
Толщинометрия стенок полых лопаток турбин авиационных двигателей

**Ездаков
Владимир Алек-
сандрович**

Ведущий инженер
БНМК ОГМет ФГУП
ММПП «Салют».

**Семеренко
Алексей
Владимирович**

Начальник отдела
средств НК ЗАО
«МП Диагност»,
II уровень по УЗК.

Рабочие лопатки турбин современных авиационных двигателей и других подобных систем, как правило, имеют сложную геометрическую форму. Наличие внутренней полости для охлаждения пера лопатки воздушным потоком в процессе работы двигателя исключает возможность измерения толщины стенок пера со стороны спинки и корыта традиционными механическими средствами ввиду отсутствия двустороннего доступа к объекту измерения. Однако достоверная информация о фактической толщине стенок лопаток необходима для обеспечения безопасности их эксплуатации в течение назначенного ресурса, а также при механической обработке пера в процессе производства. На выбор метода и средств измерений толщины стенок полых лопаток оказывают существенное влияние:

- профильная поверхность (ребра жесткости, вихревые матрицы, внутренние стенки и т. п.) стенок пера со стороны внутренней полости;
- малые радиусы кривизны выпуклых и вогнутых поверхностей;
- клиновидность стенок пера и т. д.

Несоответствие (утонение) толщины стенок пера полых лопаток конструкторской документации (КД) может привести к разрушению лопатки в полетных условиях и, как следствие, к возникновению аварийной ситуации. Утонение стенок пера полых лопаток может произойти в результате смещения (кивка) керамического стержня в выплавляемой модели, нарушений технологического процесса при механической обработке пера и т. д.

Задачи по измерению толщины стенок полых лопаток могут успешно решаться средствами ультразвуковой толщинометрии. В зависимости от формы лопатки и диапазона измеряемых толщин можно использовать три типа ультразвуковых измерительных приборов (систем).

1. Цифровые толщиномеры с выводом акустического сигнала на экран прибора или компьютера. Отображение на экране позволяет анализировать акустический сигнал и значительно повышает точность настройки режимов измерения.

2. Генераторы импульсов/приемники с осциллографом.

3. Специальные измерительные системы, состоящие из генератора импульсов/приемника с логическими схемами стробирования и синхронизации сигнала, блоком оцифровки и компьютера. Такие системы используются, в частности, для измерения малых толщин (менее 0,2 мм) и в других специальных случаях, когда необходимо использовать высокочастотные преобразователи.

Выбор типа измерительного прибора зависит от требований КД, технических условий (ТУ), допустимой погрешности измерений и акустических свойств материала контролируемого объекта. Основные критерии выбора приведены ниже.

Для измерения толщины стенок полых лопаток турбин могут использоваться раздельно-совмещенные пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП), преобразователи с линией задержки и иммерсионные преобразователи. Раздельно-совмещенные ПЭП и ПЭП с линией задержки можно использовать, если при этом обеспечивается качественный контакт с поверхностью контролируемого объекта. Одним из основных факторов, влияющих на качество контакта, является кривизна выпуклых и вогнутых поверхностей объекта. При радиусе кривизны более 200 мм можно использовать преобразователи с контактной поверхностью линии задержки диаметром 4 мм, при меньших радиусах используются ПЭП с контурированными (притертыми по поверхности) линиями задержки. В некоторых случаях, когда для измерения толщины участков с малыми радиусами кривизны вогнутых и выпуклых поверхностей невозможно использовать обычные ПЭП с линией задержки, рекомендуется использовать фокусированные преобразователи с линией задержки, диаметр контактной поверхности которых составляет 2,0 мм.

Для измерения толщины объектов с малыми радиусами кривизны (в частности, стенок входных кромок турбинных лопаток) наиболее эф-



Рис. 1. Процесс измерения толщиномером 25 DL PLUS

фактивно использование иммерсионных ПЭП.

Измерения толщины преобразователями с линией задержки и иммерсионными преобразователями (рис. 1) могут производиться в режиме 2 (от эхо-сигнала границы сред до первого донного эхо-сигнала, рис. 2, 3) или в режиме 3 (между последовательными донными эхо-сигналами). Режим 3

обеспечивает более высокую разрешающую способность при измерении малых толщин, чем режим 2. Однако использование этого режима возможно только при наличии нескольких донных эхо-сигналов в точке измерения. При наличии только одного донного эхо-сигнала вследствие большой кривизны поверхности или ослабления ультразвукового сигнала измерения следует проводить в режиме 2.

Минимальная толщина стенок лопаток при использовании ПЭП с линией задержки или иммерсионного ПЭП с частотой 20 МГц составляет приблизительно 0,15 мм (в режиме 3) и 0,5 мм (в режиме 2). Это самая высокая частота преобразователя, применяющегося с ручными толщиномерами. Если необходимо измерить меньшую толщину, следует использовать генераторы импульсов/приемники или специальные системы, обеспечивающие более высокие частоты.

Как отмечалось, полые лопатки турбин имеют сложную геометрическую форму внутренних поверхностей. Вихревая матрица состоит из перекрещивающихся каналов, обеспечивающих заданную циркуляцию охлаждающего воздуха во внутренней полости лопатки. Как правило, в зонах расположения каналов вихревой матрицы при использовании ПЭП с линией задержки или иммерсионного донный эхо-сигнал получить невозможно. Это происходит в результате рассеяния донного сигнала на стенках каналов вихревой матрицы, так как площадь звукового поля, возбуждаемого преобразователем с линией задержки, превышает площадь плоских участков между ними. Клиновидность (не параллельность) измеряемых стенок полых лопаток также может привести к искажению эхо-сигналов и, в результате, к ошибкам в измерении. В этих случаях рекомендуется применять фокусированный иммерсионный ПЭП,

который обеспечивает более четкое прохождение эхо-сигналов, чем ПЭП с линией задержки.

Во всех случаях выбор комбинации преобразователь/измерительный прибор должен производиться на образцах, соответствующих реальным объектам измерения по материалу, геометрическим параметрам и технологии изготовления. Это особенно важно из-за большого разнообразия геометрических форм лопаток турбин.

На рис. 2 изображены эхо-сигналы при контроле входной кромки лопатки турбины со стороны корыта (вогнутая поверхность) толщиной 1,04 мм, полученные в режиме 3 с использованием толщиномера 25 DL PLUS и ПЭП M208 ($d = 3$ мм, $f = 20$ МГц) производства Panametrics-NDT™. Достаточно большой радиус кривизны поверхности в точке измерения обеспечивает качественный контакт ПЭП с поверхностью лопатки. Наличие нескольких чистых эхо-сигналов позволяют проводить измерения в режиме 3.

На рис. 3 изображены эхо-сигналы при контроле стенки лопатки турбины со стороны спинки (выпуклая поверхность) толщиной 1,78 мм, полученные в режиме 2 с использованием тех же толщиномера и ПЭП. В данном случае наличие внутренних стенок каналов вихревой матрицы отчасти ослабляет эхо-сигнал. В отсутствии нескольких четко выраженных эхо-сигналов рекомендуется производить измерения в режиме 2.

На рис. 4 изображены эхо-сигналы от стенки лопатки турбины толщиной 1,3 мм с выпуклой поверхностью малого радиуса кривизны ($r = 25$ мм).

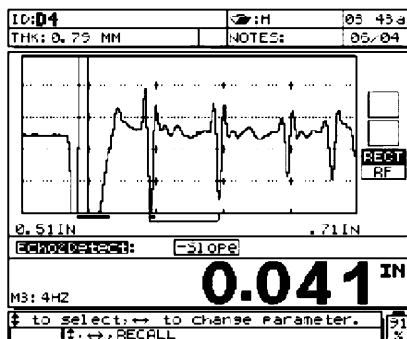


Рис. 2. Эхо-сигналы при контроле входной кромки лопатки турбины со стороны корыта (вогнутая поверхность) толщиной 1,04 мм

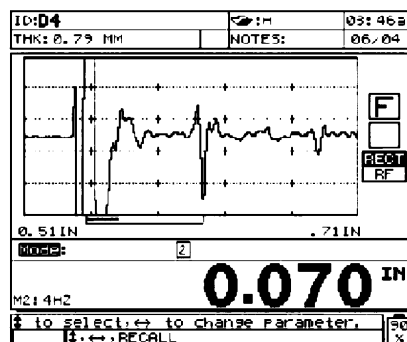


Рис. 3. Эхо-сигналы при контроле стенки лопатки турбины со стороны спинки (выпуклая поверхность) толщиной 1,78 мм

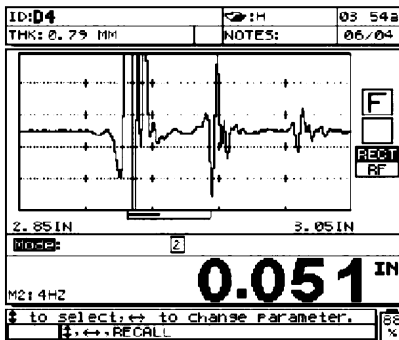


Рис. 4. Эхо-сигналы от стенки лопатки турбины толщиной 1,3 мм с выпуклой поверхностью малого радиуса кривизны ($r = 25$ мм)

результат получен при использовании иммерсионного ПЭП V316-B производства Panametrics-NDT™ с частотой 20 МГц, установленного на локальную открытую иммерсионную ванну. В данном случае значительная кривизна выпуклой поверхности затрудняет использование ПЭП с линией задержки. Наличие оптимального контакта ПЭП с криволинейной поверхностью контролируемого объекта определяется оператором по форме эхо-сигналов. Преобразователь V316-B и открытая локальная иммерсионная ванна — самое распространенное сочетание для ручного измерения толщины стенок лопаток иммерсионным способом.

Для данных измерений можно было бы использовать фокусированные ПЭП с линией задержки V260-SM и V260-RM Sonopren® с диаметром контактной поверхности 1,5–2,0 мм. Кроме стандартных иммерсионных преобразователей и преобразователей с линией задержки компания Panametrics-NDT™ выпускает три специальных низкопрофильных преобразователя с линией задержки с частотой 20 МГц, которые рекомендуется использовать для измерений толщины стенок лопаток сопловых блоков, когда пространство между лопатками ограничено и доступ к отдельным участкам контролируемой поверхности затруднен. Все три типа ПЭП установлены на шарнирной подвеске, что обеспечивает оптимальную их ориентацию на объекте контроля в условиях ограниченного доступа. Высота ПЭП с линией задержки M2054 с частотой 20 МГц составляет 6,75 мм. Кроме того, он оснащен рукояткой длиной 75 мм. ПЭП M2055 аналогичен упомянутому выше, но его высота вместе с линией задержки составляет 10 мм. Преобразователь V2034 оснащен 10 мм головкой, установленной на изогнутой рукоятке длиной 300 мм.

Компания Panametrics-NDT™ поставляет также комплекты специального оборудования для измерений толщины стенок лопаток турбин, включающие цифровые толщиномеры, генераторы импульсов/приемники моделей 5072 PR или 5800 PR с осциллографами различных типов.