

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 $CR(\omega)$ [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 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 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]): 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 $\sigma_{\text{ср}}$ и значений остаточных напряжений полученных с помощью лазерного оптико-акустического метода $\sigma_{\text{ост}}$ должна соответствовать следующему условию: $\sigma_{\text{ср}} + \sigma_{\text{ост}} \leq \sigma_{\text{св}}$ где $\sigma_{\text{св}}$ - 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].