

Обмен опытом

Exchange of Experience

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-6-42-46>**КОНТРОЛЬ ТОНКОСТЕННЫХ ЭКРАНОВ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ
УСТАНОВОК ВИХРЕТОКОВЫМ МЕТОДОМ****© Вячеслав Владимирович Борисенко¹, Владимир Анатольевич
Захаров^{2*}, Кирилл Владимирович Захаров³**¹ НПП «Кропус», Россия, 142412, г. Ногинск, ул. Климова, д. 50Б.² Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина, Россия, 119991, Москва; Ленинский пр., д. 65; *e-mail: v.a.zaharov@inbox.ru³ Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения имени А. Г. Мержанова РАН, Россия, 142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осеппяна, д. 8.

*Статья поступила 19 октября 2018 г. Поступила после доработки 18 марта 2019 г.
Принята к публикации 20 марта 2019 г.*

Представлены результаты контроля тонкостенных сварных соединений (высокотемпературных узлов эпитаксиальных установок), полученных электронно-лучевой сваркой, вихретоковым методом. Герметичность подобных деталей и узлов контролируют вакуумным и компрессионным методами течеискания, основанными на повышении концентрации тестового газа с одной стороны тестируемой поверхности и отборе его для масс-спектрометрического анализа — с другой стороны. Гелиевые масс-спектрометрические течеискатели в настоящее время широко распространены в аэрокосмической, электронной и химической отраслях промышленности, в приборостроении и научных исследованиях. Вихретоковый метод позволяет использовать данный подход для своевременного обнаружения дефектов и предотвращения риска аварийного износа тонкостенных элементов и деталей аэрокосмического и нефтегазохимического оборудования, а также обеспечивает высокую скорость сканирования. Исследовали сварные соединения танталовых экранов толщиной 0,2 и 0,5 мм с помощью дефектоскопа ВЕКТОР-60Д. Прибор дает возможность использовать накладные или проходные вихретоковые дифференциальные, тангенциальные и абсолютные преобразователи, работающие на частотах от 10 Гц до 20 МГц, а также различные динамические преобразователи. Он предназначен для контроля металлопродукции, углепластиков и композитов на наличие дефектов (поверхностных и подповерхностных трещин, нарушений сплошности и однородности материала). Отображение сигнала на экране дефектоскопа получали как в амплитудно-временной, так и комплексной плоскостях. Использовали датчики ПВДТ-1000-2, ПВД-200-2,3 и VP160A45, с помощью которых за один проход вдоль сварного соединения можно обнаруживать дефекты по всей ширине шва и околошовной зоны. Выявили дефект сварного соединения танталового экрана — неполное проплавление (непровар в корне сварного шва). Заключение, что вихретоковый дефектоскоп ВЕКТОР-60Д можно с успехом применять для контроля дефектов тонкостенных сварных соединений.

Ключевые слова: вихретоковый контроль; дефектоскопия; эпитаксиальная установка; сварной шов; тантал; дефектоскоп; неразрушающий контроль.

**CONTROL OF THIN-WALLED SCREENS OF EPITAXIAL INSTALLATIONS
BY THE EDDY CURRENT METHOD****© Vyacheslav V. Borisenko¹, Vladimir A. Zakharov^{2*}, Kirill V. Zakharov³**¹ Research and Production Center “Kropus”, ul. Klimova 50B, Noginsk, 142412, Russia.² Gubkin State University of Oil and Gas (National Research University), Leninsky pr. 65, Moscow, 119991, Russia; *e-mail: v.a.zaharov@inbox.ru³ Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Problems of Materials Science, RAS, ul. Akademika Osepyana 8, Chernogolovka, 142432, Russia.

Received October 19, 2018. Revised March 18, 2019. Accepted March 20, 2019.

The results of testing thin-walled welded joints (high-temperature assemblies of epitaxial installations) obtained by electron-beam welding using the eddy current method are presented. The tightness of those parts and assemblies is controlled by vacuum and compression leak detection methods, based on increasing the test gas concentration on the one side of the test surface and sampling it for mass spectrometric analysis on the other side. Helium mass spectrometric leak detectors are now widely used in aerospace, electronics and chemical industries, as well as in the instrument making industry and scientific research. The eddy current method provides a high scanning speed and allows timely detection of the defects and prevention of the risk of accidental wear of thin-walled elements and parts of aerospace and petrochemical equipment. The goal of this work is to optimize the control of welded joints of thin (0.2 and 0.5 mm) tantalum screen using a VEKTOR-60D detector and eddy current method. The device provides the use of overhead or flow eddy current differential, tangential and absolute transducers operating at a frequency from 10 Hz to 20 MHz, as well as various dynamic transducers. The device is designed to control metal products, carbon plastics and composites for the presence of defects such as surface and subsurface cracks, discontinuities and homogeneity of materials. VEKTOR-60D allows one to get a simultaneous signal display on the flaw detector screen both in the amplitude-time and complex planes. The used sensors (PVDT-1000-2, PVD-200-2,3, and VP160A45) provided detection of the defects across the entire width of the weld and heat-affected zone in one pass along the welded joint. The defect of the welded joint of the tantalum screen was revealed as incomplete penetration (nonpenetration in the weld root) in accordance with the classification of GOST R ISO 6520-1–2012. The results proved that a VEKTOR-60D eddy current detector can be successfully used in monitoring defects in thin-walled welded joints.

Keywords: eddy current testing; flaw detection; epitaxial installation; welded joint; tantalum; flaw detector; non-destructive control.

Введение

Установки молекулярно-пучковой эпитаксии применяют для изготовления эпитаксиальных гетероструктур. Условия вакуума и требования к низкому уровню загрязнения накладывают определенные ограничения на материалы, применяемые для производства элементов и узлов камеры эпитаксиальных установок. Материалы должны иметь низкое давление пара. При этом невысокая скорость испарения уменьшает концентрацию загрязняющих веществ. Нагрев подложки осуществляется излучением нагревателя, в конструкции которого используются тонкостенные танталовые экраны для уменьшения излучения на стенки камеры (максимальная температура нагрева 1100 °C) [1].

Как известно, при сварке воздействие даже небольших количеств кислорода, азота, водорода и углерода, образующих твердый раствор внедрения, значительно влияет не только на структуру и механические свойства, но главное — на формирование дефектов, определяющих износостойкость сварного соединения [2]. Поэтому при изготовлении тонкостенных элементов высокотемпературных узлов камеры эпитаксиальной установки из тантала для обеспечения герметичности, износостойкости и прочности соединений так важны технология сварки и используемые методы неразрушающего контроля.

Обычно применяют электродугую (в среде инертных газов) и электронно-лучевую сварки. Наиболее эффективная защита шва от атмосферных газов достигается при электронно-лучевой

сварке в вакууме (давление 10^{-5} – 10^{-4} мм рт. ст.). Этот вид сварки используют для соединения химически активных тугоплавких металлов. Он также позволяет получать узкие зоны расплавления и термического влияния и благодаря этому избегать больших деформаций (ширина шва тантала в 3 – 5 раза меньше, чем при дуговой сварке неплавящимся электродом) [2, 10, 11].

Детали под сварку готовят с особой тщательностью. Соединяемые кромки и прилегающие к ним околошовные участки очищают от загрязнений и подвергают травлению в специальных реактивах для удаления поверхностных оксидных пленок и обезжиривания.

Основная трудность при сварке тонкостенных изделий — прожоги. Причины их появления чаще всего — неточность сборки и коробление кромок, вызывающее местное увеличение зазоров и изменение теплоотвода. Величина коробления зависит от толщины свариваемого материала, расстояния между прижимами и др. Поэтому к сборочно-сварочной оснастке предъявляют особые требования [2, 11 – 13].

После сварки сварные соединения, как правило, контролируют визуальным способом [2, 14]. Однако наиболее высокопроизводительный и точный способ, позволяющий выявлять дефекты в поверхностном и приповерхностном слоях, — вихретоковый метод контроля [3 – 8].

Цель работы — выявление дефектов и оптимизация контроля тонкостенных сварных соединений танталовых экранов с использованием вихретокового метода.

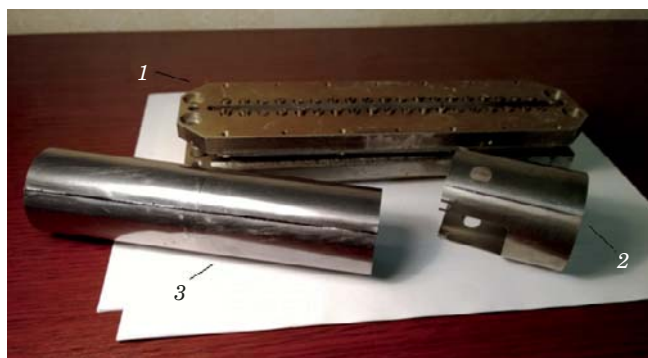


Рис. 1. Приспособление клавишного типа (1) и тонкостенные защитные танталовые экраны толщиной 0,2 (2) и 0,5 мм (3) со сварными соединениями, полученными электронно-лучевой сваркой

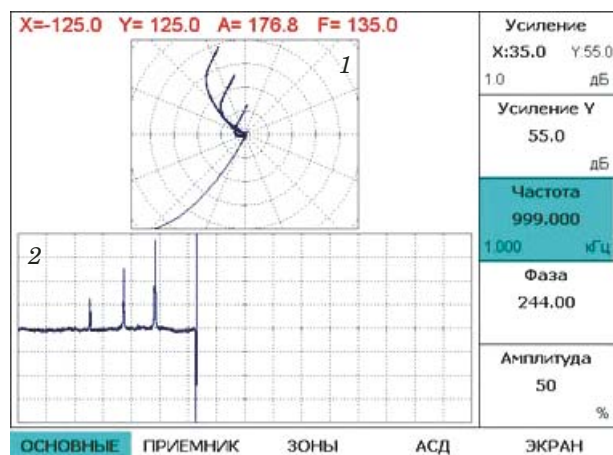


Рис. 2. Отображение сигнала на экране дефектоскопа в комплексной (1) и амплитудно-временной (2) плоскостях

Материалы, методы исследования, результаты

Исследовали сварные соединения тонколистового тантала марки ТВЧ толщиной 0,2 и 0,5 мм. Сварку защитных экранов из тантала выполняли с использованием прижимного приспособления клавишного типа (рис. 1). Приспособление обеспечивало: 1) плотное прижатие свариваемых кромок к подкладке с равномерным по всей длине шва усилием; 2) точную их подгонку; 3) уменьшение деформации кромок; 4) корректное перемещение источника вдоль стыка; 5) хороший обзор зоны сварки на всем протяжении шва. Режимы сварки приведены в табл. 1.

Поскольку помимо прожогов в сварных соединениях могут наблюдаться непровары, трещины и пористость, осуществляли дополнительную очистку и дегазацию кромок сварного соединения предварительным проходом расфокусированным лучом.

Дефекты (типа поверхностных и подповерхностных трещин, нарушений сплошности и однородности материалов) выявляли с помощью уни-

версального вихретокового дефектоскопа ВЕКТОР-60Д. Прибор позволял использовать как накладные или проходные вихретоковые дифференциальные и абсолютные преобразователи, работающие на частотах от 10 Гц до 20 МГц, так и динамические (ротационные). Сигнал на экране дефектоскопа отображался одновременно в амплитудно-временной и комплексной плоскостях (рис. 2). Существовала также возможность отдельного усиления по осям X и Y.

Использовали преобразователи ПВДТ-1000-2, ПВД-200-2,3, VP160A45 (табл. 2), которые за один проход вдоль сварного соединения давали возможность обнаруживать дефекты по всей ширине шва и околошовной зоны.

Швы сканировали снаружи или с корневой стороны — в зонах наиболее опасного дефекта (непровара корня шва). Для настройки и калибровки дефектоскопа использовали стандартный эталонный образец. При сканировании вихретоковый преобразователь перемещали с постоянной скоростью. Скан сварного соединения и околошовной зоны шириной около 10 мм запи-

Таблица 1. Режимы электронно-лучевой сварки тонколистового тантала

Толщина металла, мм	Диаметр экрана, мм	Сила тока луча, мА	Ускоряющее напряжение, кВ	Скорость сварки, м/ч
0,2	30 – 100	10 – 12	20	До 30
0,5	30 – 100	24 – 28	20	30

Таблица 2. Преобразователи для одновременного выявления продольных и поперечных трещин

Преобразователь	Вид преобразователя	Диапазон частот, МГц
ПВДТ-1000-2	Вихретоковый дифференциальный карандашного типа	0,1 – 2
ПВДТ-1000-2Г	Г-образный вихретоковый дифференциальный карандашного типа	0,1 – 2
ПВД-200-2,3	Карандашного типа с дифференциальным включением катушки	0,2 – 0,5
VP160A45	Вихретоковый параметрический с 45-градусным наклоном носика рабочей части	0,5 – 2

сывали с помощью программного обеспечения прибора. Частоту и амплитуду сигнала от преобразователей подбирали так, чтобы получить максимально контрастную картину проявления дефекта.

На рис. 3 представлен вихретоковый сигнал от областей сканирования сварного соединения, полученного электронно-лучевой сваркой, с дефектом и без него. Установили, что наиболее оптимальная частота импульсов при максимально контрастном проявлении дефекта составляет около 400 кГц (преобразователь ПВДТ-1000-2).

Заключение

Проведенные исследования показали, что для оценки качества сварных соединений тонкостенных танталовых экранов, полученных электронно-лучевой сваркой, применим вихретоковый контроль дефектоскопом ВЕКТОР-60Д с тангенциальным вихретоковым преобразователем. Он оптимизирует и упрощает контроль, позволяет выявлять геометрические дефекты типа поры и несплошности в поверхностном слое шва, а также наиболее опасный с эксплуатационной точки зрения дефект — неполное проплавление, непровар в корне сварного шва [10]. Данный подход можно использовать для экспресс-сканирования сварных швов тантала толщиной 0,2 – 0,5 мм для своевременного обнаружения дефектов и предотвращения риска аварийного износа узлов эпитаксиальных установок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макушин М. В. Современное состояние и перспективы развития рынка эпитаксиальных пластин / Зарубежная электронная техника. 2001. Вып. 4. С. 53 – 59.
2. Акулов А. И. Справочник по сварке. Т. 2. — М.: Машиностроение, 1978. — 462 с.
3. Forster F., Sturmn W. Application of Magnetic and Electromagnetic Nondestructive Test Methods for Measuring Physical and Technological Material Values / Materials Evaluation. 1975. N 1. P 5 – 16.
4. Неразрушающий контроль. Справочник. В 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. — Изд. 2-е, перераб. и испр. — М.: Машиностроение, 2006.
5. ГОСТ 26697–85. Контроль неразрушающий. Дефектоскопы магнитные и вихретоковые. Общие технические требования. — М.: Изд-во стандартов, 2004. — 10 с.
6. ГОСТ 24289–80. Контроль неразрушающий вихретоковый. Термины и определения. — М.: Изд-во стандартов, 2004. — 9 с.
7. Клюев В. В., Федосенко К. К., Мужичкий В. Ф. Вихретоковый контроль: современное состояние и перспективы развития / В мире НК. 2007. № 2(36). С. 4 – 11.
8. Шубочкин А. Е., Ефимов А. Г. Современные тенденции развития вихретоковой дефектоскопии и дефектометрии / Контроль. Диагностика. 2014. № 3. С. 68 – 73.
9. ГОСТ Р ИСО 6520-1-2012. Сварка и родственные процессы. Классификация дефектов геометрии и сплошности в металлических материалах. Ч. 1. Сварка плавлением. — М.: Стандартинформ, 2014.



Рис. 3. Вихретоковый сигнал на мониторе дефектоскопа от дефекта (неполное проплавление, непровар в корне сварного шва) (а) и бездефектной области (б) сварного соединения тантала толщиной 0,5 мм

10. ГОСТ Р 57550–2017. Технологические комплексы для электронно-лучевой обработки в вакууме. Технические требования. — М.: Стандартинформ, 2017.
11. ГОСТ ISO 13919-1-2017. Сварка. Соединения, полученные электронно-лучевой и лазерной сваркой. Руководство по оценке уровня качества для дефектов. Ч. 1. Сталь. — М.: Стандартинформ, 2017.
12. ГОСТ ИСО 17662–2017. Сварка. Калибровка, верификация и валидация оборудования, применяемого для сварки, включая вспомогательные операции. — М.: Стандартинформ, 2017.
13. ГОСТ ИСО 17662–2017. Сварка. Общие допуски на сварные конструкции. Линейные и угловые размеры. Форма и расположение. — М.: Стандартинформ, 2017.
14. ГОСТ Р ИСО 17637–2014. Контроль неразрушающий. Визуальный контроль соединений, выполненных сваркой плавлением. — М.: Стандартинформ, 2015.

REFERENCES

1. Makushin M. V. The current state and development prospects of the epitaxial plates market / Zarubezh. Elektron. Tekhn. 2001. Issue 4. P. 53 – 59 [in Russian].
2. Akulov A. I. Welding Handbook. — Moscow: Mashinostroenie, 1978. — 462 p. [in Russian].
3. Forster F., Sturmn W. Application of Magnetic and Electromagnetic Nondestructive Test Methods for Measuring Physical and Technological Material Values / Materials Evaluation. 1975. N 1. P 5 – 16.
4. Non-destructive testing. Reference. — Moscow: Mashinostroenie, 2006 [in Russian].

5. State Standard GOST 26697–85. Nondestructive control. Magnetic and eddy current flaw detectors. General technical requirements. — Moscow: Izd. standartov, 2004. — 10 p. [in Russian].
6. State Standard GOST 24289–80. Non-destructive eddy current control. Terms and Definitions. — Moscow: Izd. standartov, 2004. — 9 p. [in Russian].
7. **Klyuev V. V., Fedosenko K. K., Muzhitsky V. F.** Eddy current control: current state and development prospects / V Mire NK. 2007. N 2(36). P. 4 – 11 [in Russian].
8. **Shubochkin A. E., Efimov A. G.** Current trends in the development of eddy current flaw detection and flaw detection / Kontrol' Diagn. 2014. N 3. P. 68 – 73 [in Russian].
9. State Standard GOST R ISO 6520-1–2012. Welding and related processes. Classification of defects in geometry and continuity in metallic materials. Part 1. Fusion welding. — Moscow: Standartinform, 2014 [in Russian].
10. State Standard GOST R 57550–2017. Technological complexes for electron-beam processing in vacuum. Technical requirements. — Moscow: Standartinform, 2017 [in Russian].
11. State Standard GOST ISO 13919-1–2017. Welding. Compounds obtained by electron-beam and laser welding. A guide to assessing the quality level for defects. Part 1. Steel. — Moscow: Standartinform, 2017 [in Russian].
12. State Standard GOST ISO 17662–2017. Welding. Calibration, verification and validation of equipment used for welding, including auxiliary operations. — Moscow: Standartinform, 2017 [in Russian].
13. State Standard GOST ISO 17662–2017. Welding. General tolerances for welded structures. Linear and angular dimensions. Form and location. — Moscow: Standartinform, 2017 [in Russian].
14. State Standard GOST R ISO 17637–2014. Nondestructive control. Visual inspection of fusion welded joints. — Moscow: Standartinform, 2015 [in Russian].