

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

ЛАЗЕРНЫЙ ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В ЛОПАТКАХ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

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

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.

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

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 parameters of acoustic waves to assess the possibility of determination of residual stresses.

В настоящее время промышленностью отрабатываются программы, регламентирующие переход на техническую эксплуатацию авиационной техники (АТ) по состоянию [1, 2]. Такой переход позволит существенно снизить стоимость и увеличить сроки эксплуатации АТ за счет наиболее полного использования работоспособности каждого конкретного изделия.

Широко применяемым в АТ двигателем является газотурбинный двигатель (ГТД) в котором основным силовым элементом, ограничивающим ресурс АТ, являются лопатки компрессора и турбины ГТД. Основной причиной возникновения усталостных повреждений (трещин) в материале лопаток ГТД приводящих к их преждевременному срыву с эксплуатации являются остаточные напряжения.

Сжимающие остаточные напряжения противостоят разрушающему действию растягивающих рабочих нагрузок, в то время как растягивающие остаточные напряжения наоборот усиливают их действие. Разрушение начинается с образования трещины в местах концентрации напряжения на поверхности лопатки или вблизи ее поверхности. Если при этом на поверхности присутствуют растягивающие напряжения, то они способствуют росту трещин, что приводит к ускоренному разрушению лопатки ГТД. Сжимающие напряжения, наоборот, препятствуют росту трещин и их возникновению.

Если же в материале лопаток ГТД помимо напряжений, возникающих вследствие рабочих нагрузок, присутствуют также технологические остаточные напряжения, возникающие в материале при изготовлении лопатки или предыдущей эксплуатации и продолжающие действовать в отсутствие рабочих нагрузок, то эти напряжения суммируются. Поэтому необходимо определять величину и знак остаточных напряжений в лопатках ГТД при определении их технического состояния и принятия решения о продлении ресурса.

На данный момент не существует универсального метода, дающего возможность получить распределение остаточных напряжений по всему объему напряженного тела при трехосном напря-

женном состоянии. Причиной тому, является очень слабое влияние остаточных напряжений на изменение упругих и теплофизических свойств напряженной среды. Максимальные изменения свойств среды, связанные с наличием остаточных напряжений, составляют порядка десятых-сотых долей процента по сравнению с ненапряженными состояниями. Чтобы отслеживать столь малые градиенты остаточных напряжений, необходимо измерять характеризующие их теплофизические и упругие свойства среды с очень высокой точностью.

В связи с этим для 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 [3].

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. [3, 4]. Но главным общим недостатком разрушающих методов является то, что для диагностирования 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.) [3], 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 на-

правлению действия максимальных напряжений и деформаций и другие.

Особое положение среди неразрушающих методов занимают ультразвуковые методы. Они основаны на определении остаточных напряжений по измерению 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 [5]. Это достигается с использованием коротких акустических импульсов, получаемых средствами лазерной оптоакустики [5-8]. Но вопрос количественной оценки остаточных напряжений по изменению скорости звука в материале реальных конструкций является актуальным и малоизученным.

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.

Эффективность возбуждения ПАВ определяется временными и пространственными параметрами лазерного пучка, а так же свойствами материала. На приведенных графиках (рис. 1) представлены полученные зависимости скорости ПАВ в образцах из алюминиевых сплавов от величины приложенного напряжения для случаев распространения плоского фронта волны вдоль и поперек действия нагрузки [7].

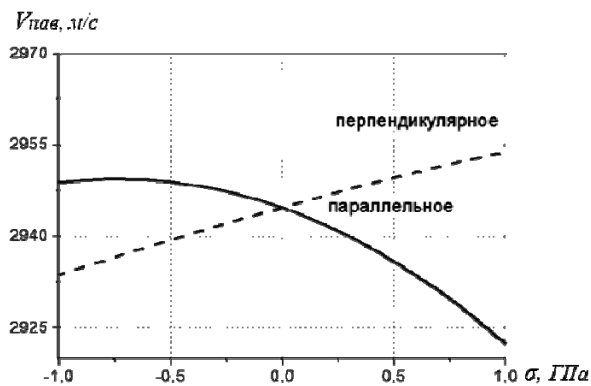


Рис. 1 – Зависимость изменения фазовой скорости ПАВ от нагрузки в образцах из сплава Д16

Скорость ПАВ (рис. 1) 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. 2 [7].

Решить нелинейную обратную задачу в общем виде затруднительно. Поэтому, линеаризуя функцию вблизи начала координат, т. е., заменяя криволинейную поверхность касательной плоскостью, получаем систему уравнений [7]:

$$\begin{cases} \frac{DV_1}{V_1} = Ay_{11} + By_{22} \\ \frac{DV_2}{V_2} = Ay_{22} + By_{11} \end{cases}, \quad (1)$$

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.

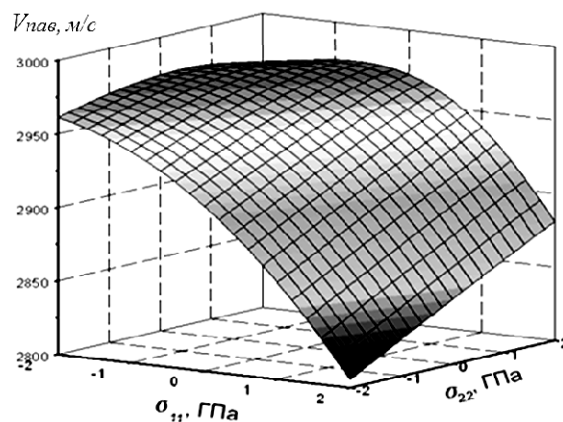


Рис. 2 – Зависимость скорости ПАВ от действующих напряжений в образце из сплава Д16

Решая систему (1) относительно σ_{11} и σ_{22} получаем окончательные выражения, связывающие остаточные напряжения с относительными изменениями скоростей ПАВ [7]:

$$\begin{cases} y_{11} = \frac{1}{A^2 - B^2} \left(A \frac{DV_1}{V_1} + B \frac{DV_2}{V_2} \right) \\ y_{22} = \frac{1}{A^2 - B^2} \left(A \frac{DV_2}{V_2} + B \frac{DV_1}{V_1} \right) \end{cases}. \quad (2)$$

Исходя из уравнений (1) и (2) можно оценить величину компонент остаточного напряжения, измерив значение относительного изменения компонента скорости ПАВ.

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 [9, 10].

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 в направлении от корневого сечения вдоль по перу лопатки. Задача определения компоненты напряжения σ_{11} сводится при этом к измерению скорости ПАВ V_1 .

Таким образом, для оценки остаточных напряжений в лопатках авиационного двигателя с помощью лазерного оптико-акустического метода необходимо экспериментально измерять значение относительного изменения скорости ПАВ для конструкционного материала, из которого изготовлены лопатки ГТД.

Литература

1. Л.П. Лозицкий, А.К. Янко, В.Ф. Лапшов, *Оценка технического состояния авиационных ГТД*. Транспорт, Москва, 1982. 160 с.
2. А.П. Кирпичников, В.В. Кузнецов, Н.П. Сметанников, М.С. Тофоров, И.И. Легеза, В.С. Олешко, Д.П. Ткаченко, *Вестник КТУ*, **13**, 81–83 (2013).
3. В.Н. Лозовский, Г.В. Бондал, А.О. Каксис, *Диагностика авиационных деталей*. Машиностроение, Москва, 1988. 280 с.
4. И.В. Герасимов, В.С. Олешко, Д.П. Ткаченко, А.П. Кирпичников, *Вестник КТУ*, **17**, 146–149 (2012).
5. А.Ю. Ивочкин, А.А. Карабутов, М.Л. Лямшев, И.М. Пеливанов, У. Рохатги, М. Субудхи, *Акустический журнал*, **53**, 4, 1-8 (2007).
6. В.Э. Гусев, А.А. Карабутов, *Лазерная оптоакустика*. Наука, Москва, 1991. 304 с.
7. А.Ю. Девиченский, А.М. Ломоносов, С.Е. Жаринов, В.Г. Михалевич, *Акустический журнал*, **55**, 1, 39-46 (2009).
8. A. Lomonosov, A. Mayer, P. Hess, *Experimental Methods in the Physical Sciences*, 39, 65-134 (2001).
9. В.В. Мишакин, *Нелинейный мир*, **7**, 10, 787-791 (2009).
10. К.В. Курашкин, В.В. Мишакин, *Вестник научно-технического развития*, **54**, 2, 11-17 (2012).

© **О. Н. Карпенко** – ст. науч. сотр. ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», kaska79@yandex.ru; **А. П. Кирпичников** – д-р физ.-мат. наук, зав. каф. интеллектуальных систем и управления информационными ресурсами 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, доц. каф. авиац. двигателей ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», avpnil@rambler.ru; **Д. П. Ткаченко** – канд. тех. наук, нач. цикла воен. инст. МАИ (НИУ), tdp@list.ru.