

О. Н. Карпенко, А. П. Кирпичников, В. С. Олешко,
А. В. Попов, Д. П. Ткаченко

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА ЛОПАТОК АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛАЗЕРНЫМ ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Ключевые слова: неразрушающий контроль, лазер, напряженно-деформированное состояние, газотурбинный двигатель.

Представлена разработанная экспериментальная установка лазерного оптико-акустического метода определения остаточных напряжений в лопатках авиационного газотурбинного двигателя и результаты исследования зависимости скорости поверхностной акустической волны от напряженно-деформированного состояния исследуемого материала методом искусственного нагружения.

Key words: non-destructive testing, laser, stress-strain state, gas turbine engine.

Presents the developed experimental installation of laser optical-acoustic method for determination of residual stresses in the blades of aircraft gas-turbine engine and results of research of the dependence of rate of surface acoustic waves from the stress-strain state of the studied material by method of artificial loading.

Для повышения достоверности оценки технического состояния лопаток авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) необходимым условием является определение фактического напряженно-деформированного состояния материала с выявлением зон концентрации напряжений. В настоящее время широкое распространение получают ультразвуковые методы неразрушающего контроля, основанные на оптико-акустическом эффекте [1]. Определение остаточных напряжений осуществляется по изменению скорости распространения поверхностной акустической волны (ПАВ) относительно номинального значения для исследуемого материала (без остаточных напряжений), поскольку механические напряжения приводят к изменению скорости звука в среде. Для этого требуется высокая точность измерения скорости звука [2]. Такую прецизионную точность можно достичь с использованием коротких акустических импульсов, получаемых средствами лазерной оптико-акустики [2-5]. В настоящее время практическая реализация количественной оценки остаточных напряжений по изменению скорости звука в материале реальных конструкций является актуальным и малоизученным вопросом.

Для решения этой задачи нами исследовалась возможность использования лазерной генерации ПАВ в лопатках авиационных ГТД, регистрации, обработки и анализа параметров акустической волны с целью оценки возможности определения остаточных напряжений.

Разработанная экспериментальная установка, с помощью которой осуществлялась генерация ПАВ в исследуемых деталях и производилась регистрация акустического сигнала, представлена на рис. 1, где цифрами обозначены: 1 – цифровой осциллограф; 2 – система линз; 3 – подвижный столик с шаговым двигателем; 4 – ПЭВМ; 5 – блок генерации ПАВ; 6 – лазер; 7 – пьезодатчик; 8 – координатный столик установки; 9 – исследуемая лопатка.

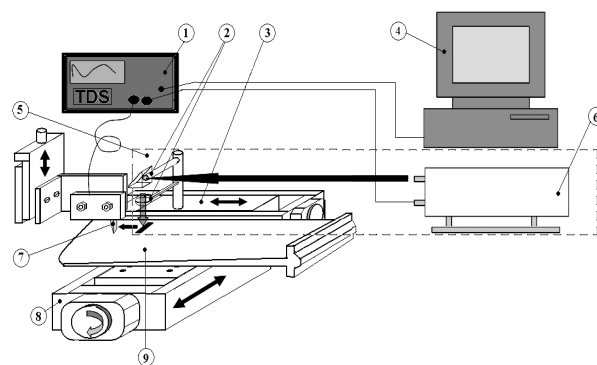


Рис. 1 – Схема экспериментальной установки

Методика экспериментальных исследований по измерению скорости ПАВ в лопатках ГТД заключалась в следующем. Исследуемая лопатка 9 устанавливалась на координатный столик 8 экспериментальной лабораторной установки. В зоне лопатки подлежащей контролю, устанавливался клиновидный пьезоэлектрический приемник ПАВ 7 с условием обеспечения сухого точечного контакта с поверхностью лопатки. Блок генерации ПАВ 5 помещался на подвижный столик с шаговым двигателем 3, что дает возможность перемещать источник акустических волн с заданным шагом. Система линз 2, фокусирующая излучение на поверхности лопатки, настраивалась таким образом, чтобы линия фокусировки располагалась на расстоянии от 3 до 5 мм от зоны контакта датчика ПАВ с лопаткой, а направление распространения волны ПАВ совпадало с направлением, в котором необходимо измерять скорость ПАВ и соответственно определять наличие остаточных напряжений.

Для измерения скорости ПАВ применялся дифференциальный метод, схема и общий вид которого представлены на рис. 2 и 3 соответственно.



Рис. 2 – Схема дифференциального метода измерений



Рис. 3 – Положение приемника и зоны возбуждения волны на лопатке

ПАВ на поверхности лопатки возбуждалась импульсным лазером и регистрировалась клиновидным пьезоэлектрическим приемником (рис. 2), после чего производилось измерение времени пробега этой волны. После генерации ПАВ расстояние источник-приемник увеличивалось на заданный шаг (100 мкм) и производилось новое измерение. Изменение зоны контроля производилось при перемещении лопатки с помощью системы перемещения координатного столика. Для каждой исследуемой зоны контроля в лопатке ГТД производилось не менее 30 измерений, что позволяло получить необходимую выборку для анализа. Далее с помощью фазового метода для данной зоны контроля определялась фазовая скорость ПАВ $C_R(\omega)$ [4].

В связи с тем, что основным расчетным случаем нагружения лопаток ГТД является одноосное напряженное состояние (обусловленное в большей степени действием центробежных сил) измерение значения напряжений в лопатке ГТД необходимо определять от корневого сечения вдоль по перу лопатки.

При оценке остаточных напряжений в лопатках авиационных ГТД необходимо аналитически определить расположение зон концентрации максимальных напряжений (рабочих или остаточных), а достоверность полученных результатов проверить расчетным или разрушающим методом.

Как правило, контроль остаточных напряжений в лопатках осуществляется после снятия рабочих нагрузок в условиях остаточного напряженно-деформированного состояния. В данных условиях получаемые значения необходимо анализировать с учетом особенностей эксплуатации и характера рабочих нагрузок лопаток ГТД.

Решение таких задач возможно при комплексном подходе, включающем в себя этап моделирования напряженно-деформированного состояния лопаток газотурбинного двигателя с применением метода конечных элементов. Данный метод позволяет аналитически представить картину сложно-напряженного состояния поверхностного слоя исследуемой лопатки и определить возможные зоны концентрации критических напряжений. Для этого используются пакеты прикладных программ Solid Works и Cosmos, или Unigraphics и Ansys. При этом определяются нагрузки, действующие на лопатку в процессе работы ГТД.

По полученному распределению напряжений в лопатках определяются зоны, в которых необходимо оценивать остаточные напряжения при диагностировании технического состояния лопаток ГТД. Для определения фактических численных значений напряженно-деформированного состояния в материале лопаток ГТД с помощью лазерного оптико-акустического метода необходимо экспериментально установить корреляционные зависимости между значениями скоростей ПАВ и величинами остаточных напряжений в данном материале.

Необходимым условием применения лазерного оптико-акустического метода для построения практических калибровочных характеристик для конкретных деталей ГТД, является использование в качестве образцов деталей из того же материала, с аналогичной механической и термической обработкой.

При этом для моделирования напряженно-деформированного состояния использовалось нагружение образцов изгибом. Было сделано допущение, что ПАВ локализована в приповерхностном слое толщиной порядка длины волны (в нашем случае – порядка 100 мкм), что существенно меньше толщины исследуемого образца $h=3$ мм.

Для проведения измерений скорости ПАВ, использовалась разработанная экспериментальная лабораторная установка (рис. 1) в которой вместо координатного столика для размещения образца использовалось устройство для изгибного нагружения образцов.

Нагружение осуществлялось ступенчато таким образом, чтобы отклонение конца пластины от исходного (ненапряженного) положения изменялось с шагом 0,5 мм. При таком нагружении напряжение в области измерения на поверхности образца описывается зависимостью (в приближении Эйлера-Бернулли [6]):

$$\sigma = \frac{3dh}{2L^3} E(L - x),$$

где d – величина отклонения пластины, мм; $h=3$ мм – толщина пластины; $E=104$ ГПа – модуль Юнга для сплава ВТ6; L – длина пластины, мм; x – текущая координата измерения, мм.

В ходе проведенных исследований, были получены результаты в виде зависимости скорости ПАВ от напряжения в исследуемой области образца (рис. 4).

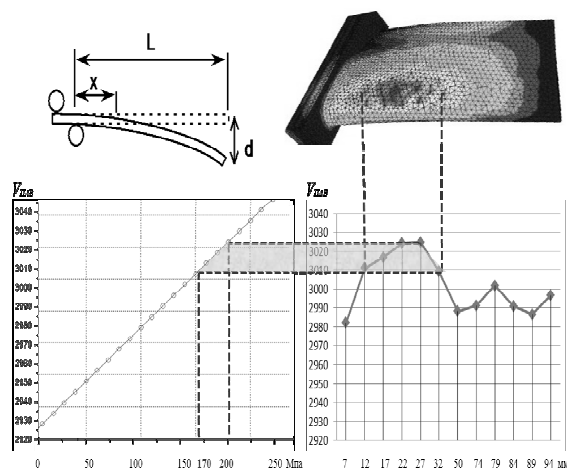


Рис. 4 – Распределение напряженно-деформированного состояния в лопатке

Основные разделы методики оценки остаточных напряжений в лопатках ГТД лазерным оптико-акустическим методом имеют вид:

1. Моделирование напряженно-деформированного состояния для исследуемого материала.
2. Определение зон концентрации напряжений в лопатках ГТД при помощи метода конечных элементов
3. Оценка остаточных напряжений в лопатках ГТД на основании данных оптико-акустического контроля.

Для выполнения условия прочности лопаток ГТД сумма значений от действующих напряжений в лопатках при эксплуатации авиационного двигателя $\sigma_{раб}$ и значений остаточных напряжений полученных с помощью лазерного оптико-акустического

метода $\sigma_{ост}$ должна соответствовать следующему условию:

$$\sigma_{\sigma} > \sigma_{раб} + \sigma_{ост}.$$

где σ_{σ} – предел прочности материала детали, ГПа.

При выполнении данного условия лопатки ГТД допускаются к дальнейшей эксплуатации.

Таким образом, разработанная методика оценки остаточных напряжений на основе лазерного оптико-акустического метода позволяет повысить достоверность определения напряженно-деформированного состояния лопаток на этапах производства и ремонта ГТД [7].

Литература

1. О.Н. Карпенко, А.П. Кирпичников, В.С. Олешко, А.В. Попов, Д.П. Ткаченко, *Вестник Казан. Технол ун-та*, **16**, 2, С. 251–253 (2014).
2. А.Ю. Ивочкин, А.А. Карабутов, М.Л. Лямшев, И.М. Пеливанов, У. Рохатги, М. Субудхи, *Акустический журнал*, **53**, 4, С. 1-8 (2007).
3. В.Э. Гусев, А.А. Карабутов, *Лазерная оптоакустика*. Наука, Москва, 1991. 304 с.
4. А.Ю. Девиченский, А.М. Ломоносов, С.Е. Жаринов, В.Г. Михалевич, *Акустический журнал*, **55**, 1, С. 39-46 (2009).
5. A. Lomonosov, A. Mayer, P. Hess, *Experimental Methods in the Physical Sciences*, 39, С. 65-134 (2001).
6. А.Д. Манита, *Теория вероятностей и математическая статистика*. Издат. отдел УНЦ ДО, Москва, 2001. 120 с.
7. И.В. Герасимов, В.С. Олешко, Д.П. Ткаченко, А.П. Кирпичников, *Вестник Казан. Технол ун-та*, **15**, 17, С. 146–149 (2012).

© О.Н. Карпенко – ст. науч. сотрудник ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», kaska79@yandex.ru; А. П. Кирпичников – д-р физ.-мат. наук, проф., зав. каф. ИСУИР КНИТУ, kirpichnikov@kstu.ru; В. С. Олешко – канд. тех. наук, препод. воен. инст. МАИ (НИУ), v-oleshko@yandex.ru; А. В. Попов – д-р тех. наук, доцент каф. авиац. двигателей ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», avpnii@rambler.ru; Д. П. Ткаченко – канд. тех. наук, нач. цикла воен. инст. МАИ (НИУ), tdp@list.ru.