

УДК 621.378:535

Р.Х. МАКАЕВА, А.Х. КАРИМОВ, А.М. ЦАРЕВА

Казанский национальный исследовательский технический университет
имени А.Н. Туполева – КАИ, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПАЯНЫХ И СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Приведены результаты исследований качества паяных и сварных соединений деталей двигателей летательных аппаратов с применением метода голографической интерферометрии. Исследовались непропаи сотовых вставок, пронцаемых вафельных материалов, качество сварных соединений деталей, изготовленных различными способами сварки. Получены интерферограммы годных и дефектных деталей, позволяющие выявить области дефектов. Показано, что контроль качества паяных и сварных соединений деталей при вибрации позволяет выявить непропаи и непровары, которые не удастся установить статическими методами. Результаты исследований использованы при разработке технологических процессов изготовления паяных и сварных соединений.

Ключевые слова: паяные и сварные соединения, вибрация, формы колебаний, голографическая интерферометрия.

Введение

В конструкциях турбомашин часто содержатся неразъемные соединения деталей, выполняемые пайкой и сваркой. Наиболее распространенные дефекты таких соединений – непропаи и непровары. Подобные дефекты являются подповерхностными, осуществить их контроль достаточно сложно, особенно если соединяются значительные поверхности: они могут плотно контактировать, но не быть соединенными.

Известными методами контроля выявить такие дефекты затруднительно, так как они выполняются в статике – без приложения каких-либо периодических нагрузок. При эксплуатационных нагрузках (тепловых, вибрационных) происходит нарушение контакта, что влечет за собой раскрытие дефекта и далее – разрушение детали.

Проводились исследования возможности применения голографической интерферометрии для контроля качества паяных и сварных соединений ряда деталей.

В авиационных газотурбинных двигателях (ГТД) в качестве лабиринтных уплотнений между торцами лопаток и корпусом применяются сотовые вставки. Их использование увеличивает коэффициент полезного действия двигателя, так как уменьшается перетекание газов.

Сотовая вставка представляет собой пластину-подложку размерами 203 × 26 × 3 мм. К одной стороне пластины жаропрочным припоем припаиваются сотовые уплотнения из алюминия (рис. 1).

Непропай сотовых вставок определяется в настоящее время визуально.

При таком способе контроля имеется вероятность пропуска дефекта, так как пластина и сотовые уплотнения могут соприкоснуться по линиям соединения, не имея прочного контакта и соединительных сил. Отрыв сотового элемента от пластины в процессе эксплуатации способствует образованию забоин на лопатках, что может привести к образованию трещин и разрушению лопаток.

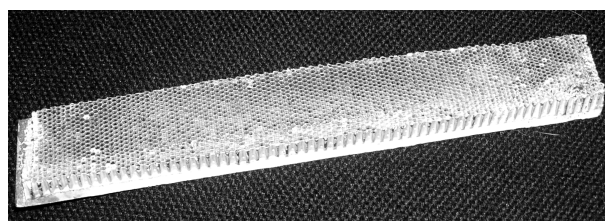


Рис. 1. Общий вид сотовой вставки

Результаты исследований

Для исследования возможности применения метода голографической интерферометрии при обнаружении локальных зон непропая на дефектной сотовой конструкции был проведен эксперимент с двумя вставками: годной и дефектной.

На голографической установке [1] детали зажимались в консольном положении в специальном приспособлении. К прижимам подводился пьезоэлектрический вибратор. Такой способ позволяет бесконтактно возбуждать колебания в детали.

Смещение W сотовой вставки при установившейся реакции конструкции на синусоидальную возбуждающую силу определяется, согласно работе [2], по выражению:

$$W(x, y, t) = \operatorname{Re} \left[F \exp(i\omega t) \sum_{j=1}^N \frac{\Phi_j(x, y) \Phi_j(x_0, y_0) / M_j}{2\beta_j \omega i + (\omega_j^2 - \omega^2)} \right],$$

где $\operatorname{Re} [\cdot]$ определяет действительную часть комплексной функции;

F – усилие зажима;

ω – частота синусоидального возбуждения;

$\Phi_j(x, y)$ – j -я собственная форма колебаний вставки;

x_0 и y_0 – координаты точки приложения силы;

β – коэффициент демпфирования j -й формы;

ω_j – резонансная частота j -ой формы;

M_j определяется выражением

$$M_j = \iint \rho_A(x, y) \Phi_j^2(x, y) dx dy,$$

где $\rho_A(x, y)$ – удельная масса на единицу объема.

Для того чтобы предсказать реакцию конструкции на синусоидальное возмущение в заданном диапазоне частот необходимо знать все функции собственных форм конструкции, резонансные частоты, коэффициенты демпфирования и распределение массы конструкции. Функции Φ_j форм и резонансные частоты ω_j можно найти с помощью голографических интерферограмм.

В процессе колебаний на резонансной частоте производилась голографическая съемка форм колебаний методом усреднения по времени.

Первая резонансная форма колебаний дефектной детали была получена на частоте 2758 Гц. Регулярные редкие интерференционные линии характеризуют изгибные колебания пластины – основы вставки. На этой частоте непропай не проявился.

Дефектные зоны начали проявляться при колебаниях сотовой вставки на частотах свыше 20 кГц. При вибрациях на резонансной частоте 20505 Гц форма колебаний годной вставки имеет вид с центральной белой продольной узловой линии с пучностями по краям (рис. 2, а).

На фотографии интерферограммы (рис. 2, б) формы резонансных колебаний ($f = 20048$ Гц) дефектной вставки в местах, где должна проходить узловая линия, четко выделяются темные участки – зоны дефекта. Возникновение этих зон обусловлено отсутствием связи между пластиной и сотовыми уплотнениями. Подобные расслоения ведут к появлению дополнительных образований, колеблющихся по собственным формам в высокочастотном диапазоне. Такой характер интерференционной картины в области дефектов объясняется тем, что уплотнение в этих местах можно представить как заземленную

по контуру мембрану, имеющую свои собственные резонансные формы.

Проведенные исследования показали, что по картинам форм колебаний сотовых вставок на резонансных частотах свыше 20 кГц, полученным методом голографической интерферометрии, достаточно четко можно определять непропай.

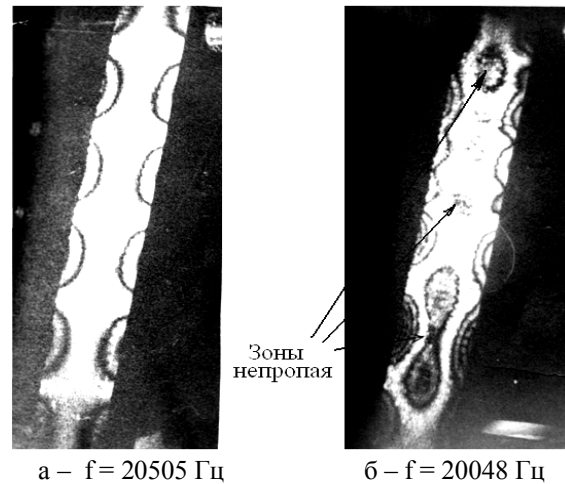


Рис. 2. Интерферограммы форм колебаний вставок на резонансных частотах: а – годная вставка; б – дефектная вставка

В настоящее время в авиационных двигателях сохраняется тенденция к увеличению температуры газа перед турбиной, что позволяет повысить характеристики двигателей. Это, в свою очередь, определяет необходимость изыскания более эффективных способов охлаждения горячих элементов двигателей. В качестве одного из способов решения этих проблем является применение проницаемых вафельных материалов (ПВМ).

Известны примеры использования ПВМ для охлаждаемых сопловых лопаток ГТД. Проницаемые вафельные материалы состоят из двух или более слоев, соединяемых диффузионной сваркой. Поэтому актуальным является выбор метода контроля сварочного соединения.

Проводились работы по применению метода голографической интерферометрии для контроля качества соединения слоев ПВМ, осуществляемого диффузионной сваркой, при изготовлении деталей газосборника ГТД.

Листовые перфорированные заготовки толщиной 0,8 мм из жаропрочного сплава ЭП 648 соединялись по поверхности с контактной площадью 5800 мм² (рис. 3, а).

Для контроля непроваров была применена голографическая интерферометрия вибрирующего объекта методом усреднения по времени. Исследования проводились в диапазоне частот от 200 до 10000 Гц.

На рис. 3, б-е приведены восстановленные голограммы детали ПВМ, иллюстрирующие картины собственных форм колебаний на резонансных частотах. Полосы на интерферограммах представляет собой плавные цельные линии.

Если бы деталь имела участки некачественного соединения, то есть присутствовало бы расслоение

между двумя контактными поверхностями, то произошло бы нарушение непрерывности системы интерференционных полос или наблюдались бы локальные аномалии в виде ломаных линий или дополнительных пучностей.

Исследования подтвердили удовлетворительное качество диффузной сварки.

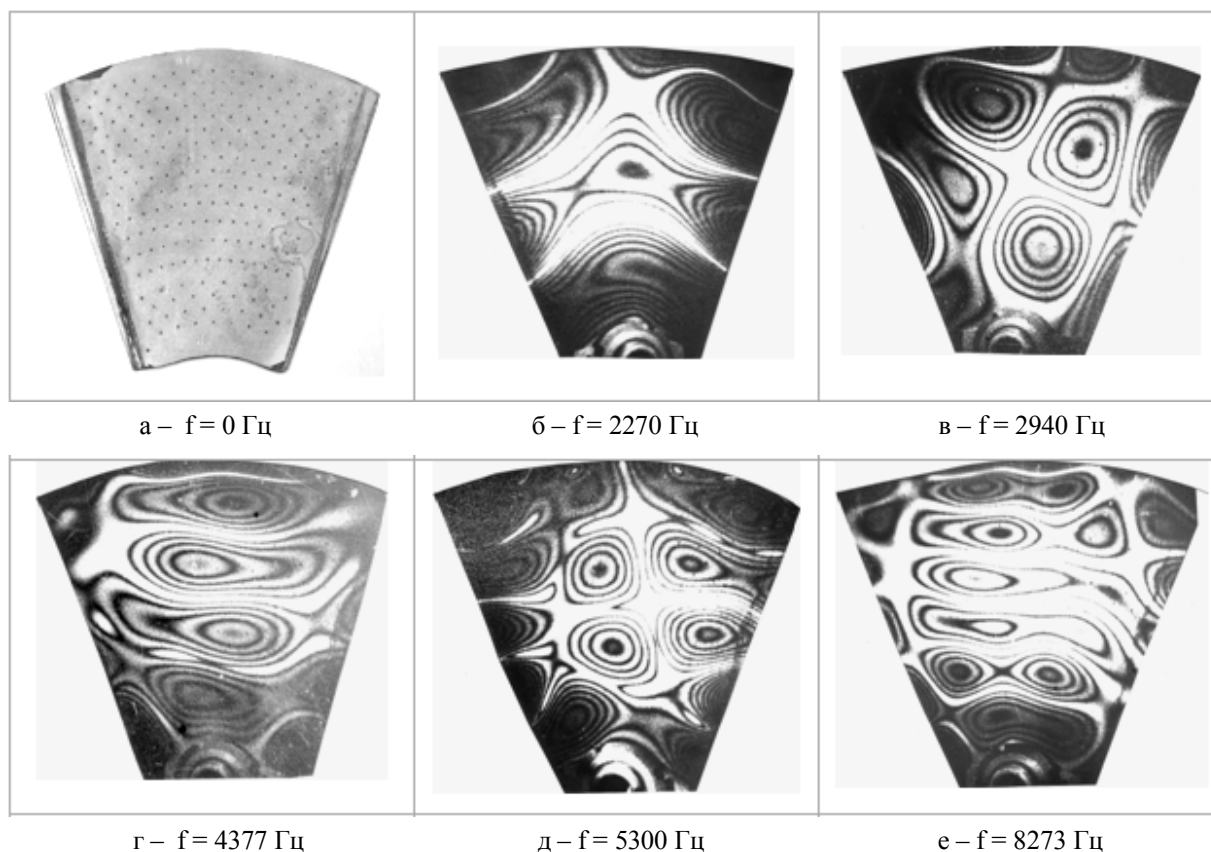


Рис. 3. Деталь из пронцаемых вафельных материалов:
а – общий вид; б-е – фотография детали, вибрирующей на резонансных частотах

Результаты проведенных экспериментальных исследований показали возможность применения метода голографической интерферометрии в качестве неразрушающего контроля для определения качества соединения, полученного диффузионной сваркой.

Проводились исследования сварных швов, выполненных различными способами сварки.

Тестировались три вида пластин из алюминиевого сплава АМЦ: эталонный образец без шва и со швами, выполненными автоматической и ручной дуговой сваркой. Размеры образцов составляли 60×80 мм.

Образцы подвергались вибрационному нагружению.

Для внесения минимальных искажений в формы колебаний пластины крепились в точке у основания. Голографические интерферограммы резонансных форм колебаний пластин регистрировались методом усреднения по времени.

Исследования проводились в диапазоне частот до 17 кГц.

Из полученных голографических интерферограмм были выбраны одинаковые формы колебаний F_{32} и F_{42} пластин (рис. 4). Обозначение форм проведено также согласно классификационной таблице форм колебаний эталонной пластины [3].

Сравнение исследуемых пластин, колеблющихся по одинаковым формам, показало повышение частот резонансных колебаний пластин со швами по сравнению с пластинами без шва.

Это можно объяснить увеличением жесткости пластин со сварными швами. Например, у пластины без шва резонансная форма колебаний F_{32} проявилась на частоте $f = 5857$ Гц (рис. 4, б). У пластин со сварными швами, колеблющимися по той же форме – на частотах $f = 6452$ Гц и $f = 6761$ Гц (рис. 4, а, в).

Жесткость пластины с ручным сварным швом выше, чем у пластины с автоматическим сварным швом. Например, резонансные частоты колебаний

пластины с ручным сварным швом по формам F32 и F42 составили $f = 6761$ Гц и $f = 7079$ Гц (рис. 4, в, е), для пластины с автоматическим сварным швом – $f = 6452$ Гц, $f = 6761$ Гц (рис. 4, а, г).

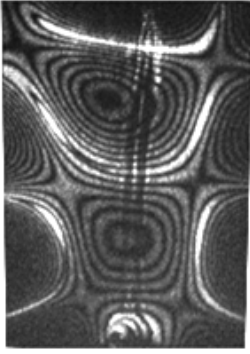
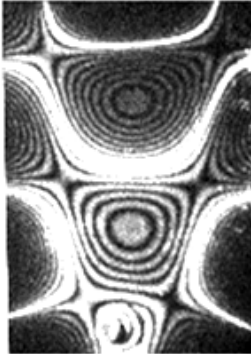
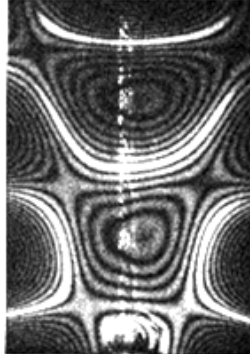
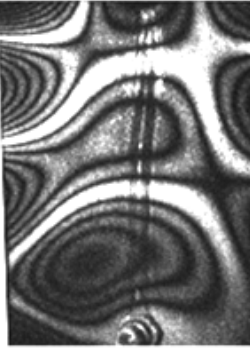
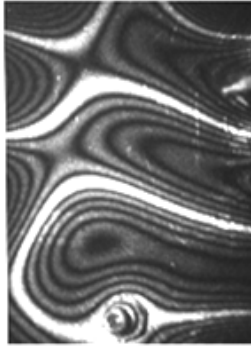
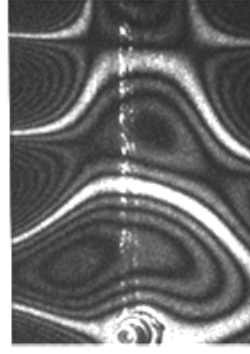
Форма	Автоматическая сварка	Без сварки	Ручная сварка
F ₃₂	 а – $f = 6452$ Гц	 б – $f = 5847$ Гц	 в – $f = 6761$ Гц
F ₄₂	 г – $f = 6761$ Гц	 д – $f = 6718$ Гц	 е – $f = 7079$ Гц

Рис. 4. Голографические интерферограммы резонансных колебаний пластин

Наличие сварных швов изменяют интерференционные линии картин форм колебаний. Искривление полос на шве, выполненном ручной сваркой, проявляются уже в среднем диапазоне частот (рис. 5, а). Автоматический сварной шов вносит ис-

кривление интерференционных полос только в высокочастотном диапазоне (рис. 5, б).

Следовательно, автоматическая сварка по сравнению с ручной сваркой обеспечивает более качественный шов.

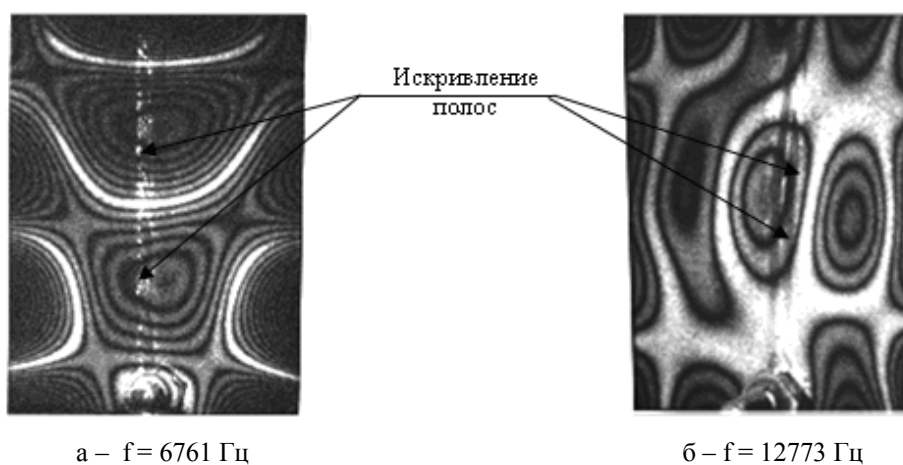


Рис. 5. Голографические интерферограммы резонансных колебаний пластин:
а – ручная сварка; б – автоматическая сварка

Вывод

Проведенные исследования показали, что метод голографической интерферометрии в отличие от традиционных методов контроля позволяет выявлять дефекты соединений в виде непропаев и непроваров в достаточно сложных деталях.

Литература

1. Макаева, Р.Х. Определение вибрационных характеристик деталей ГТД методом голографической

интерферометрии [Текст] / Р.Х. Макаева, А.Х. Каримов, А.М. Царева // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2007. – № 1. – С. 78 – 80.

2. Голографические неразрушающие исследования [Текст]: пер. с англ. / Под ред. Р.К. Эрфа. – М.: Машиностроение, 1979. – 448 с.

3. Макаева, Р.Х. Исследование резонансных форм и частот колебаний пластин применительно к лопаткам турбомашин [Текст] / Р.Х. Макаева, А.М. Царева, А.Х. Каримов // Известия вузов. Авиационная техника. – 2008. – № 3. – С. 14 – 18.

Поступила в редакцию 03.06.2013, рассмотрена на редколлегии 12.06.2013

Рецензент д-р техн. наук, проф., проф. кафедры технологии машиностроительных производств А.Н. Лунёв, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия.

ВИКОРИСТАННЯ ГОЛОГРАФІЧНОЇ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПАЯНИХ І ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ

Р.Х. Макаєва, А.Х. Карімов, А.М. Царьова

Наведено результати досліджень якості паяних і зварних з'єднань деталей двигунів літальних апаратів із використанням методу голографічної інтерферометрії. Досліджено непропаї стільникових вставок, проникних вафельних матеріалів, якість зварних сполучень деталей, які виготовлено різними методами зварювання. Отримано інтерферограми придатних і дефектних деталей, які дозволяють виявити області дефектів. Показано, що контроль якості паяних і зварних з'єднань деталей в умовах вібрації дозволяє виявити непропаї та непровари, які не вдається встановити статичними методами. Результати досліджень використані під час розробки технологічних процесів виготовлення паяних і зварних сполучень.

Ключові слова: паяні та зварні з'єднання, вібрація, форми коливань, голографічна інтерферометрія.

APPLICATION OF HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY FOR THE TESTING OF QUALITY OF THE SOLDERED AND WELDED JOINT

R.Kh. Makayeva, A.Kh. Karimov, A.M. Tzareva

The results of experimental investigations of quality of the soldered and welded joint of aircraft engines components using the method of holographic interferometry are presented. The unsoldered honeycomb insets, pervious waffle materials, the quality of the welded components, producing by different methods of welding, were investigated. Also obtained were the interferograms of fit and faulty components, it made it possible the causes the area of defects. The quality control of the soldered and welded joint of components was allowed to reveal unsoldered and faulty fusion, when components were vibrated. This defects did not revealed by static methods. The results of investigations were applied to work out of technological processes in making the soldered and welded joint.

Key words: the soldered and welded joint, vibration, mode shape, holographic interferometry.

Макаєва Розалія Хабибулловна – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедри технічної фізики, Казанський національний дослідницький технічний університет ім. А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Російська Федерація, e-mail: Roskh2001@mail.ru.

Каримов Альберт Хамзович – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедри технічної фізики, Казанський національний дослідницький технічний університет ім. А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Російська Федерація e-mail: Roskh2001@mail.ru.

Царева Альбіна Маратовна – канд. техн. наук, доцент кафедри технічної фізики, Казанський національний дослідницький технічний університет ім. А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Російська Федерація, e-mail: Roskh2001@mail.ru.