

**И.П. Жарков<sup>1</sup>, А.Н. Иващенко<sup>1</sup>, Э.М. Руденко<sup>2</sup>, И.В. Короташ<sup>2</sup>,  
А.А. Краковный<sup>2</sup>, В.В. Сафронов<sup>1</sup>, В.А. Ходунов<sup>1</sup>, А.Э. Руденко<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Институт физики НАН Украины, Киев

<sup>2</sup> Институт металлофизики НАН Украины, Киев

<sup>3</sup> Международный центр электронно-лучевых технологий Института электросварки НАН Украины, Киев

## **НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ СКАНИРУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ МИКРОВОЛНОВОЙ НЕРАЗРУШАЮЩЕЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ**



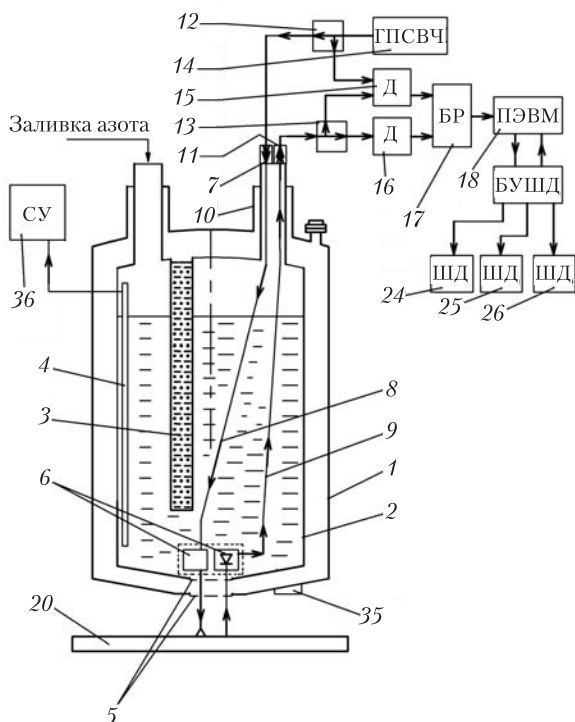
*Разработано новое устройство для микроволновой неразрушающей дефектоскопии с минимальными тепловыми шумами и увеличенным отношением сигнал/шум, в котором использован перемещающийся азотный заливной криостат с вмонтированными в него активными микроволновыми элементами.*

*Ключевые слова: микроволновая неразрушающая дефектоскопия, азотный криостат, сканирующее устройство.*

В настоящее время в промышленности широко используются разные пленочные упрочняющие и защитные покрытия (УЗП). В то же время практически отсутствуют простые неразрушающие методы их контроля. Обычно толщина таких покрытий составляет 5–50 мкм. Оптические методы не позволяют получить информацию о дефектности структуры подобных пленок, а для рентгеновских методов толщины этих покрытий малы. Классический метод низкочастотных вихревых токов [1] для дефектоскопии пленочных УЗП непригоден, потому что при использовании объемных измерительных катушек и низкочастотного сигнала глубина проникновения индукционных токов может составлять несколько миллиметров, что намного больше толщины УЗП. В результате отличия электрофизических характеристик УЗП от характеристик основания практически не влияют на результирующий отклик

от исследуемого образца, а изменение электрофизических характеристик УЗП вследствие каких-либо нарушений их структуры невозможно определить.

Известно применение радиоволнового способа неразрушающего контроля [2], в котором использовано взаимодействие излученной электромагнитной волны длиной от 1 до 100 мм с объектом контроля, прием отраженной объектом электромагнитной волны и преобразование отклика в электрический сигнал, который передается на регистрирующий прибор для обработки полученной информации. Этот способ контроля позволяет определять толщину, выявлять внутренние и поверхностные дефекты в изделиях преимущественно из неметаллических материалов. Радиоволновая дефектоскопия дает возможность с высокой точностью измерять толщину диэлектрических покрытий на металлической подложке. В этом случае амплитуда зондирующего сигнала представляет собой основной информационный параметр. Амплитуда зондирующего сигнала при прохождении через материал уменьшается, в частнос-



**Рис. 1.** Структурная схема низкотемпературного устройства для микроволновой неразрушающей дефектоскопии (МВНД): 1 – криостат; 2 – азотный бак; 3 – крионасос; 4 – детекторная линейка сигнализатора уровня; 5 – радиопрозрачное окно; 6 – приемно-передающая антенна; 7 – СВЧ-разъем; 8, 9 – СВЧ-кабель; 10 – тепловой мост; 11 – внешние СВЧ-разъемы; 12, 13 – направленные ответвители. Принятые обозначения: СУ – сигнализатор уровня; ГПСВЧ – генератор падающей СВЧ-волны; Д – детектор; БР – блок регистрации; ПЭВМ – персональная ЭВМ; ШД – шаговый двигатель; БУШД – блок управления шаговыми двигателями

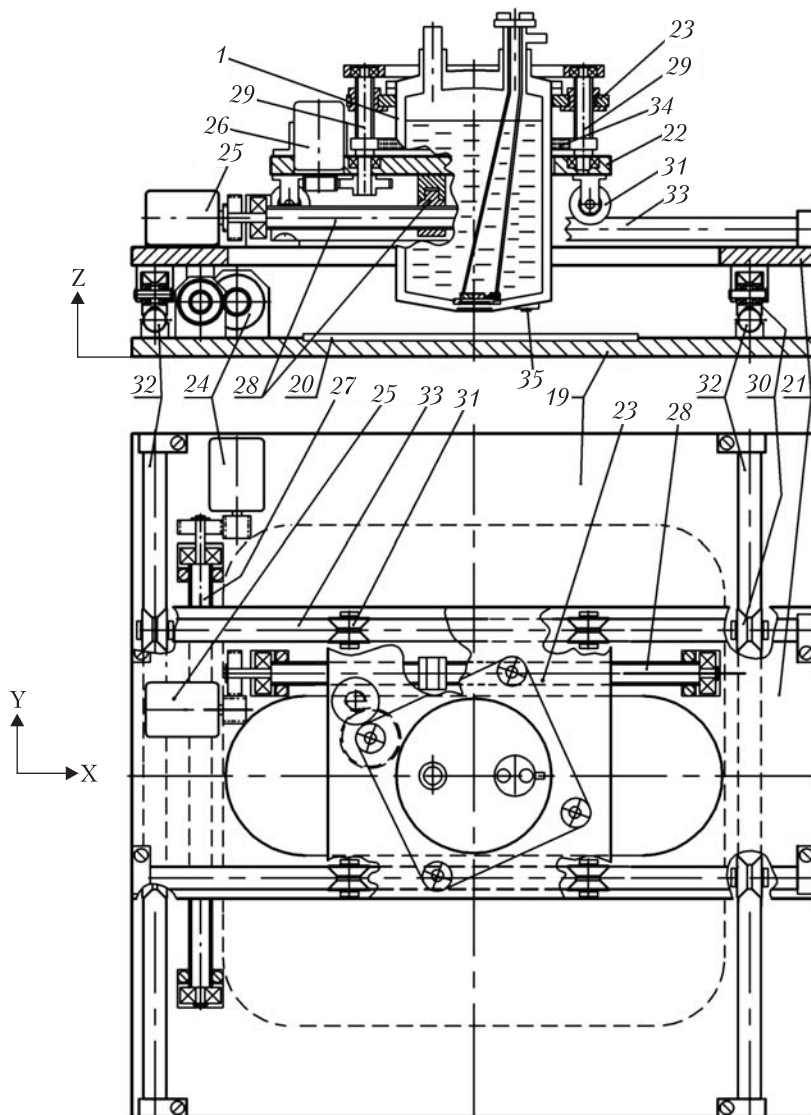
ти из-за наличия дефектов. Кроме того, изменяется фаза волны.

Аппаратура для реализации радиоволнового способа обычно содержит генератор, работающий в непрерывном или импульсном режиме; рупорные антенны, предназначенные для облучения электромагнитной волной контролируемого объекта и приема волны, прошедшей или отраженной от этого объекта; усилитель; детекторы принятых сигналов; устройство для выработки командных сигналов, управляющих различными исполнительными механизмами. Недостатками этого способа являются: невысо-

кая чувствительность, невысокая разрешающая способность в плоскости поверхности объекта контроля из-за значительной апертуры рупорных антенн и наличие тепловых шумов в аппаратуре и приемнике излучения. Для повышения точности измерений необходима отсечка от тепловых шумов, чего можно достичь при понижении рабочей температуры излучателя и приемника. На примере ФЭУ-62 нами показано увеличение отношения *сигнал/шум* на два порядка при понижении его температуры до температуры, близкой к точке кипения жидкого азота 77 К [3].

С целью создания улучшенного радиоволнового способа неразрушающего контроля упрочняющих и защитных покрытий за счет увеличения соотношения *сигнал/шум* необходимо разработать устройство, позволяющее проводить автоматизированное управляемое пространственное сканирование поверхности УЗП на заданных площадях и визуализацию дефектности их структуры. Как показал проведенный нами анализ, для решения этой задачи устройство должно содержать перемещающийся по трем координатам над исследуемой поверхностью криостат, обеспечивающий работу аппаратуры при температуре 77 К, минимизирующий тепловые шумы аппаратуры и повышающий отношение *сигнал/шум*. В качестве приемно-передающих элементов предпочтительно использовать вмонтированные в криостат микроволновой излучатель и антенну, элементы подвода сигнала зондирования и отвода сигнала информационного отклика к устройствам обработки, которые находятся при комнатной температуре. Для поддержания уровня жидкого криоагента в азотном резервуаре необходимо установить датчик-сигнализатор. Для контроля и фиксации расстояния до исследуемой поверхности устройство необходимо снабдить стопором движения шагового двигателя перемещения.

На рис. 1 представлена структурная схема разработанного устройства и обобщенная схема реализации способа, а на рис. 2 – оборудо-

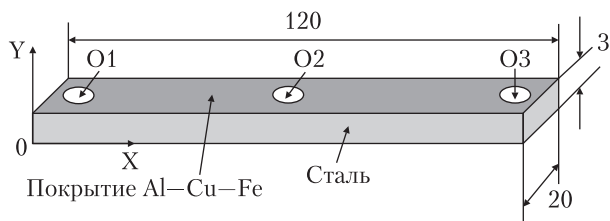


**Рис. 2.** Механизм сканирования: 1 – криостат; 19 – основание; 20 – исследуемый образец; 21, 22, 23 – платформа; 24, 25, 26 – шаговый двигатель; 27, 28, 29 – винтовая пара; 30, 31 – ролик; 32, 33 – цилиндрическая направляющая; 34 – ременная передача; 35 – стопор минимального расстояния до объекта по вертикали

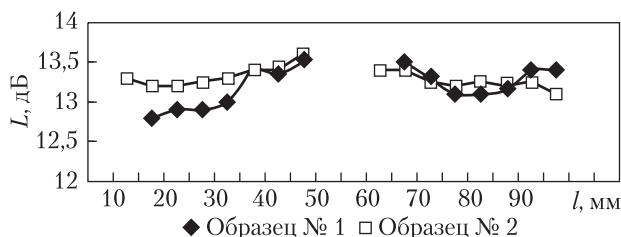
вание для перемещения устройства над сканируемой исследуемой поверхностью [4]. Для удобства нумерация устройства и оборудования на рис. 1 и 2 сделана непрерывной.

В вакуумированном корпусе криостата 1 (рис. 1) расположен азотный бак 2. Внутри него установлены угольный крионасос 3, второй конец которого закреплен на внешней сто-

роне бака, и указатель-сигнализатор уровня жидкого азота 4. Угольный крионасос 3 предназначен для достижения высокого вакуума. В криостате на дне бака, вблизи радиопрозрачного окна 5, расположена антенна 6, связанная с регистрирующим устройством через СВЧ-разъемы 7, коаксиальные кабели 8, 9, тепловой мост 10 и внешние герметичные СВЧ-разъемы



**Рис. 3.** Исследованные пространственным сканированием методом МВНД образцы с квазикристаллическим пленочным покрытием Al–Cu–Fe. Размеры даны в миллиметрах. O1, O2, O3 – технологические отверстия



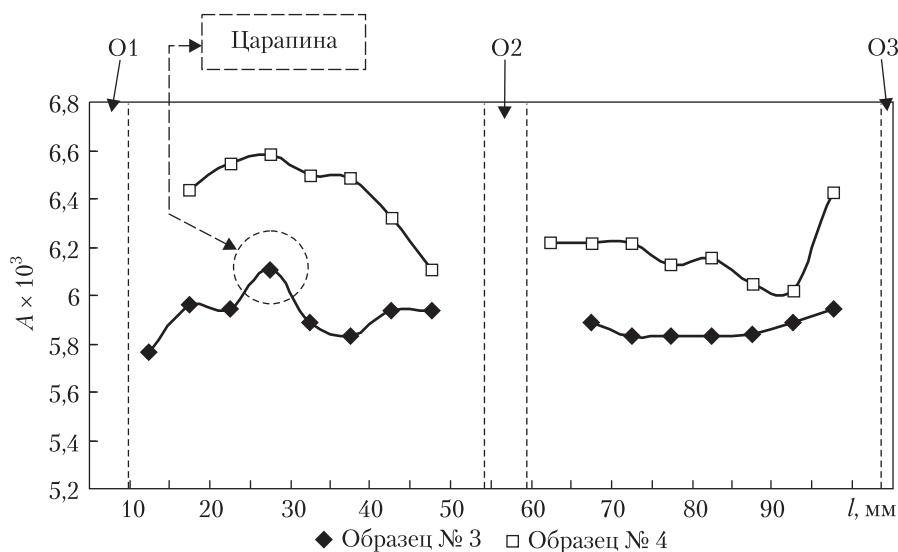
**Рис. 4.** Пространственное изменение вносимого затухания  $L$  (в дБ) вдоль подложки образцов № 1 и № 2;  $l$  – расстояние по оси OX от левого края подложки до точки измерения (см. рис. 3). Пунктиром показаны места расположения отверстий O1–O3

11. Эта криогенная часть устройства предназначена для подвода к исследуемому объекту сигнала зондирования и отвода из криостата информационного сигнала на регистрационные приборы, расположенные снаружи и работающие при комнатной температуре. СВЧ-разъемы через гибкое кабельное соединение, направленные ответвители 12, 13 подключены к СВЧ-генератору 14, усилителю, детекторам 15, 16, подключенным к блоку регистрации 17 и компьютеру 18.

Криостат механически связан с оборудованием, предназначенным для сканирования по трем координатам по заданной программе. Это оборудование (см. рис. 2) состоит из основания 19, на котором установлен исследуемый образец 20, платформы 21, 22, 23, перемещающиеся по трем координатам при помощи шаговых двигателей 24, 25, 26 и кинематически связанных с ними винтовых пар 27, 28, 29, служащих для преобразования вращательного дви-

жения в поступательное. При этом в двух горизонтальных взаимно перпендикулярных перемещениях платформы 21 и 22 двигаются на роликах 30 и 31 по двум парам параллельных цилиндрических направляющих 32, 33 при помощи винтовых пар 27, 28. При вертикальном же перемещении платформа 23, на которой установлен криостат 1, движется при помощи двух винтовых пар 29, кинематически связанных ременной передачей 34. На внешней нижней стороне криостата 1 установлен стопор 35 расстояния до исследуемой поверхности, электрически связанный с шаговым двигателем 26 перемещения по вертикали и предназначенный для фиксации расстояния до исследуемой поверхности 20.

Устройство работает следующим образом. Жидкий азот заливают в бак 2 криостата 1. Уровень жидкого азота в баке контролируется датчиком уровня жидкого азота 4, подающего сигнал на сигнализатор уровня (СУ) 36 при снижении уровня азота ниже минимально допустимого для нормальной работы криостата. Охлаждение прямо-передающей антенны 6 до температуры 77 К позволяет повысить отношение *сигнал/шум*. Для сканирования исследуемой поверхности 20 криостат 1 с приемно-передающей антенной 6 перемещаются по оси Y при помощи шагового двигателя 24, который включается по сигналу от компьютера и, начиная вращение винта 27, перемещает платформу 21 на четырех роликах 30 по двум параллельным направляющим 32, закрепленным на основании 19. После окончания перемещения по оси Y платформы 21 подается сигнал на шаговый двигатель 25, который вращением винта 28 перемещает платформу 22 на четырех роликах 31 по двум параллельным направляющим 33, закрепленным на платформе 21, по оси X. После выведения криостата 1 на заданную координату (X, Y) в горизонтальной плоскости включается шаговый электродвигатель 26, который при помощи установленной на платформе 22 и кинематически связанной между собой ременной передачей винтовой

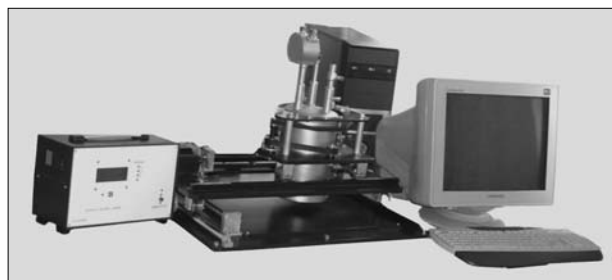


**Рис. 5.** Просторове змінювання вносимого згасання  $A$  (рази) вздовж підложек образців № 3 та № 4;  $l$  — відстань по осі  $OX$  від лівого краю підложки до точки вимірювання (см. рис. 3). Пунктиром показані місця розташування отворів  $O1-O3$

пари 29 переміщує платформу 23 з установленим на ній криостатом 1 по вертикалі (ось  $Z$ ). При соприкосновении криостата 1 с досліджуваною поверхнею 20 стопор 35 вимикає шаговий двигун 26 та фіксує відстань між випромінювачем та досліджуванним об'єктом.

Таким чином, криостат 1 переміщується разом з платформою 23 по вертикалі (ось  $Z$ ). Платформа 23 разом з криостатом 1 переміщується по горизонталі (ось  $X$ ) за допомогою платформи 22. Платформа 22 разом з платформою 23 та криостатом 1 переміщується по горизонталі (ось  $Y$ ) за допомогою платформи 21.

Після того як криостат 1 виведений у задану точку, проводиться радіоволновий контроль, для чого включається вимірний комплекс низькотемпературного радіоволнового контролю, схема якого представлена на рис. 1. Робота вимірної комплексу ґрунтується на принципі рефлектометра — роздільного виділення сигналів, пропорційних СВЧ-потужності падаючої від генератора та відбитої від вимірюваного об'єкта електромагнітної хвилі. Як генератора



**Рис. 6.** Фотографія пристрою сканування

сигнала зондування в даному вимірному комплексі використовується перестраиваний генератор надвисокої частоти (ГПСВЧ) 14 Р2-52/1. СВЧ-сигнал зондування з вихода ГПСВЧ 14, проходячи через напрямлений відвідник 12, розділяється. Частина його надходить як опорний сигнал на детектор 15, а основний зондувальний сигнал за допомогою високочастотного роз'єму 7 та коаксіального кабелю 8 подається через антену 6 на досліджувану поверхню 20. Відбитий інформаційний сигнал через антену 6, коаксіальний кабель 9 та високочастотний роз'єм 11 надходить на напрямлений відвідник 13, детектор 16, а

после детектирования сигнала — на блок регистрации 17 и компьютер 18.

**Технические характеристики устройства**

|  |                       |
|--|-----------------------|
| 1. Криостат, тип                                   | заливной азотный      |
| Габариты, мм                                       | Ø160 × 440            |
| Емкость бака для жидкого азота, л                  | 2,5                   |
| Температура охлаждения радиоволновых элементов, К  | 79 ± 1                |
| Расход жидкого азота, л/час                        | 0,22                  |
| Время непрерывной работы, час                      | 10                    |
| 2. Сканирующее устройство                          |                       |
| Габариты, мм                                       | 610 × 610 × 465       |
| Размер сканируемой горизонтальной площади, мм      | 300 × 300             |
| Минимальный шаг сканирования, мм                   | 0,0025                |
| Максимальный ход криостата по вертикали, мм        | 36                    |
| Рабочий ход по вертикали, мм                       | 15                    |
| Минимальный шаг перемещения по вертикали, мм       | 0,005                 |
| Минимальное расстояние до сканируемого объекта, мм | 0,1                   |
| 3. Микроволновой излучатель                        |                       |
| Тип антенны  | полосковый излучатель |
| Рабочая частота, ГГц                               | 1,8                   |

На рис. 3 представлены образцы с квазикристаллическим пленочным покрытием Al—Cu—Fe, исследованные пространственным сканированием методом МВНД. На рис. 4 приведены экспериментальные результаты пространственного изменения вносимого затухания *L* вдоль подложки образцов № 1 и № 2, а на рис. 5 — экспериментальные результаты пространственного изменения вносимого затухания *A* вдоль подложек образцов № 3 и № 4, полученные методом МВНД. Исследованные образцы пленочных покрытий отличаются процентным содержанием квазикристаллической фазы и ее распределением, что подтверждают полученные результаты сканирования. На рис. 6 представлена фотография созданного устройства сканирования.

*Работа выполнена в рамках Программы научного приборостроения НАН Украины.*

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Система неразрушающего контроля. Виды (методы) и технология неразрушающего контроля. Справочное пособие. Сер. 28, выпуск 4. — М.: ГУП «Научно-технический центр по безопасности и промышленности Гостехнадзора России», 2003. — 97 с.
2. Ермолов И.Н., Останин Ю.Я. Методы и средства неразрушающего контроля качества. — М.: Высшая школа, 1988. — 368 с.
3. Жарков И.П., Жирко Ю.И., Маслов В.А. и др. Малогабаритное устройство охлаждения фотоэлектронных умножителей // Научное приборостроение. — 2011. — Т. 21. — № 1. — С. 120—124.
4. Жарков И.П., Коротах И.В., Руденко Э.М. и др. Способ радиоволнового неразрушающего контроля и устройство для его применения // Заявка РФ на изобретение 2011107975/07 от 01.03.20011, дата публикации 10.09.2012.

*И.П. Жарков, О.М. Иващенко, Е.М. Руденко,  
И.В. Коротах, А.О. Краковный, В.В. Сафронов,  
В.О. Ходунов, О.Е. Руденко*

**НИЗКОТЕМПЕРАТУРНИЙ СКАНУЮЧИЙ  
ПРИСТРІЙ ДЛЯ МІКРОХВИЛЬОВОЇ  
НЕРУЙНІВНОЇ ДЕФЕКТОСКОПІЇ**

Розроблено новий пристрій для мікрохвильової неруйнівної дефектоскопії з мінімальними тепловими шумами й збільшеним відношенням сигнал/шум, в якому використано азотний заливний криостат, що переміщається, із вмонтованими в нього активними мікрохвильовими елементами.

*Ключові слова:* мікрохвильова неруйнівна дефектоскопія, азотний криостат, пристрій сканування.

*I.P. Zharkov, O.M. Ivashchenko, E.M. Rudenko,  
I.V. Korotash, A.A. Krakovnyy, V.V. Safronov,  
V.A. Khodunov, A.E. Rudenko*

**THE LOW-TEMPERATURE DEVICE  
FOR MICROWAVE NON-DESTRUCTIVE  
DEFECTOSCOPY**

The new device for microwave non-destructive defectoscopy with minimum thermal noises and increased *signal / noise* ratio, which used scanning nitrogen filled cryostat with integrated active microwave elements, is designed.

*Key words:* microwave non-destructive defectoscopy, nitrogen cryostat, scanner.

Стаття надійшла до редакції 14.05.13