

УДК 629.7.036

ОБ ОЦЕНКЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ ЛАЗЕРНЫМ ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

О.Н. КАРПЕНКО, В.С. ОЛЕШКО, А.В. ПОПОВ, В.М. САМОЙЛЕНКО

Рассмотрена возможность использования лазерной генерации поверхностной акустической волны в лопатках авиационных газотурбинных двигателей, регистрации, обработки и анализа параметров акустической волны с целью оценки возможности определения остаточных напряжений.

Ключевые слова: лазерный оптико-акустический метод, поверхностная акустическая волна, лопатка газотурбинного двигателя, остаточные напряжения.

Введение

В настоящее время промышленностью обрабатываются программы, регламентирующие переход на техническую эксплуатацию авиационной техники (АТ) по состоянию [1]. Такой переход позволит существенно снизить стоимость и увеличить сроки эксплуатации АТ за счет наиболее полного использования работоспособности каждого конкретного изделия.

Широко применяемым в АТ авиадвигателем является газотурбинный двигатель (ГТД), в котором основным силовым элементом, ограничивающим ресурс АТ, являются лопатки ГТД. Далее в статье речь будет идти как о лопатках компрессора, так и о лопатках турбины ГТД. Основными причинами возникновения усталостных повреждений (трещин) в материале лопаток ГТД, приводящих к их досрочному снятию с эксплуатации, являются остаточные напряжения.

В связи с отсутствием эффективных методов оценки остаточного ресурса основных (ограничивающих ресурс) деталей АТ возникает необходимость разработки и внедрения современных методов оценки остаточных напряжений в лопатках ГТД. Существующие методы контроля напряженно-деформированного состояния элементов АТ условно разделяют на две группы: разрушающие и неразрушающие [2].

Проведенный анализ возможности использования разрушающих методов (гальваноэлектрический метод, метод Матара и др.) для диагностирования лопаток газотурбинных двигателей выявил, что данные методы имеют ряд недостатков: сложность применения, длительный процесс измерений, невысокая точность получаемых результатов и т. д. [2]. Но главным общим недостатком разрушающих методов является то, что для диагностики необходимо предварительно разрушить объект или безвозвратно изменить его характеристики.

Анализ возможностей неразрушающих методов определения остаточных напряжений (рентгеноструктурного метода, магнитной памяти металла, методов, основанных на фотоакустическом эффекте и др.) [2] выявил такие существенные недостатки, как: невозможность использования большинства методов в области пластической деформации и оценки глубинных слоев металла; не учитывается изменение структуры металла; требуется подготовка контролируемой поверхности и объектов контроля (зачистка, активное намагничивание, клейка датчиков и прочее); существует сложность определения положения датчиков контроля по отношению к направлению действия максимальных напряжений и деформаций и др.

Особое положение среди неразрушающих методов занимают ультразвуковые методы, основанные на оптико-акустическом эффекте. Определение остаточных напряжений осуществляется по измерению времени задержки распространения продольных или сдвиговых акустических волн, поскольку механические напряжения приводят к изменению скорости звука в среде. Для этого требуется высокая точность измерения скорости звука [3]. Это достигается с исполь-

зованием коротких акустических импульсов, получаемых средствами лазерной оптико-акустики [3-6]. Но вопрос количественной оценки остаточных напряжений по изменению скорости звука в материале реальных конструкций является актуальным и малоизученным.

Экспериментальные исследования

Для решения этой задачи нами исследовалась возможность использования лазерной генерации поверхностной акустической волны (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.

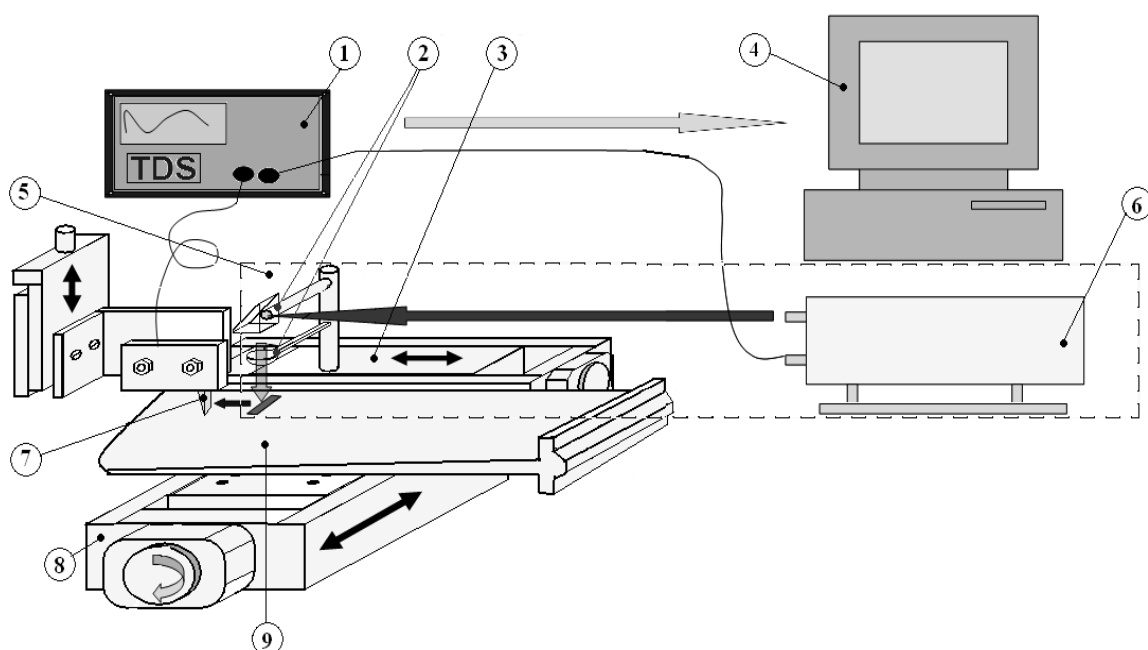


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

- 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

Методика экспериментальных исследований по измерению скорости ПАВ в лопатках ГТД заключалась в следующем. Исследуемая лопатка устанавливалась на координатный столик экспериментальной лабораторной установки. В зоне лопатки, подлежащей контролю, устанавливался клиновидный пьезоэлектрический приемник ПАВ с условием обеспечения сухого точечного контакта с поверхностью лопатки. Блок генерации ПАВ помещался на подвижный столик с шаговым двигателем, что дает возможность перемещать источник акустических волн с заданным шагом. Система линз, фокусирующая излучение на поверхности лопатки, настраивалась таким образом, чтобы линия фокусировки располагалась на расстоянии от 3 мм 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, 3.

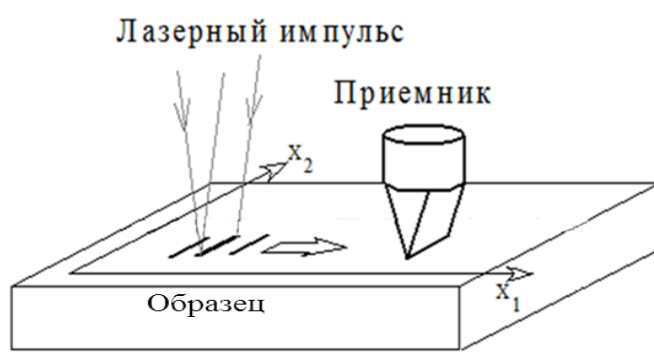


Рис. 2. Схема дифференциального метода измерений

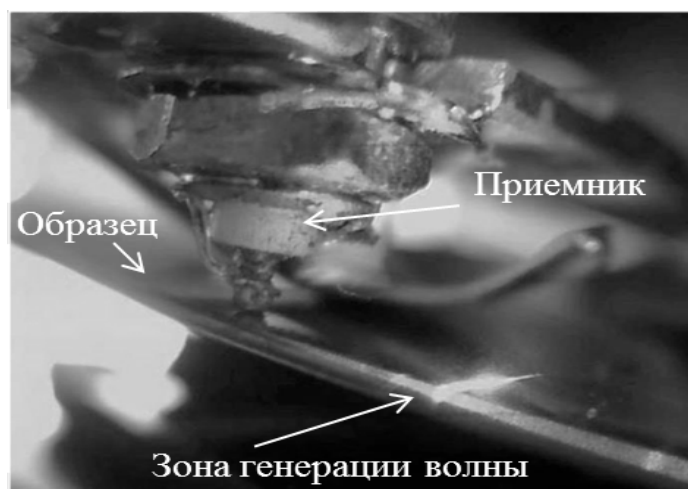


Рис. 3. Положение приемника и зоны возбуждения волны на лопатке

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 поверхностной акустической волны $C_R(\omega)$ [5].

Эффективность возбуждения ПАВ определяется временными и пространственными параметрами лазерного пучка, а также свойствами материала. Скорость ПАВ является функцией двух переменных, а именно, напряжений вдоль σ_{11} и поперек σ_{22} волнового вектора. Эта функция является нелинейной и имеет вид, представленный на рис. 4.

Решить нелинейную обратную задачу в общем виде затруднительно. Поэтому, линеаризуя функцию вблизи начала координат, т.е. заменяя криволинейную поверхность касательной плоскостью, получаем систему уравнений

$$\begin{cases} \frac{\Delta V_1}{V_1} = A\sigma_{11} + B\sigma_{22} \\ \frac{\Delta V_2}{V_2} = A\sigma_{22} + B\sigma_{11} \end{cases} \quad (1)$$

где $V_{1,2}$ – скорости ПАВ в направлениях 1 и 2 соответственно; A и B – коэффициенты акустоупругости, зависящие от плотности и упругих модулей среды второго и третьего порядков.

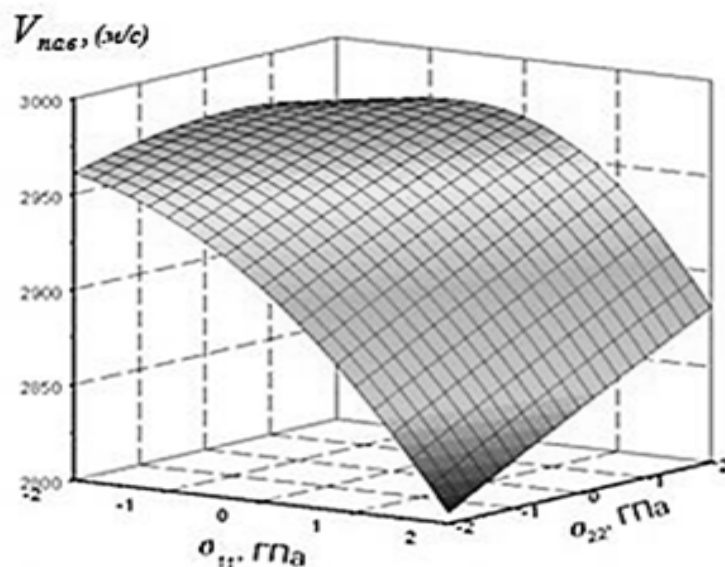


Рис. 4. Зависимость ПАВ от действующих напряжений в образцах из сплава Д16

Решая систему (1) относительно σ_{11} и σ_{22} , получаем окончательные выражения, связывающие остаточные напряжения с относительными изменениями скоростей ПАВ

$$\begin{cases} \sigma_{11} = \frac{1}{A^2 - B^2} \left(A \frac{\Delta V_1}{V_1} - B \frac{\Delta V_2}{V_2} \right) \\ \sigma_{22} = \frac{1}{A^2 - B^2} \left(A \frac{\Delta V_2}{V_2} - B \frac{\Delta V_1}{V_1} \right) \end{cases} \quad (2)$$

Исследование возможности практического использования отношения (2) для определения напряжения в конструкциях лазерным оптико-акустическим методом затруднительно по причине неоднозначности определения коэффициентов A и B в связи с необходимостью решения задач нелинейной акустики [7; 8].

Поэтому предлагается для оценки величины остаточных напряжений измерять скорость ПАВ в ненагруженном образце из данного материала без остаточных напряжений V_0 , а затем ее относительное изменение в исследуемом образце лазерным оптико-акустическим методом.

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. Задача определения компоненты напряжения σ_{11} сводится при этом к измерению скорости ПАВ V_1 .

При оценке остаточных напряжений в лопатках авиационных газотурбинных двигателей 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, когда напряжения и деформации могут иметь противоположный знак и другие значения по сравнению с рабочими. 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 сложнапряженного 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 Ansis. 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.

Затем для экспериментального определения фактических численных значений напряженно-деформированного состояния в материале лопаток ГТД с помощью лазерного оптико-акустического метода необходимо установить корреляционные зависимости между значениями скоростей ПАВ и величинами остаточных напряжений в данном материале.

Для этого были проведены экспериментальные исследования остаточных напряжений в лопатках из сплава ВТ6 перспективного ГТД ПС-90А для военно-транспортного самолета Ил-76МД-90. Необходимым условием применения лазерного оптико-акустического метода для построения практических калибровочных характеристик конкретных деталей ГТД является использование в качестве образцов деталей из того же материала, с аналогичной механической и термической обработкой.

Для моделирования напряженно-деформированного состояния было использовано нагружение образцов изгибом. 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 в лопатках ГТД использовалась разработанная экспериментальная лабораторная установка, представленная на рис. 1, в которой вместо координатного столика для размещения образца использовалось устройство для изгибного нагружения образцов (рис. 5).

Нагружение осуществлялось ступенчато таким образом, чтобы отклонение конца пластины d от исходного (ненапряженного) положения изменялось с шагом 0,5 мм. При таком нагружении напряжение в области измерения на поверхности образца описывается формулой (в приближении Эйлера-Бернулли [9])

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

где $h=3$ мм – толщина образца; E – модуль Юнга, для сплава ВТ6 $E=104$ ГПа.

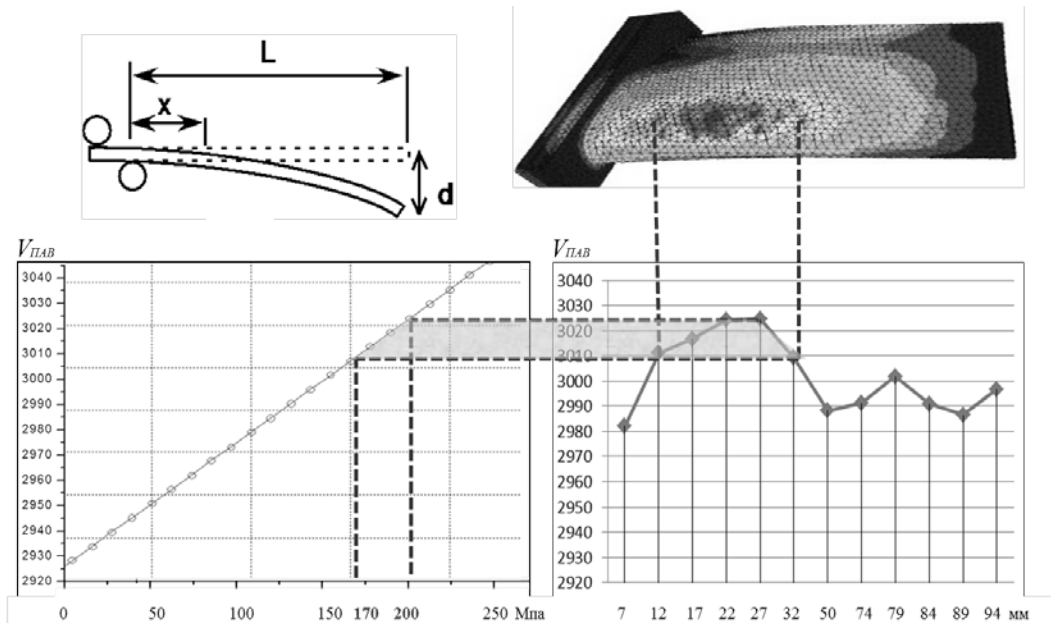


Рис. 5. Распределение напряженно-деформированного состояния в лопатке

Результаты экспериментов и их обсуждение

В ходе проведенных исследований были получены результаты в виде зависимости скорости поверхностной акустической волны от напряжения в исследуемой области образца (рис. 5). После проведения измерений производилось сопоставление полученных результатов скоростей ПАВ в исследуемых лопатках с результатами моделирования напряжения для данного материала (рис. 5).

Анализ полученных данных (рис. 5) показывает, что изменение скорости ПАВ от корневого сечения по перу лопатки соответствует характеру распределения напряжения в лопатке ГТД, пунктирной линией выделено численное значение напряжения, соответствующее данной скорости ПАВ.

Используя данный подход, можно по значениям скоростей поверхностной акустической волны получить картину распределения остаточных напряжений для лопаток различных ГТД.

Заключение

Таким образом, основные разделы методики оценки остаточных напряжений в лопатках ГТД лазерным оптико-акустическим методом имеют вид:

1. Моделирование напряженно-деформированного состояния для исследуемого материала методом искусственного нагружения.

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

$$\sigma_{\sigma} > \sigma_{раб} + \sigma_{ост}, \quad (4)$$

где σ_{σ} – предел прочности материала конструкции.

При выполнении данного условия (4) 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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лозицкий Л. П., Янко А.К., Лапшов В.Ф. Оценка технического состояния авиационных ГТД. - М.: Транспорт, 1982.
2. Лозовский В.Н, Бондал Г.В., Каксис А.О. Диагностика авиационных деталей. - М.: Машиностроение, 1988.
3. Ивочкин А.Ю., Карабутов А.А., Лямшев М.Л., Пеливанов И.М., Рохатги У., Субудхи М. Измерение распределения скорости продольных акустических волн в сварных соединениях лазерным оптикоакустическим методом // Акустический журнал. - 2007. - Т. 53. - № 4. - С. 1 – 8.
4. Гусев В.Э., Карабутов А.А. Лазерная оптоакустика. - М.: Наука, 1991.
5. Девиченский А.Ю., Ломоносов А.М., Жаринов С.Е., Михалевич В.Г. Диагностика остаточных напряжений в металлах с помощью широкополосных поверхностных акустических импульсов // Акустический журнал. - 2009. - Т. 55. - № 1. - С. 39 – 46.
6. Lomonosov A., Mayer A., Hess P. Laser-based surface acoustic waves in material science // Experimental Methods in the Physical Sciences, Academic Press, New York. 2001. V. 39. P. 65 – 134.
7. Мишакин В.В. Исследование влияния пластического деформирования на эффект акустоупругости // Нелинейный мир. - 2009. - Т. 7. - № 10. - С. 787–791.

8. Курашкин К.В., Мишакин В.В. Способ контроля уровня остаточных напряжений в сварных соединениях труб // Вестник научно-технического развития. - 2012. - Т. 54. - № 2. - С. 11 – 17.

9. Манита А.Д. Теория вероятностей и математическая статистика. - М.: Издательский отдел УНЦ ДО. - 2001.

ESTIMATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF A GAS TURBINE ENGINE BLADES BY LASER OPTICAL-ACOUSTIC METHOD

Karpenko O.N., Oleshko V.S., Popov A.V., Samoylenko V.M.

Possibility of the use of the laser generation of surface acoustic waves in the blades of aircraft gas turbine engines, registration, processing and analysis of the acoustic waves parameters to assess the possibility of determination of residual stresses is considered.

Key words: laser optical-acoustic method, surface acoustic wave, gas turbine engine blade, residual stresses.

Сведения об авторах

Карпенко Олег Николаевич, 1979 г.р., окончил Ставропольское ВВАИУ (2005), старший научный сотрудник ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», автор более 12 научных работ, область научных интересов - техническая диагностика и неразрушающий контроль конструкций ответственного назначения.

Олешко Владимир Станиславович, 1975 г.р., окончил ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского (2003), кандидат технических наук, профессор учебного военного центра при МАИ, автор более 40 научных работ, область научных интересов - неразрушающий контроль деталей авиационной техники.

Попов Алексей Владимирович, 1973 г.р., окончил Ростовское ВВКИУ РВ им. М.И. Неделина (1995), доцент, доктор технических наук, доцент кафедры авиационных двигателей ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», автор более 140 научных работ, область научных интересов — техническая диагностика и неразрушающий контроль конструкций ответственного назначения.

Самойленко Василий Михайлович, 1965 г.р., окончил ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского (1985), доктор технических наук, профессор, декан механического факультета МГТУ ГА, автор более 100 научных работ, область научных интересов - неразрушающий контроль деталей авиационной техники.