

## НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ

© 2012 В.М. Бычков, М.П. Савичев

Уфимский государственный авиационный технический университет

Поступила в редакцию 22.03.2012

Статья посвящена оценке современных методов неразрушающего контроля, таких, как компьютерная томография и ультразвуковой контроль с применением технологии фазированных решеток, с точки зрения их максимальной разрешающей способности и применения к контролю сварных соединений, полученных сваркой трением.

Ключевые слова: *неразрушающий контроль, сварка трением, компьютерная томография*

Сварные швы ответственных конструкций, полученные трением, должны подвергаться неразрушающему контролю. Контроль наружных дефектов выполняется капиллярными методами и не вызывает затруднений. Внутренние дефекты в плоскости стыка представляют собой остатки окисных пленок, несплавления, поры, которые имеют поперечные размеры в несколько микрон, притом, что средний размер зерен основного металла обычно на порядок больше. Традиционные методы неразрушающего контроля внутренних дефектов: ультразвуковой контроль, гамма- и рентгеноскопия, вихретоковый и магнитопорошковый методы не обладают достаточным разрешением для выявления столь мелких дефектов. Разрешающую способность методов неразрушающего контроля можно повысить при компьютерной обработке данных и оптимизации методики контроля с выбором оборудования. Наиболее перспективны с этой точки зрения ультразвуковой контроль с применением технологии фазированных решеток (УЗК с ФР) и компьютерная томография (КТ). При ультразвуковом контроле разрешение получаемых графических изображений ограничено как длиной волны используемых УЗК колебаний, так и шириной диаграммы направленности, а также возможностями фокусировки УЗ-луча. Ультразвуковые преобразователи с фазированной решеткой позволяют обеспечить фокусировку УЗ-сигнала во всех точках контролируемого объема, существенно повышая разрешающую способность по сравнению с традиционными нефокусированными преобразователями и, соответственно, улучшая качество получаемых изображений.

Минимальный размер дефекта, надежно обнаруживаемого ультразвуковым способом,

зависит от многих факторов, включая уровень шума, частоту преобразователя, качество поверхности ввода. Рекомендованная длина волны [1]:

$$\lambda \leq 4 \cdot D,$$

где  $D$  – минимально выявляемый дефект, мкм.

При большей длине волны, она не будет отражаться от дефекта и, соответственно, дефект не будет обнаружен. Технические характеристики ультразвуковых дефектоскопов ряда известных фирм, основанные на технологии фазированных решеток, представлены в таблице 1. Максимальной представленной в таблице частоте преобразователя 15 МГц соответствует длина волны ультразвукового излучения в титане при скорости звука 3127 м/с равная 208 мкм. Минимальный выявляемый дефект при этом равен 52 мкм, что не позволяет выявлять типичные для сварки трением дефекты.

**Таблица 1.** Ультразвуковые дефектоскопы с технологией ФР

Наименование	Диапазон рабочих частот, МГц	Частоты датчиков, МГц
Olimpus Omni Scan MX2	0,75...18	1,5; 2,5; 3,5; 5; 7,5; 10
Isonic 2010	0,2...25	
PhasorXS	0,3...15	1; 2; 2,5; 4; 5; 10; 15
Harfang X32	1..15	2,25; 5,0; 7,5
Harfang Veo	0,5...18	
Epoch 1000	0,2...26,5	2; 2,5; 4; 5; 10

В настоящее время выпуском компьютерных томографов занимается ряд компаний, наиболее известные из которых: ПромИнтро (Россия); North Star Imaging (США) и ее подразделения X-View CT; Varian Medical Systems (США); Toshiba IT & Control Systems (Япония); Hitachi (Япония); Shimadzu (Япония); Saki (Япония); Phoenix X-Ray (Германия); YXLon International (Германия); X-Tek

*Бычков Владимир Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Оборудование и технологии сварочного производства». E-mail: otsp@ugatu.ac.ru*  
*Савичев Максим Павлович, аспирант. E-mail: savichevmax@mail.ru*

Systems (Англия), входящее в Nikon Metrology; RayScan Technologies (Германия). В материалах о томографах, имеющихся на сайтах этих компаний, приводятся разрозненные данные о характеристиках детекторов, сканирующей системы, минимальном размере пикселя (интервале дискретности томограммы), но сведений о максимальной разрешающей способности нет. Предельное пространственное разрешение (ППР) радиационного контроля, как показано на рис. 1, зависит от следующих параметров [2]:

- размера  $d_\phi$  фокусного пятна излучателя;
- апертуры  $p$  (шага пикселей) элементарного детектора;
- интервала  $f$  между детектирующим элементом и объектом контроля;
- расстояния  $d$  между объектом контроля и источником излучения.

$$\frac{1}{\text{ППР}} = \frac{d_\phi \cdot d}{f}$$

где  $1/\text{ППР}$  – ширина функции рассеяния «по уровню 0,5», мм (характеризует размер минимально выявляемого дефекта);  $d_\phi/f$  – геометрическое увеличение. Геометрическое увеличение зависит от размеров контролируемого объекта, схемы контроля, пределов перемещения манипулятора и др. Для достаточно крупных объектов контроля (около 0,5 м), в представленных на рынке томографах технического назначения как минимум выполнимо условие  $d_\phi/f=1/2$ , что соответствует 2-кратному увеличению. При этом размер пикселя реконструируемой томограммы должен быть:

$$p \leq \frac{d_\phi}{f} \cdot \frac{1}{\text{ППР}}$$

Для ширины функции рассеяния, равной 2 мкм, необходимо фокусное пятно диаметром менее 4 мкм и шаг пикселя 0,1 мкм, а необходимая ширина зоны А детектирования составит:

$$A = \frac{f}{d} \cdot B = 2 \cdot B,$$

где  $B$  – ширина объекта контроля.

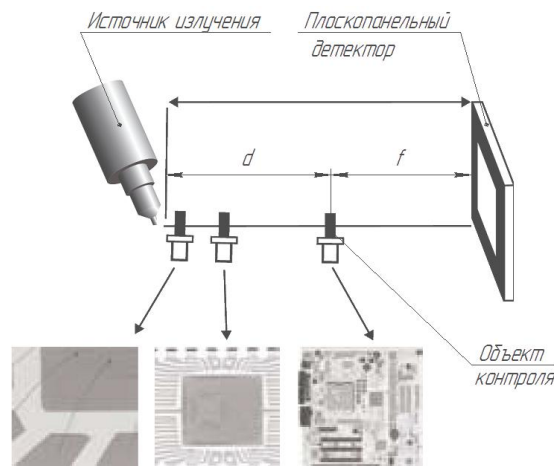


Рис. 1. Схема ППР рентгенконтроля

Величина ППР томографа также зависит от геометрической точности сканирующей системы, инерционности детектора в масштабе скорости сканирования, формата и алгоритма реконструкции томограммы, углового интервала при много-ракурсном сканировании, жесткости механики. Среди продукции фирм, перечисленных выше, имеются образцы с микрофокусными рентгеновскими трубками, у которых наименьший диаметр фокусного пятна равен 0,4-3 мкм. Это позволяет получить ширину функции рассеяния  $1/\text{ППР}$  равную 0,2-1,5 мкм. Однако шаг  $p$  пикселей плоскопанельных детекторов у всех производителей томографов для машиностроения равен 100-200 мкм, что в итоге обеспечит  $1/\text{ППР}$  равную 200-400 мкм. Нужно отметить, что на рынке представлены также CMOS-панели типа Shad-o-Snap 2048, которые имеют шаг пикселя 48 мкм и позволяют получить  $1/\text{ППР}$  около 100 мкм.

Как видно из выше изложенного экраны, которыми комплектуются промышленные томографы, имеют шаг пикселей на два порядка больше необходимого для выявления дефектов сварки трением, поэтому для выявления таких дефектов было предложено использовать вместо плоскопанельного детектора ультрамелкозернистую рентгеновскую пленку. Технические характеристики таких пленок приведены в таблице 2.

Таблица 2. Ультрамелкозернистые рентгеновские пленки

Производитель	Наим. пленки	Класс ISO 11699-1: 2008	Чувствительность (обрат. Р)	Среднее значение градиента плотности (контрастность)			Зернистость (среднекв. отклонение оптической плотности)
				D=2	среднее	D=4	
Kodak industrex	SR45	-	0,65	-	5,0	-	-
	DR50	C1	1,0	-	5,4	-	0,018
	M100	C2	0,45	-	5,4	-	0,017
Fomadux	R2	C1	-	-	-	-	0,018
Fuji	IX20	-	10	-	-	-	-
	IX25	C1	20	-	-	-	0,018
	IX29	-	22	-	-	-	-
AGFA Struct	D2	C1	1,0-3,0	5,2	6,0	9,1	0,014

Размер зерна рентгеновской пленки зависит от ее класса по стандарту ISO 11699-1. Примерные значения зерна:

- а) крупномелкозернистая пленка – 1-3 мкм;
- б) мелкозернистая пленка – 0,5-1 мкм;
- в) особомелкозернистая пленка – 0,2-0,5 мкм.

Особомелкозернистой пленки при двукратном геометрическом увеличении достаточно для получения разрешения 0,4-1 мкм, однако обычный визуальный контроль пленок под лупой со шкалой 0,1 мм не позволяет получить точность измерения более половины деления шкалы – 0,05 мм или 50 мкм, поэтому необходима оцифровка рентгеновских пленок с применением сканера. В настоящее время для этой цели можно использовать планшетные сканеры со слайд-адаптером, специальные сканеры пленок или промышленный барабанный сканер, который обладает лучшими характеристиками.

При сканировании рентгеновских пленок критичны следующие параметры сканера:

1) Оптическая плотность – диапазон цветовых тонов от светлого до темного, которые способен захватить сканер, лежит в пределах от 0·D до 4·D, при этом 0·D соответствует абсолютно белому изображению, а 4·D – абсолютно черному. Обычные цветные сканеры имеют оптическую плотность менее 2,5·D, что не позволяет оцифровывать темные рентгеновские пленки, поэтому необходимы сканеры с оптической плотностью не менее 3,2·D (барабанные сканеры имеют оптическую плотность 4·D).

2) Глубина цвета, которая у большинства сканеров при сканировании в режиме оттенков серого имеет глубину цвета 16 бит или 65536 уровней серого, что вполне достаточно для выявления дефектов в не массивных конструкциях.

3) Разрешение сканирования определяется матрицей сканера. При сканировании на разрешении 3200 dpi размер пикселя равен

$$p = \frac{1}{3200} = 3,12 \cdot 10^{-3} \text{ дюйма} = 8 \text{ мкм}$$

что при двукратном геометрическом увеличении обеспечивает 1/ППР равной 16 мкм. Если обеспечить геометрическое увеличение  $20^x$ , то 1/ППР будет равным 1,6 мкм. Этого вполне достаточно для выявления дефектов, типичных для сварки трением.

#### **Выводы:**

1. Применение ультразвукового контроля с применением технологии фазированных решеток для соединений, выполненных сваркой трением, нерационально, так как представленное на мировом рынке оборудование не позволяет надежно выявлять дефекты менее 50 мкм.

2. Компьютерная томография на установках с микрофокусными рентгеновскими трубками при большом геометрическом увеличении и с применением ультрамелкозернистых рентгеновских пленок позволяет выявить дефекты размером в несколько мкм в сварных швах, выполненных сваркой трением.

*Работа выполнена в рамках работ по выполнению постановления правительства РФ №218 от 9 апреля 2010 г. «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».*

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Olympus. Introduction to phased array ultrasonic technology applications, R/D Tech, 2007.
2. Вайнберг, И.А. Универсальные компьютерные томографы для отработки технологии и сертификации ответственных промышленных изделий / И.А. Вайнберг, Э.И. Вайнберг // Двигатель. 2011. №4. С. 19-23.

## **NON-DESTRUCTIVE CONTROL OF WELDED JOINTS, RECEIVED BY FRICTION WELDING**

© 2012 V.M. Bychkov, L.S. Savichev

Ufa State Aviation Technical University

Article is devoted to estimation of the modern methods of non-destructive control, such, as computer tomography and ultrasonic control with application of phased grids technology, from the point of view of their maximal resolving power and application to control the welded joints received by friction welding.

Key words: *non-destructive control, friction welding, computer tomography*