

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ИММЕРСИОННЫЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ КОМПОНЕНТА ДИВЕРТОРА ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Д.С. Ложкова, М.А. Далин, Д.В. Лянзберг (ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»)

Рассмотрены вопросы автоматизированного иммерсионного ультразвукового контроля компонента дивертора термоядерного реактора. Для оценки возможности контроля использовалась ультразвуковая иммерсионная установка LS-500LP в комплекте с фокусированными преобразователями.

Ключевые слова: автоматизированный ультразвуковой контроль, ультразвуковой контроль паяных и сварных соединений, элементы термоядерного реактора, фокусированные пьезоэлектрические преобразователи, непропай.

В 1992 г. стартовал международный проект ITER «International Thermonuclear Experimental Reactor», направленный на создание крупнейшего и наиболее современного термоядерного реактора в мире. Этот научный эксперимент предназначен для демонстрации возможности получения энергии путем термоядерного синтеза, а также направлен на решении физических и технологических проблем, которые могут встретиться на этом пути. В проекте сотрудничают множество стран: Европейский Союз, Россия, Индия, Китай, Япония, Южная Корея и США. Наибольшую роль в реализации российской доли в проекте играют Курчатовский институт, НИИ ЭФА им. Д. В. Ефремова, НИКИЭТ, Институт прикладной физики РАН, ТРИНИТИ, ФТИ им. А. Ф. Иоффе, ВНИИНМ, ВНИИКП, ИЯФ СО РАН.

В качестве одного из обязательств НИИ ЭФА им. Д. В. Ефремова в рамках проекта ITER является разработка и поставка 60 ЦСД (центральная сборка дивертора). С целью отработки режимов пайки облицовочных плиток был изготовлен технологический образец элемента дивертора. Его внешний вид представлен на рис. 1.

Технологический образец представляет собой одну из веток купола ЦСД. Типы соединений и материалы, используемые для изготовления технологического образца:

- соединение вольфрама (W) и меди (Cu), выполненное технологией наплавки;
- соединение вольфрамо-медных облицовочных плиток с бронзой (CuCrZr), выполненное по технологии высокотемпературной пайки;
- соединение бронзы (CuCrZr) и нержавеющей стали (316L (N)-IG), выполненное по технологии сварки взрывом;
- соединение биметаллической крышки (CuCrZr/316L(N)-IG) со стальным основанием (316L(N)-IG), выполненное по технологии лазерной сварки.

Учитывая экстремальные условия работы компонентов ITER (высокие поверхностные тепловые нагрузки, интенсивные потоки энергетических ионов и нейтронов, циклический характер работы и множество других деструктивных факторов, определяющих особенности конструкции и требования к материа-

лам), их элементы должны подвергаться обязательному неразрушающему контролю.

В настоящий момент в НИИЭФА для решения задач ультразвукового контроля используется автоматизированная установка, внедренная в технологический процесс изготовления изделия. Данная установка обладает только тремя степенями свободы, что не позволяет проводить контроль изделий, имеющих криволинейную поверхность с необходимой производительностью. По этой причине специалистами НИИЭФА в настоящий момент анализируется рынок современного оборудования для неразрушающего контроля с целью последующей замены имеющегося оборудования для контроля соединений в деталях дивертора и других схожих узлов реактора ITER.

Лаборатория неразрушающего контроля ФГУП «ВИАМ» специализируется на исследовании и разработке методик контроля ответственных деталей и агрегатов авиационной техники, в том числе полученных с использованием сварки и пайки [1,2,3,4,]. Большое внимание уделяется автоматизации процесса неразрушающего контроля [5,6,7]. В 2012 г. лаборатория была оснащена установкой для иммерсионного ультразвукового контроля LS-500 LP производства фирмы ScanMaster со специализированным программным модулем 3D, обеспечивающим возможность сканирования изделий с произвольной поверхностью ввода. Представители НИИЭФА обратились в ФГУП «ВИАМ» с целью проведения исследований по оценке возможности применения данных

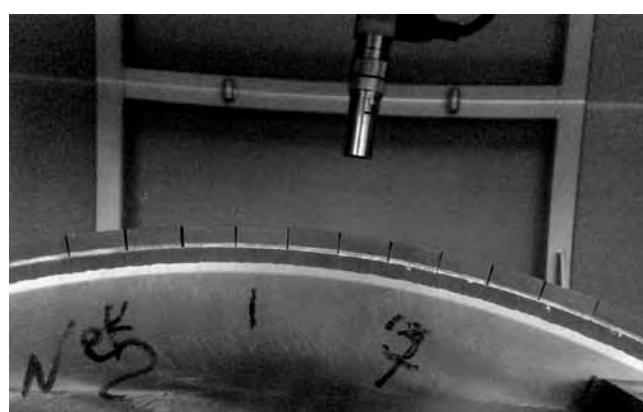


Рис. 2. Объект контроля и ПЭП в процессе исследования

Таблица

	, %	, %	, %	, %
1	87,06	82,35	85,48	0,78
2	88,63	78,43	83,58	1,18
3	84,71	79,22	82,38	1,11
4	85,49	72,16	83,46	1,52
5	86,27	80,00	83,84	0,96
6	87,06	80,00	85,52	0,88

установок для решения поставленной задачи. Следует отметить, что установки подобного типа, но не обладающие модулем 3D, уже давно внедрены и успешно применяются на многих моторостроительных и металлургических заводах для контроля простых изделий типа тел вращения.

Для обоснованного выбора оборудования, а также с целью выдачи рекомендаций в ФГУП «ВИАМ» были проведены исследования по оценке способности установки поддерживать при сканировании перпендикулярность акустической оси датчика к поверхности исследуемого объекта контроля. При этом оценивалась амплитуда ультразвукового эхосигнала, отраженного от поверхности. Оценка проводилась с использованием следующей настройки: амплитуда эхосигнала от поверхности ввода ультразвуковых колебаний в объект исследования составляла 80% по экрану дефектоскопа, уровень фиксации (высота строба) — 50% по экрану дефектоскопа, расстояние от торца пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) до места входа ультразвуковых колебаний в объект контроля вдоль направления распространения ультразвукового пучка — 80 мм. Шаг сканирования — 0,7 мм, скорость сканирования не превышала 20 мм/с. Ввод ультразвуковых колебаний осуществлялся с наружной поверхности вольфрамовых плиток.

Предварительно для исследуемой области образца (три ряда облицовочных плиток) в ручном режиме в программе ScanMaster CSI путем «обучения» по крайним точкам вольфрамовых плиток («узлам»), была построена 3D модель поверхности исследуемого участка объекта контроля. 3D модель поверхности

представляет собой сетку, в узлах которой оператор находит такое угловое положение ПЭП, при котором наблюдается максимум эхосигнала от поверхности ввода ультразвуковых колебаний, то есть обеспечивается перпендикулярность акустической оси ПЭП к поверхности объекта контроля.

В процессе эксперимента манипулятор установки в автоматическом режиме передвигал ПЭП таким образом, чтобы точка ввода ультразвуковых колебаний перемещалась по траектории построчного сканирования в пределах исследуемого участка объекта контроля. При этом в каждой точке угловое положение ПЭП вычисляется путем линейной интерполяции между угловыми положениями в «узлах», запомненными при «обучении». Взаимное расположение объекта контроля и ПЭП в процессе сканирования показано на рис. 2.

Установка запоминает результаты сканирования и может представлять их на мониторе в виде А, В и С — сканов. На рис. 3 приведены результаты исследования в виде А, С-сканов.

Далее с использованием специализированного модуля установки рассчитывалось максимальное, среднее и минимальное значение амплитуды поверхностного эхосигнала, а также отклонение. Результаты измерения представлены в таблице.

Из приведенных в таблице результатов измерения видно, что амплитуда эхосигнала от поверхности ввода изменяется не более чем на 1,52%. Из этого можно сделать вывод, что на исследованном криволинейном объекте контроля установка способна поддерживать ввод ультразвуковых колебаний по нормали к поверхности с точностью, достаточной для уверенного обнаружения внутренних дефектов типа непропаев.

После демонстрации физической возможности поддерживать перпендикулярность преобразователя в процессе сканирования было необходимо оценить возможность контроля качества соединений вольфрам-медь и медь-бронза. Предварительно была осуществлена настройка дефектоскопического модуля установки на контрольном образце, представленном на рис. 4.

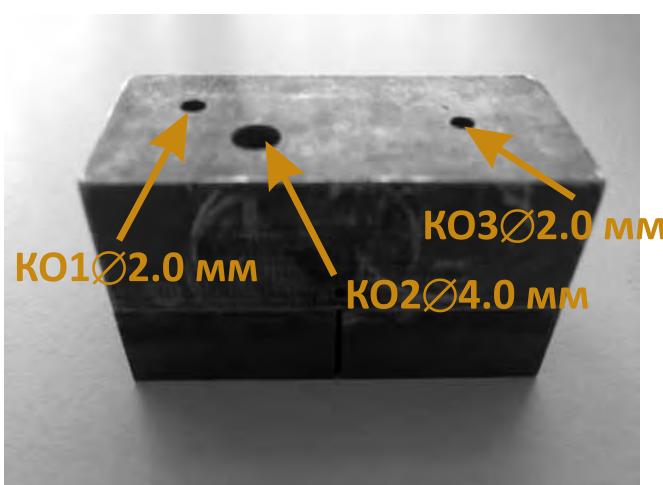
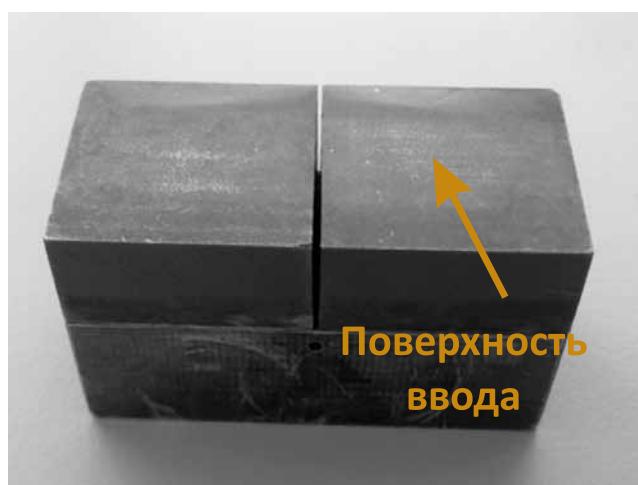


Рис. 4. Контрольный образец



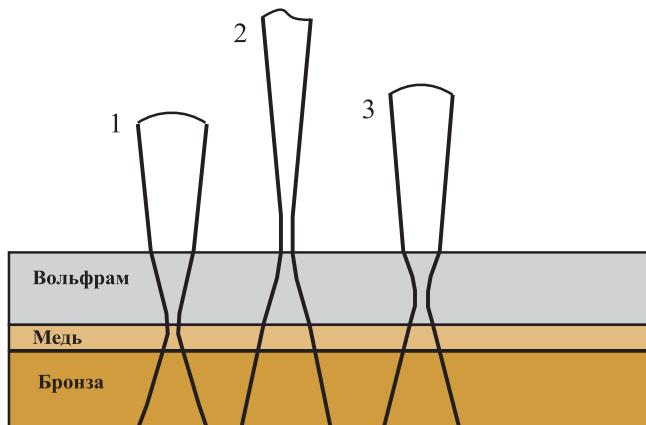


Рис. 5. Схематическое представление структуры поля ПЭП в объекте исследования

Характерно, что на контрольном образце и на детали в зоне качественного соединения эхосигналы от границы паяного соединения медь-бронза отсутствуют (рис. 7 и 10). Это связано с крайне малым различием характеристических импедансов меди, бронзы и припоя. На границе качественного соединения вольфрам-медь, напротив, наблюдается постоянный эхосигнал, вызванный френелевским отражением ультразвука на границе двух сред с существенно различным значением импедансов. Данный сигнал является помехой при обнаружении дефектов соединения. Для увеличения соотношения сигнал/помеха было принято решение использовать фокусированный преобразователь.

Настройка осуществлялась на контрольный отражатель (КО) диаметром 2,0 мм, амплитуда эхосигнала от КО составляла 80% по экрану дефектоскопа, строб автоматической сигнализации системы устанавливался на 3 дБ ниже. Использовался ПЭП с центральной частотой 10 МГц и фокусным расстоянием по воде 2,4 дюйма, диаметром пьезопластины 10,5 мм. Расстояние от торца ПЭП до поверхности ввода (40 мм) было выбрано из следующих соображений. При расстоянии до поверхности (рис. 5 позиция ПЭП 2) 61 мм обеспечивается фокусировка ультразвука на поверхности ввода, что уменьшает краевые эффекты и дает наибольшую полноту контроля по площади плитки. При расстоянии 33 мм обеспечивается фокусировка ультразвука на поверхности соединения вольфрам-медь (рис. 5 позиция ПЭП 1), что дает наибольшее отношение сигнал/помеха и наилучшее латеральное разрешение. Расстояние 40 мм было выбрано в качестве компромисса (рис. 5 позиция ПЭП 3).

С использованием вышеописанной настройки было проведено сканирование стандартного образца предприятия. Результаты сканирования приведены на рис. 6–11.

Видно, что все КО в стандартном образце уверенно обнаруживаются (рис. 6–11).

С использованием вышеописанной настройки было проведено исследование качества соединения вольфрам-медь, медь-бронза для области образца FS\_UM\_5 с криволинейной поверхностью, для которой предварительно была построена 3D модель. Пример А-развертки, наблюдаемой в процессе сканирования, приведен на рис. 12.

Результаты сканирования приведены на рис. 13.

По результатом контроля на данном участке дефектов не выявлено.

Следует отметить, что построение 3D модели поверхности в ручном режиме путем «обучения» по узловым точкам не является оптимальным методом. ПО ScanMaster CSI, под управлением которого работает установка LS-500 LP, имеет возможность создавать геометрическую модель, описывающую траекторию перемещения манипулятора, не только в ручном режиме, а также путем импорта поверхности детали из файла, в котором описывается трехмерная модель исследуемого образца. В связи с этим рекомендуется в дальнейшей работе использовать имеющихся у НИИЭФА 3D моделей деталей реактора ITER, созданных в программе CATIA, для импорта в ПО ScanMaster CSI.

#### Список литературы

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 7-17.
2. Рыльников В.С., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Красиков М.И. Исследование ремонтной технологии исправления дефектов паяных соединений топливных коллекторов // Труды ВИАМ. 2013. №12. Ст. 02 (viam-works.ru).
3. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Рыльников В.С., Афанасьев-Ходыкин А.Н. Исследование мелкодисперсных порошков припоея для диффузионной вакуумной пайки, полученных методом атомизации расплава // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 79-87.
4. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Создание современных жаропрочных материалов и технологий их производства для авиационного двигателестроения//Крылья Родины. 2012. № 3-4. С. 34-38.
5. Далин М.А., Генералов А.С., Бойчук А.С., Ложкова Д.С. Основные тенденции развития акустических методов неразрушающего контроля //Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 64-68.
6. Орлов М.Р. Стратегические направления развития ИЦ ФГУП «ВИАМ» // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 387-393.
7. Пьянков В.А., Хузин Е.И., Вахов В.В. Автоматизированная система ультразвукового контроля дисков//Дефектоскопия. 2008. № 9. С. 46-52.

**Ложкова Дарья Сергеевна – научный сотрудник, Далин Михаил Альбертович – начальник сектора, Лянзберг Дмитрий Владимирович – начальник испытательного стендов ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов».**

Контактный телефон (499) 261-86-77.

E-mail: lozhkovads@gmail.com