$\Pi = \frac{1}{2} \left(\{u\}^T [K] \{u\} \right) \quad K = \frac{1}{2} \left(\{u\}^T [M] \{u\} \right), \quad (2)$$

где $[K]$ – матрица жесткости элемента;

$\{u\}$ – вектор обобщенных перемещений узлов элемента;

$[M]$ – матрица масс конечного элемента.

Подставив уравнение (2) в (1), получим матричное уравнение свободных колебаний элемента:

$$[M] \{\ddot{u}\} + [K] \{u\} = 0. \quad (3)$$

Спектр частот колебаний лопатки лопаток определяется:

$$[K_{IJ}] u_J - f^2 [M_{IJ}] u_J = 0, \quad (4)$$

$$I, J = (1, 2, \dots, N),$$

где f – частота колебаний лопатки;

N – число степеней свободы модели.

2.2. Расчет собственных частот и форм колебаний свободной лопатки методом конечных элементов

На основе программного комплекса ANSYS Workbench, получены резонансные частоты и соответствующие им формы колебаний исследуемой рабочей лопатки турбины ГТД. Граничные условия – свободные, что соответствует закреплению лопатки на экспериментальном стенде (см. рис. 2).

В расчете использован конечный элемент SOLID 187 (тетраэдр) минимальным размером 0,6 мм. Общее количество элементов порядка $1,5 \cdot 10^6$ (рис. 5). Тестовые расчеты с двукратным уменьшением размеров конечного элемента, не выявили существенного изменения получаемых частот резонансных колебаний лопатки.

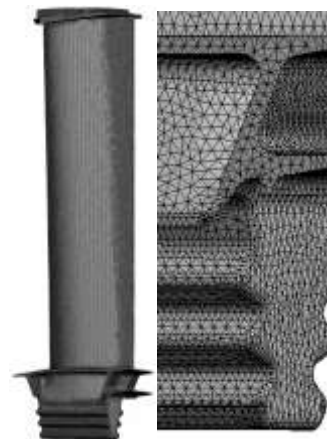


Рис. 5. Схема разбивки модели лопатки на тетраэдры

2.3. Определение свойств материала рабочей лопатки турбины судового ГТД

Совместное использование экспериментальных и расчетных методов позволяет определить механические свойства материала реальной лопатки: модуль Юнга (E) и коэффициент Пуассона (μ). Плот-

ность материала лопатки ($\rho = 7830 \text{ кг/м}^3$) измерена методом гидростатического взвешивания [21].

С целью определения действительных значений свойств материала лопатки, проведена серия расчетов резонансных частот лопатки в диапазоне изменения значений механических свойств $E = 200 \dots 230 \text{ ГПа}$ и $\mu = 0,26 \dots 0,3$. Значение плотности материала, использованное в расчете, – $\rho = 7830 \text{ кг/м}^3$. Полученные результаты представлены в табл. 2. Средние квадратические значения отклонения расчетных значений резонансных частот лопатки от их экспериментальных значений в зависимости от принятых значений механических свойств представлены в табл. 3.

На основе приведенных данных, методом двумерной *сплайн-интерполяции*, определена зависимость среднего квадратического отклонения расчетных данных δ от принятых механических свойств материала лопатки. График функции $\delta = f(E, \mu)$ представлен на рис. 6, а. Зоны постоянных значений отклонений показаны на рис. 6, б.

Как следует из приведенных результатов, минимальное среднее квадратическое отклонение рас-

четных частот от их экспериментального значения – 0,73 % (см. рис. 6, б) обеспечивается в диапазоне значений механических свойств $E = 215 \dots 217 \text{ ГПа}$ и $\mu = 0,295 \dots 0,3$. Вместе величина среднего квадратического отклонения частот 1 %, обеспечивается в диапазон значений механических свойств материала лопатки $E = 211 \dots 220 \text{ ГПа}$ и $\mu = 0,26 \dots 0,3$.

Сужение исследуемого диапазона варьирования значений модуля Юнга до $208 \dots 220 \text{ ГПа}$, при неизменном диапазоне значений коэффициента Пуассона, не выявило сколько-нибудь существенных изменений полученных результатов.

Таблица 3

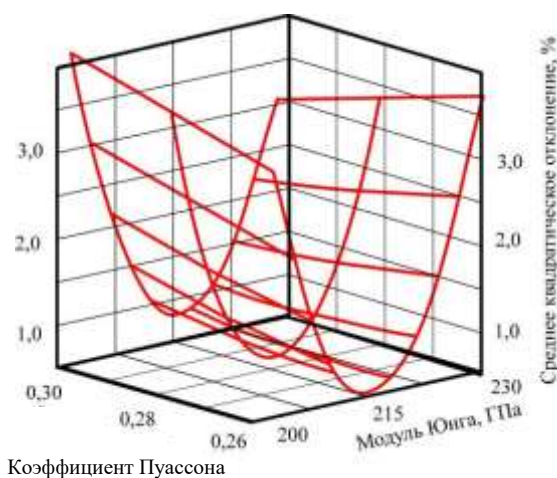
Среднее квадратическое отклонение расчетных и экспериментальных значений частот

Модуль Юнга E, ГПа	Коэффициент Пуассона μ		
	0,26	0,28	0,3
200	3,07	3,39	3,72
215	0,98	0,78	0,73
230	4,13	3,76	3,41

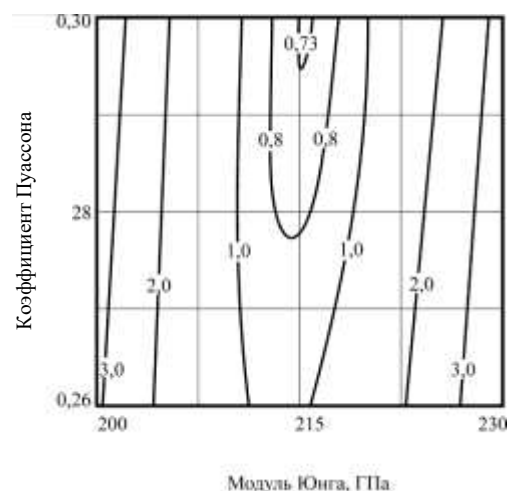
Таблица 2

Расчетные значения резонансных частот лопатки

Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона	Номер резонансной формы колебаний						
		1	2	3	4	5	6	7
00	0,26	516,58	732,96	1156,8	1751,9	1882,7	2293,6	2536,5
200	0,28	514,61	730,09	1151,3	1744,4	1878,4	2288	2528,7
200	0,3	512,65	727,33	1145,8	1737	1874,3	2282,5	2521,3
215	0,26	535,6	759,95	1199,4	1816,4	1952,1	2378,1	2629,9
215	0,28	533,56	756,97	1193,7	1808,6	1947,6	2372,3	2621,8
215	0,3	531,52	754,11	1188	1801	1943,4	2365,5	2614,1
230	0,26	553,97	786,01	1240,6	1878,7	2019	2459,7	2720,1
230	0,28	551,86	782,94	1234,6	1870,7	2014,4	2453,7	2711,7
230	0,3	549,75	779,97	1228,8	1862,8	2010	2447,7	2703,7



а



б

Рис. 6. Среднее квадратическое отклонение расчетных данных δ в зависимости от механических свойств: а – зависимость $\delta = f(E, \mu)$; б – изолинии $\delta = \text{const}$

В порядке иллюстрации выполнен определение частот и форм колебаний исследуемой модели лопатки расчет с использованием рекомендованных значений свойств материала: $\rho = 7830 \text{ кг/м}^3$; $E=215 \text{ ГПа}$ и $\mu = 0,3$. Ряд характерных частот и форм колебаний, представлен на рис. 7.

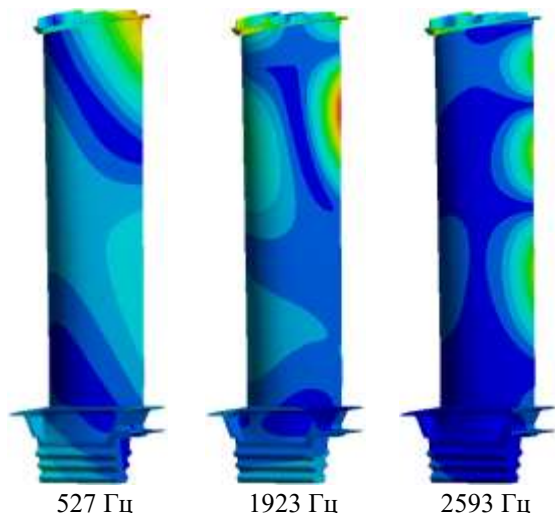


Рис. 7. Некоторые расчетные формы колебаний рабочей лопатки при свободных граничных условиях ($\rho = 7830 \text{ кг/м}^3$; $E=215 \text{ ГПа}$; $\mu = 0,3$)

Сопоставление значений резонансных частот исследованной рабочей лопатки, полученных экспериментальным и расчетным путем, приведено в табл. 4.

Таблица 4

Сравнение резонансных частот лопатки

Эксперимент, Гц	Расчет, Гц	Относительная погрешность, %
530	531,52	-0,29
750	754,11	-0,55
1191	1188	0,25
1800	1801	-0,06
1949	1943,4	0,29
2352	2365,5	-0,57
2659	2614,1	1,69
Среднее квадратическое значение отклонений, %		0,728

Как следует из полученных результатов, экспериментально-теоретическое определение механических свойств обеспечило их достаточно высокую точность.

Выводы

Методом электронной спекл-интерферометрии реального времени, определены собственные частоты

и формы колебаний рабочей лопатки турбины ГТД, при свободных граничных условиях. В диапазоне частот от 100 до 3000 Гц, выявлено 7 форм колебаний лопатки.

На основе 3D сканирования с точностью 0,01 мм построена фасетная модель реальной рабочей лопатки турбины ГТД, что позволило создать ее параметрическую твердотельную геометрическую модель.

В диапазонах значений свойств материала: $E = 200...230 \text{ ГПа}$; $\mu = 0,26...0,3$, применительно к диапазону частот от 100 до 3000 Гц методом конечных элементов определены резонансные частоты колебаний рабочей лопатки турбины ГТД.

На основе двумерной сплайн-интерполяции выявлены минимальные значения среднего квадратического отклонения расчетного и экспериментального значений частот. Показано, что в диапазоне значений модуля Юнга $E = 215...217 \text{ ГПа}$ и коэффициента Пуассона $\mu = 0,295...0,3$ эта величина составляет не более 0,73%. Увеличение допустимого значения среднего квадратического отклонения до 1 % расширяет диапазон свойств до $E = 211...220 \text{ ГПа}$ и $\mu = 0,26...0,3$.

Литература

1. Carlsson, L. A. *Experimental characterization of advanced composite materials* [Text] / L. A. Carlsson, R. B. Pipes. – Technomic Publishing Company Inc., 1997. – 256 p.
2. *Неразрушающий контроль: справочник. Том 7. [Текст] / под общ. ред. В. В. Клюева. Методы акустической эмиссии. Кн. 1. Вибродиагностика. Кн. 2. – М. : Машиностроение. – 2005. – 829 с.*
3. Филатов, М. А. Влияние термической обработки на структуру и свойства жаропрочных никелевых сплавов [Текст] / М. А. Филатов, В. С. Сыдаков // *MuTOM*. – 1995. – № 6. – С. 12–15.
4. Ganesan, A. R. *Measurement of poisson's ratio using real-time digital speckle pattern interferometry* [Text] / A. R. Ganesan // *Optics and Lasers in Engineering*. – 1989. – Vol. 11, Iss. 4. – P. 265-269. DOI: 10.1016/0143-8166(89)90064-X.
5. Кревчик, В. Д. *Определение модуля Юнга тонких пластин и стержней с помощью колебательной системы с присоединенной массой* [Текст] / В. Д. Кревчик, А. В. Рудин, С. В. Кочкин // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. – 2013. – №2 (26). – С. 110-119.
6. *Vibration-Based Experimental Identification of the Elastic Moduli Using Plate Specimens of the Olive Tree* [Text] / A. Formato, D. Ianniello, A. Pellegrino [et al.]. – *Machines*. – 2019. – No. 7, Iss. 2. – Article Id: 46. DOI: 10.3390/machines7020046.
7. Гецов, Л. Б. *Материалы и прочность деталей газовых турбин* [Текст] / Л. Б. Гецов // *Га-*

зотурбинные технологии. Кн. 1. – Рыбинск, 2010. – 611 с.

8. Бердник, О. Б. Живучесть материала лопаток турбин при длительных сроках эксплуатации [Текст] / О. Б. Бердник, И. Н. Царева, М. К. Чезуров // Вопросы материаловедения. – 2019. – № 1(97). – С. 28-35. DOI: 10.22349/1994-6716-2019-97-1-28-35.

9. Вест. Ч. Голографическая интерферометрия [Текст] / Ч. Вест. – М.: Мир. 1982. – 504 с.

10. Jones, R., Holographic and Speckle Interferometry [Text] / R. Jones, C. Wykes. – Cambridge University Press, 1989. – 386 p.

11. Жужукин, А. И. Метод уменьшения чувствительности спекл-интерферометра при исследовании вибраций деталей турбомашин [Текст] / А. И. Жужукин, В. А. Соляников // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2014. – № 1(43), С. 194–200. DOI: 10.18287/1998-6629-2014-0-1(43)-194-200.

12. Еленевский, Д. С. Лазерно-компьютерная система анализа спекл-интерферограмм вибрирующих объектов [Текст] / Д. С. Еленевский, Ю. Н. Шапошников // Известия Самарского научного центра РАН. – 1999. – № 1. – С. 134–136.

13. Жужукин, А. И. Мобильный спекл-интерферометр для исследования форм колебаний вибрирующих объектов во вне стендовых условиях [Текст] / А. И. Жужукин // Труды МАИ. – 2011. – № 48. – С. 37-41.

14. Еленевский, Д. С. Исследование процессов звукоизлучения конструкции методами электронной спекл-интерферометрии [Текст] / Д. С. Еленевский, Ю. Н. Шапошников // Известия Самарского научного центра РАН. – 2001. – 232 с.

15. Комаров, Ю. С. Помехоустойчивый цифровой спекл – интерферометр для виброметрии объектов на основе метода усреднения во времени [Текст] : дис. ... канд.тех. наук / Ю. С. Комаров. – Самара, 2004. – 234 с.

16. Improving the Noise Immunity of the Measuring and Computing Coherent-Optical Vibrodiagnostic Complex [Text] / M. Tkach [et al.] // Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering - 2020. ICTM 2020. Lecture Notes in Networks and Systems, 2021. – vol. 188. – P. 277-289. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-66717-7_23.

17. Пат. UA 103068 Україна. Спосіб визначення частот і форм резонансних коливань лопаток ГТД методом спекл-інтерферометрії [Текст] / Ткач М. Р., Золотой Ю. Г., Довгань Д. В., Жук И. Ю. - № 103068; опубл. 10.12.2015.

18. Modal analysis of the axial compressor blade: advanced time-dependent electronic interferometry and finite element method [Text] / M. Tkach, S. Morhun, Y. Zolotoy, I. Zhuk // Int. J. Turbo Jet-Eng. – 2020, Published ahead of print. DOI: 10.1515/tjj-2020-0014.

19. Придорожный, Р. П. Влияние ползучести материала на работоспособность лопаток соплового аппарата турбины высокого давления [Текст]

/ Р. П. Придорожный, А. В. Шереметьев, А. П. Зиньковский // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2020. – № 7(167). – С. 41-46. DOI: 10.32620/akt.2020.7.06.

20. Анализ колебаний лопаточного аппарата ГТД с монокристаллическими лопатками [Текст] / Ю. С. Воробьев, М. А. Чугай, В. Н. Романенко [и др.] // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 8(85). – С. 47–50.

21. Мордасов, Д. М. Технические измерения плотности [Текст] / Д. М. Мордасов. – Тамбов : Издательство ТГТУ, 2004. – 80 с.

References

1. Carlsson, L. A., Pipes, R. B. *Experimental characterization of advanced composite materials*. Technomic Publishing Company Inc., 1997. 256 p.

2. Klyuev, V. V. *Nerazrushayuschiy kontrol. Tom 7*. [Non-destructive testing. Volume 7]. Methods of acoustic emission. Book 1, Vibration diagnostics. Book 2, Moscow, Mechanical engineering Publ., 2005. 829 p.

3. Filatov, M. A., Sudakov, V. S. Vliyanie termicheskoy obrabotki na strukturu i svojstva zharoprochnykh nikelevykh splavov [Effect of heat treatment on the structure and properties of heat-resistant nickel alloys]. *MiTOM*, 1995, no. 6, pp. 12-15.

4. Ganesan, A. R. Measurement of poisson's ratio using real-time digital speckle pattern interferometry, *Optics and Lasers in Engineering*, 1989, vol. 11, iss. 4, pp. 265-269, DOI: 10.1016/0143-8166(89)90064-X.

5. Krevchik, V. D., Rudin, A. V., Kochkin, S. V. Opredelenie modulja Junga tonkih plastin i sterzhnej s pomoshh'ju kolebatel'noj sistemy s prisoedinennoj massoj [Determination of Young's modulus of thin plates and rods using an oscillatory system with added mass]. *Proceedings of higher educational institutions. Volga region. Technical science*, 2013, no. 2 (26), pp. 110-119.

6. Formato, A., Ianniello, D., Pellegrino, A., Villecco, F. Vibration-Based Experimental Identification of the Elastic Moduli Using Plate Specimens of the Olive Tree. *Machines*, 2019, no. 7, iss. 2, Article Id: 46. DOI: 10.3390/machines7020046.

7. Gecov, L. B. *Materialy i prochnost' detalej gazovyh turbin* [Materials and strength of gas turbine parts]. Gas turbine technologies, Book 1, Rybinsk, 2010. 611 p.

8. Berdник, О. В., Careva, I. N., Chegurov, M. K. Zhivuchest' materiala lopatok turbin pri dlitel'nyh srokah jekspluatatsii [The survivability of the material of turbine blades during long service life]. *Materials management issues*, 2019, no. 1(97), pp. 28-35. DOI: 10.22349/1994-6716-2019-97-1-28-35.

9. Vest. Ch. *Golograficheskaja interferometrija* [Holographic interferometry]. Moscow, Mir publ., 1982. 504 p.

10. Jones, R., Wykes, C. *Holographic and Speckle Interferometry*. Cambridge University Press Publ., 1989. 386 p.

11. Zhuzhukin, A. I., Soljannikov, V. A. Metod umen'sheniya chuvstvitel'nosti spekl-interferometra pri issledovanii vibracij detalej turbomashin [Method of reducing the sensitivity of a speckle interferometer in the study of vibrations of parts of turbomachines]. *Bulletin of the Samara State Aerospace University*, 2014, no. 1(43), pp. 194-200. DOI: 10.18287/1998-6629-2014-0-1(43)-194-200.

12. Elenevskij, D. S., Shaposhnikov, Ju. N. Lazerno-komp'yuternaja sistema analiza spekl-interferogramm vibrirujushhih obektov [Laser-computer system for analyzing speckle interferograms of vibrating objects]. *Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 1999, no. 1, pp. 134-136.

13. Zhuzhukin, A. I. Mobil'nyj spekl-interferometr dlja issledovanija form kolebanij vibrirujushhih obektov vo vne standovyh uslovijah [Mobile speckle interferometer for studying vibration modes of vibrating objects outside the bench conditions]. *Electronic journal «Trudy MAI»*, 2011, no. 48, pp. 37-41.

14. Elenevskij, D. S., Shaposhnikov, Ju. N. Issledovanie processov zvukoizlucheniya konstrukcii metodami jelektronnoj spekl-interferometrii [Investigation of the processes of sound emission of a structure by the methods of electronic speckle interferometry]. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2001. 232 p.

15. Komarov, Ju. S. *Pomehoustojchivij cifrovij spekl-interferometr dlja vibrometrii obektov na osnove metoda usrednenija po vremeni*. Diss. k. t. n. [Noise-resistant digital speckle interferometer for vibrometry of objects on the basis of the method of averaging in time PhD diss.]. Samara, 2004. 234 p.

16. Tkach, M. et al. Improving the Noise Immunity of the Measuring and Computing Coherent-Optical

Vibrodi-agnostic Complex. In: *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering - 2020. ICTM 2020. Lecture Notes in Networks and Systems*, 2021, vol. 188, pp. 277-289. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-66717-7_23.

17. Tkach, M. R., Zolotiy, Yu. G., Dovgan, D. V., Guk, I. Yu. *Sposib vy`znachennya chastot i form rezonansny`x koly`van` lopatok GTD metodom spekl-interferometriyi* [Method of determining of forms of resonant vibrations shapes of blades of gas turbine engine by speckle interferogram]. Patent UA, № 103068. 2015.

18. Tkach, M., Morhun, S., Zolotoy, Y., Zhuk, I. Modal analysis of the axial compressor blade: advanced time-dependent electronic interferometry and finite element method. *Int. J. Turbo Jet-Eng*, 2020, Published ahead of print. DOI: 10.1515/tjj-2020-0014.

19. Pridorozhnyj, R. P., Sheremet'ev, A. V., Zin'kovskij, A. P. Vliyanie polzuchesti materiala na rabotosposobnost' lopatok soplovogo apparata turbiny vysokogo davleniya [Influence of material creep on the performance of high-pressure turbine nozzle blades]. *Aerospace technic and technology*, 2020, no. 7(167), pp. 41-46. DOI: 10.32620/aktt.2020.7.06.

20. Vorobiev, YU. S., Chugaj, M. A., Romanenko, V. N., Kulishov, S. B., Skrickij, A. N. *Analiz kolebanij lopatochnogo apparata GTD s monokristallicheskim lopatkami* [Analysis of Vibrations of a GTE Blade with Monocrystalline Blades]. *Aerospace technic and technology*, 2011, no. 8(85), pp. 47-50.

21. Mordasov, D. M. *Tekhnicheskie izmerenija plotnosti* [Technical measurements of density]. Tambov, Publishing house of TSTU, 2004. 80 p.

Поступила в редакцию 03.06.2021, рассмотрена на редколлегии 16.08.2021

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РОЗРАХУНКОВЕ ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ РОБОЧИХ ЛОПАТОК ГТД

**М. Р. Ткач, С. Б. Кулішов, В. А. Поліщук, В. С. Ключник, Ю. Г. Золотий,
І. Ю. Жук, А. Ю. Проскурін, Ю. М. Галинкін**

Дано схему і опис стенду на основі цифрового спекл-інтерферометра з дифузною опорною хвилею, що дозволяє визначати власні частоти і форми коливань лопаток в реальному часі. У діапазоні частот 100 ... 3000 Гц, проведено експериментальне дослідження вібраційних характеристик робочої лопатки турбіни газотурбінного двигуна, при вільних граничних умовах, які досягалися шляхом розміщення лопатки на м'яких силіконових стійках. Габаритні розміри лопатки: висота по вихідний кромці - 288 мм, хорда в середньому перерізі - 88,5 мм. Виявлено 7 форм коливань. Наведена технологія створення твердотільної геометричної моделі робочої лопатки на основі фасетного тіла, отриманого 3D скануванням з точністю 0,01 мм. Методом кінцевих елементів, використовуючи варіаційний принцип Лагранжа, наведено розрахунок значень власних частот і форм коливань лопатки на основі розробленої геометричної моделі. Стосовно до діапазону частот 100 ... 3000 Гц, за допомогою програмного комплексу Ansys Workbench, проведена серія розрахунків резонансних частот лопатки, методом кінцевих елементів, в діапазоні варіювання значень механічних властивостей: модуль Юнга $E = 200 \dots 230$ ГПа; коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,26 \dots 0,3$. Щільність матеріалу: $\rho = 7830$ кг / м³, визначена експериментально, методом гідростатичного зважування. Кінцевий елемент, використаний в розрахунку - (тетраedr) SOLID 187, мінімальний розмір елемента 0,6 мм. Загальна кількість

елементів близько $1,5 \cdot 10^6$. На основі двовимірної сплайн інтерполяції розрахункових даних, побудована залежність середнього квадратичного відхилення розрахункових і експериментальних значень від прийнятих механічних властивостей матеріалу робочої лопатки. В діапазоні значень $E = 215 \dots 217$ ГПа і $\mu = 0,295 \dots 0,3$ досягнуто мінімальне середнє відхилення розрахункових частот від їх експериментального значення - 0,73%. За умови значення середнього квадратичного відхилення частот 1%, діапазон значень механічних властивостей складе: $E = 211 \dots 220$ ГПа і $\mu = 0,26 \dots 0,3$. Показано, що звуження досліджуваного діапазону значень модуля Юнга і коефіцієнта Пуассона не робить істотний вплив на отримані результати.

Ключові слова: спекл-інтерферометрія; вільні коливання; лопатки ГТД; метод кінцевих елементів; резонансні частоти.

EXPERIMENTAL AND CALCULATION DETERMINATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE MATERIAL OF GTE BLADES

*M. Tkach, S. Kulishov, V. Polischuk, V. Kluchnik, Yu. Zolotoy, I. Zhuk,
A. Proskurin, Yu. Halynkin*

A schematic description of a stand based on a digital speckle interferometer with a diffuse reference wave is given, which makes it possible to determine the natural frequencies and vibration modes of the blades in real-time. In the frequency range of 100 ... 3000 Hz, an experimental study of the vibration characteristics of a turbine rotor blade of a gas turbine engine was carried out, under free boundary conditions, which were achieved by placing the blade on soft silicone racks. Blade dimensions: height along the trailing edge - 288 mm, a chord in the middle section - 88.5 mm. 7 modes of vibrations have been identified. The technology of creating a solid-state geometric model of a rotor blade based on a faceted body obtained by 3D scanning with an accuracy of 0.01 mm is presented. The finite element method, using the Lagrange variation principle, is used to calculate the values of natural frequencies and vibration modes of a blade based on the developed geometric model. Concerning the frequency range 100 ... 3000 Hz, using the Ansys Workbench software package, a series of calculations of the resonant frequencies of the blade, by the finite element method, in the range of variation of the values of mechanical properties was carried out: Young's modulus $E = 200 \dots 230$ GPa; Poisson's ratio $\mu = 0.26 \dots 0.3$. The density of the material: $\rho = 7830$ kg / m³, determined experimentally, by the method of hydrostatic weighing. The final element used in the calculation is (tetrahedron) SOLID 187; the minimum element size is 0.6 mm. The total number of elements is about $1.5 \cdot 10^6$. Based on the two-dimensional spline interpolation of the calculated data, the dependence of the standard deviation of the calculated and experimental values on the adopted mechanical properties of the material of the rotor blade is built. In the range of values $E = 215 \dots 217$ GPa and $\mu = 0.295 \dots 0.3$, the minimum standard deviation of the calculated frequencies from their experimental values is 0.73%. Provided the value of the standard deviation of frequencies is 1%, the range of values of mechanical properties will be: $E = 211 \dots 220$ GPa and $\mu = 0.26 \dots 0.3$. It is shown that narrowing the studied range of values of Young's modulus and Poisson's ratio does not significantly affect the results obtained.

Keywords: speckle interferometry; free vibrations; GTE blades; finite element method; resonant frequencies.

Ткач Михаил Романович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. инженерной механики и технологии машиностроения, Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, Украина.

Кулишов Сергей Борисович – канд. техн. наук, зам. генерального конструктора по новой технике, Государственное предприятие научно-производственный комплекс газотурбостроения «Зоря»-«Машпроект», Николаев, Украина.

Полищук Виталий Анатольевич – канд. техн. наук, доц. каф. инженерной механики и технологии машиностроения, Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, Украина.

Ключник Владимир Сергеевич – асп. каф. инженерной механики и технологии машиностроения, Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, Украина.

Золотой Юрий Григорьевич – зав. лаб. каф. инженерной механики и технологии машиностроения, Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, Украина.

Жук Ирина Юрьевна – ст. преп. каф. гигиены, социальной медицины, общественного здоровья и медицинской информатики, Черноморский национальный университет имени Петра Могилы, Николаев, Украина.

Проскурин Аркадій Юрьевич – канд. техн. наук, доц. каф. «Двигатели внутреннего сгорания, установки и техническая эксплуатация», Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, Украина.

Галынкин Юрий Николаевич – канд. техн. наук, преп. каф. инженерной механики и технологии машиностроения, Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, Украина.

Mykhaylo Tkach – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Mechanical Engineering and Manufacturing Engineering, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Nikolaev, Ukraine, e-mail: mykhaylo.tkach@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0003-4944-7113, Scopus Author ID: 57202210289, <https://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&user=XqfGS0wAAAAJ>.

Sergey Kulishov – Candidate of Engineering Sciences, General Designer Deputy on new Engineering Technology, State Enterprise “Gas Turbine Research & Production Complex “Zorya”-“Mashproekt”, Nikolaev, Ukraine, e-mail: kulishov@zorya.com.ua, ORCID: 0000-0003-0483-8268.

Vitalii Polishchuk – Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Department of Mechanical Engineering and Manufacturing Engineering, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Nikolaev, Ukraine, e-mail: vitpolishchuk@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0320-4327, <https://scholar.google.com/citations?pli=1&authuser=1&user=g8W6NowAAAAJ>

Vladimir Kluchnik – PhD student of Department of Mechanical Engineering and Manufacturing Engineering, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Nikolaev, Ukraine, e-mail: vladimir.kluchnyk@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1928-7681.

Yurii Zolotoy – head of laboratory of Department of Mechanical Engineering and Manufacturing Engineering, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Nikolaev, Ukraine, e-mail: goldspekl@ukr.net, ORCID: 0000-0001-6292-6624.

Irina Zhuk – Senior Lecturer, Department of Hygiene, Social Medicine, Public Health and Medical Informatics, Petro Mohyla Black Sea National University, Nikolaev, Ukraine, e-mail: iryna.zhuk@chmnu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-7350-1944, Scopus Author ID: 57217606530, <https://scholar.google.com/citations?user=SRUBfdoAAAAJ>

Arkadii Proskurin – Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Department of Internal Combustion Engines, Plants and Technical Exploitation, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Nikolaev, Ukraine, e-mail: arkadii.proskurin@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0002-5225-6767, Scopus Author ID: 57203617130, <https://scholar.google.com.ua/citations?user=LCGxGC8AAAAJ>

Yurii Halynkin – Candidate of Engineering Sciences, Lecturer of Department of Mechanical Engineering and Manufacturing Engineering, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Nikolaev, Ukraine, e-mail: yurii.galynkin@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0001-5272-4156, Scopus Author ID: 57204396250, https://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&user=ix_y1CwAAAAJ