

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА МЕТАЛЛОКОМПОЗИТНЫХ ВОДОРОДНЫХ БАЛЛОНОВ НА ЭТАПЕ ИХ ПРОИЗВОДСТВА

*Д.О. ДОЛМАТОВ, Н.И. ЕРМОШИН, В.Ю. ЖВЫРЬЛЯ, Е.Б. КАШКАРОВ*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: [dolmatovdo@tpu.ru](mailto:dolmatovdo@tpu.ru)

Водородная энергетика характеризуется экологической чистотой, гибкостью и эффективностью преобразования энергии [1]. Вне зависимости от области применения водородной энергетике, обеспечение безопасности при хранении водорода является актуальной проблемой. В этой связи интерес представляет использование баллонов III типа, состоящих из алюминиевого лайнера и армирующей композитной обмотки из углеволокна. Подобные баллоны имеют повышенный диапазон рабочих давлений в сочетании с меньшей массой по сравнению с металлическими баллонами

Характерными дефектами композитной обмотки являются расслоения, отслоения, рыхлоты, трещины [2]. Использование широко применяемых на сегодняшний день гидравлических испытаний предоставляет ограниченный объем информации о дефектности композитной обмотки баллона. Поэтому актуальным вопросом является их замена на методы неразрушающего контроля. В этой связи, интерес представляют акустические методы контроля, которые имеют высокую чувствительность к внутренним дефектам. Кроме того, при использовании эхо-метода и зеркально-теневого метода контроль возможен при одностороннем доступе к объекту.

Особенностью металлокомпозитных баллонов является малая толщина стенок, что снижает влияние фактора высокого затухания акустических волн в композитной обмотке. Следовательно, представляется возможным использовать ультразвуковые (УЗ) волны высокой частоты и тем самым получать высокую фронтальную разрешающую способность контроля и чувствительность к мелким дефектам.

В данной работе экспериментально проверена возможность использования эхо-метода и эхо-теневого методов акустического контроля для дефектоскопии металлокомпозитных баллонов III типа. В качестве объекта исследования рассматривался фрагмент металлокомпозитного баллона III типа производства Liaoning Alsafe Technonolgy Co., Ltd, рисунок 1. Радиус кривизны баллона составлял 108,4 мм, толщина алюминиевого лайнера составляла 1,2 мм, а толщина объекта композитной обмотки была равна 2,4 мм. В образце было изготовлено по два плоскостных отверстия диаметром 10 и 6 мм, просверленных в алюминиевом лайнере и композитной обмотке.

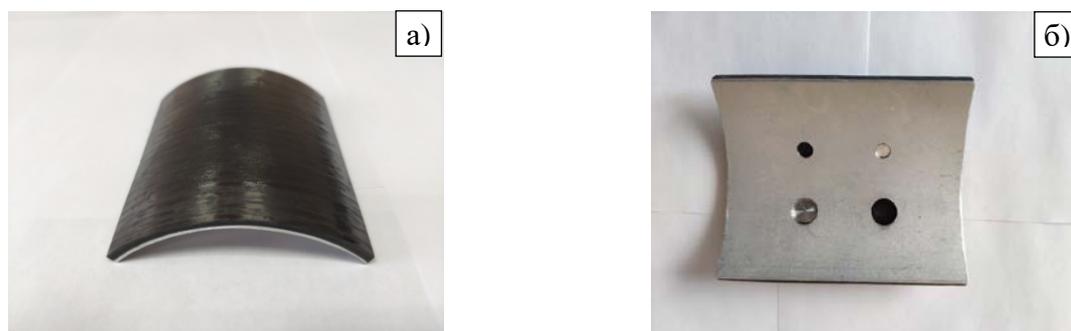


Рисунок 1 – Фрагмент металлокомпозитного баллона III типа:  
а) вид сверху; б) вид снизу

Контроль данных образцов проводился на роботизированной установке ультразвукового неразрушающего контроля, рисунок 2. Основой установки является блок ультразвуковой электроники OPTUS.



Рисунок 2 – Система роботизированного ультразвукового контроля:  
1) роботизированный манипулятор; 2) иммерсионная ванна; 3) шкаф управления

Для сканирования тестовых образцов применялся преобразователь OLYMPUS V319-SU частотой 15 МГц и размером пьезоэлемента 13 мм, выбранный на основании анализа акустических свойств контролируемого объекта. Сканирование объекта контроля осуществлялось с шагом 1 мм. Во всех точках траектории сканирования преобразователь позиционировался таким образом, чтобы обеспечивать ввод ультразвуковых волн в объект контроля по нормали к поверхности образца.

Результатом сканирования образцов являлись наборы эхо-сигналов с координатами, в которых они были получены. Эти данные позволяют сформировать результаты контроля в форме изображений дефектов. На рисунке 3 представлены результаты в форме изображения дефектов, находящихся в композитной обмотке образца.

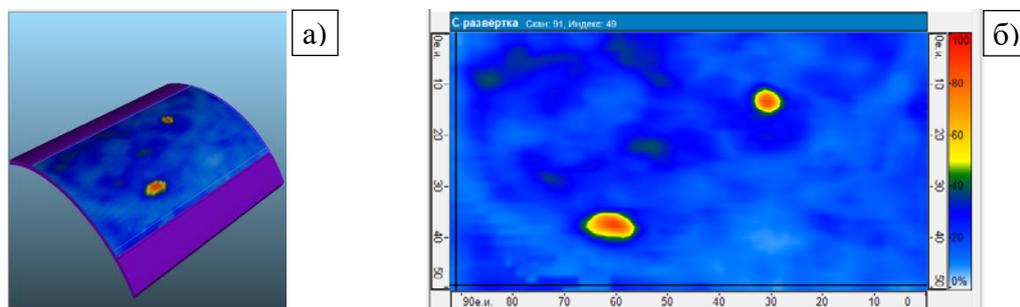


Рисунок 3 – Результаты контроля образца №1 (эхо-метод ультразвукового контроля):  
а) трехмерное представление результата;  
б) представление результата контроля в форме С-скана

Контроль с применением эхо-метода ультразвуковой дефектоскопии алюминиевого лайнера затруднен в связи с его малой толщиной. В этой связи эхо-метод ультразвукового неразрушающего контроля может быть использован совместно с зеркально-теневым методом ультразвуковой дефектоскопии, который основан на анализе амплитуды эхо-сигналов, отраженных от донной поверхности. На рисунке 4 представлены результаты контроля при использовании эхо-теневого метода.

В таблице 1 представлены полученные результаты для образца №1.

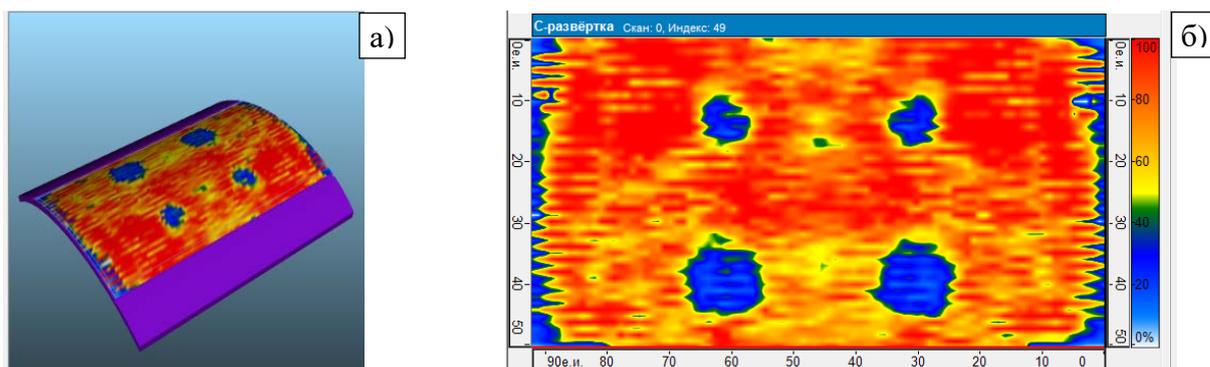


Рисунок 4 – Результаты контроля образца (зеркально-теневой метод контроля):

а – трехмерное представление результата;

б – представление результата контроля в форме С-скана

Таблица 1 – Результаты для образца №1

№ дефекта	Диаметр дефекта, мм	Расположение дефекта	Используемый преобразователь	Метод УЗ контроля	Результат
1	10	В обмотке	15 МГц, нефокусированный	Эхо-метод Зеркально-теневой	Дефект выявлен
2	6	В обмотке	15 МГц, нефокусированный	Эхо-метод Зеркально-теневой	Дефект выявлен
3	6	В лейнере	15 МГц, нефокусированный	Зеркально-теневой	Дефект выявлен
4	10	В лейнере	15 МГц, нефокусированный	Зеркально-теневой	Дефект выявлен

Таким образом, роботизированный ультразвуковой контроль позволил выявить дефекты всех размеров в композитной обмотке и лейнере фрагмента водородного баллона III типа. Полученные результаты демонстрируют применимость автоматизированного эхо-метода ультразвукового неразрушающего контроля с применением акустических волн высокой частоты для контроля композитной обмотки водородного баллона III типа. Для решения задачи автоматизированного контроля указанных объектов могут быть разработаны и использованы недорогие для изготовления системы автоматизированного контроля, обеспечивающие требуемое позиционирование преобразователя относительно поверхности баллона в процессе проведения сканирования.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Госзадания "Наука", проект FSWW-2021-0017.*

#### Список литературы

1. Проблемы аккумулирования и хранения водорода / Фатеев В.Н. и др. // *Кимья Problemleri*. – 2018. – № 4 (16). – С. 453–483.
2. Воробей В.В., Маркин В.Б. Контроль качества изготовления и технология ремонта композитных конструкций – Новосибирск: Наука, 2006. – 189 с.