

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИКРОФОКУСНЫХ ИСТОЧНИКОВ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ДЕФЕКТОСКОПИИ СВАРНЫХ ШВОВ ПОСЛЕ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

Тарасов С.Ю.<sup>1,2</sup>, Рубцов В.Е.<sup>1,2</sup>, Колубаев Е.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г.Томск, Россия (634021, г.Томск, пр.Академический 2/4), e-mail: [tsy@ispms.ru](mailto:tsy@ispms.ru)

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г.Томск, Россия (634050, г. Томск, проспект Ленина, 30)

Статья посвящена проблемы неразрушающего контроля сварных соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием. В статье обсуждаются особенности процесса сварки трением с перемешиванием. Данному способу сварки присущи специфические дефекты, которые не встречаются при использовании традиционных способов сварки плавлением. Одним из таких дефектов является дефект в виде стыковой линии толщиной в доли микрона. Кроме того, в зависимости от условий сварки могут возникать весьма мелкие дефекты типа несплошностей неправильной формы. Традиционно используемое в радиографии оборудование в виде источника излучения может не обеспечить надежное детектирование такого рода дефектов из-за недостаточно малого размера фокального пятна. Использование же рентгеновской пленки весьма неудобно из-за необходимости оперативного контроля швов большой длины. Выходом из такого положения является использование микрофокусных источников излучения и панельных детекторов, установленных на сканирующем устройстве.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, микрофокусный источник, панельный детектор, неразрушающий контроль

## APPLICATION OF MICROFOCUS X-RAY TUBES FOR NON-DESTRUCTIVE TESTING OF FRICTION STIR WELD JOINTS

Tarasov S.Y.<sup>1,2</sup>, Rubtsov V.E.<sup>1,2</sup>, Kolubaev E.A.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia (634021, Tomsk, pr. Akademicheskii, 2/4), e-mail: [tsy@ispms.ru](mailto:tsy@ispms.ru)

<sup>2</sup>National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia (634050, Tomsk, pr. Lenina, 30)

This paper is devoted to non-destructive testing of friction stir welded structures. The specificity of friction stir welding with respect to radiographic testing and weld flaws is discussed. One of those weld flaws is the so-called kissing bonds defect which looks like a thin line in the cross section view. Also very small irregular shape voids may appear in the weld depending upon the welding process conditions. Traditionally used in radiographic testing equipment including X-ray source may not be effective for detecting those defects due to not small enough focal spot size. The use of X-ray film for detecting the friction stir weld flaws may not be effective due to necessity for operative testing very long welds. The outcome may be using microfocuse X-ray tubes and panel detectors mounted on a scanning device.

Keywords: friction stir welding, microfocus tube, flat panel detector, non-destructive testing

Проблемой контроля сварных соединений, которые получены сваркой трением с перемешиванием, является наличие труднодетектируемых дефектов, таких как стыковые линии и мелкие несплошности [2, 5]. Проведенные нами ранее исследования видов и размеров дефектов в сварных швах показали, что имеющееся радиографическое оборудование позволяет уверенно выявлять дефекты типа пор размером от 0,2 мм [1]. При этом основным дефектом таких сварных соединений являются дефекты в виде линий различной кривизны, которые выявляются только металлографическим способом. Толщина этих дефектов может достигать долей микрона, а протяженность десятков миллиметров в зависимости от количества оксидов на поверхностях, подготовленных к сварке заготовок. Тем не менее, даже

при соответствующей очистке и подготовке кромок перед сваркой формирование такого типа дефектов возможно и, поэтому, необходимо иметь средство обнаружения.

Одним из способов детектирования дефектов малого размера является радиография с использованием большого геометрического увеличения, которое определяется как отношение расстояний от источника до объекта (FOD) и от источника до детектора (FDD) (Рис.1). Это требует использование микрофокусного источника рентгеновского излучения, который позволяет достигать увеличения в несколько сотен раз при хорошей четкости изображения (Рис.1). Геометрическое увеличение рассчитывается как  $M=FDD/FOD$ . Геометрическое размытие из-за конечной величины фокального пятна  $U=(M-1)*F$ , где  $F$  размер фокального пятна.

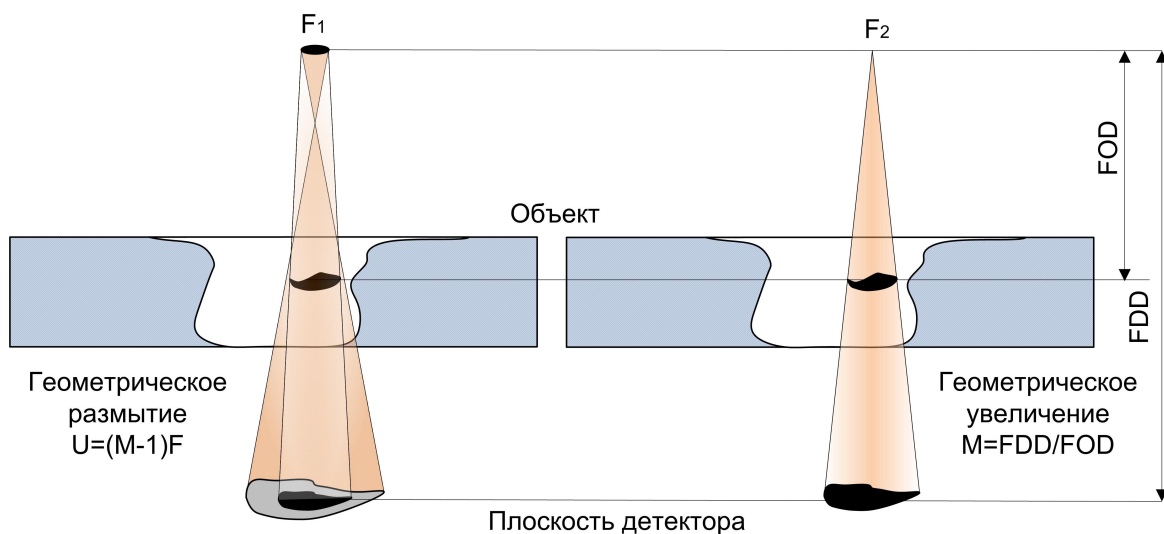


Рис.1. Увеличение и размытие изображения при использовании источников с различным размером фокусного пятна

Существует три типа микрофокусных трубок, которые иначе называются трубками открытого типа. В этих трубках применяется электромагнитная система фокусировки электронного луча и, в отличие от трубок закрытого типа, в них возможна замена анода на новый после истечения срока службы старого. В связи с этим трубки снабжены системой вакуумирования. Типы микрофокусных трубок:

1. Трубки прострельного (transmission) типа, в которых сфокусированный электронный пучок попадает на мишень так, чтобы исходящее рентгеновское излучение выходило с обратной стороны мишени под углом около  $160^\circ$ .
2. Трубки, в которых сфокусированный пучок электронов падает на анод под углом (reflection type).
3. Третий тип трубок, в которых используется анод в виде стержня (rod anode). Трубки стержневого типа могут снабжаться несколькими видами анодов, которые определяют форму рентгеновского пучка.

Основной областью применения трубок прострельного типа является неразрушающий

контроль электронных компонентов, микросхем и миниатюрных приборов и инструментов медицинского назначения. В зависимости от их мощности они могут быть использованы и для неразрушающего контроля материалов. Их отличительной чертой является высокое разрешение и увеличение.

Трубки отражательного типа используются для контроля металлических изделий автомобильной и аэрокосмической промышленности. Вследствие конструкции анода излучение направлено под углом  $60^\circ$  к оси электронного пучка и осевой линии прибора. Наиболее удобно в этом случае будет внешнее размещение источника.

Трубки третьего типа со стержневым анодом. В зависимости от формы анода можно получать кольцевой пучок, обратный, отраженный или прямой. В зависимости от типоразмера трубки длина и канала с анодом и диаметр анода может быть выбрана из соображений удобства использования. Размер фокусного пятна на аноде зависит от расстояния между фокусирующей системой и анодом и, соответственно, длины направляющей трубки. В связи с этим размер анодного пятна в этом типе трубок несколько больше, чем в трубках первых двух типов. Прямое назначение такого рода трубок - неразрушающий контроль труб и сварных швов.

Применение сварки трением с перемешиванием предполагает получение сварных соединений большой длины, которые неудобно контролировать с помощью радиографических пленочных технологий. Выходом из этого положения может быть применение детекторов панельного типа и сканирующих устройств, которые позволяют за короткое время осуществить радиоскопический контроль шва значительной длины. Чем больше размер детектора, тем большее геометрическое увеличение и большая производительность при контроле может быть достигнута.

### **Оборудование и материалы**

В качестве оборудования для неразрушающего контроля полученных швов применяли микрофокусный источник рентгеновского увеличения XWT 240 SE, (X-RAY WorX, Garbsen, Germany) плоско-панельный детектор XRD 1622 AP3 (PerkinElmer, Waltham, USA) размером поля зрения (FOV) 41 см, разрешением 2048x2048 пикселей, размер пикселя 200 мкм. Оборудование было установлено по схеме, которая позволила достигнуть 40-кратного увеличения. Эксперимент проводили на оборудовании, предоставленном ЗАО Тестрон, (г.Санкт-Петербург). Для контроля чувствительности применяли проволочный алюминиевый эталон EN 462-1 W13 с диаметрами проволочек 0,045; 0,062; 0,076; 0,097; 0,122; 0,157; 0,195 мм. Расстояние между проволочками составляет 5 мм. Поскольку размер фокусного пятна трубки зависит от величин высокого напряжения и тока в трубке, то для оценки максимальной разрешающей способности микрофокусной системы при заданном

геометрическом увеличении применяли тест JIMA RT RC-02B (Рис.2).

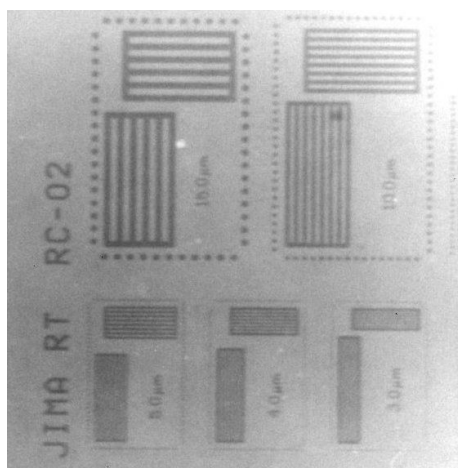


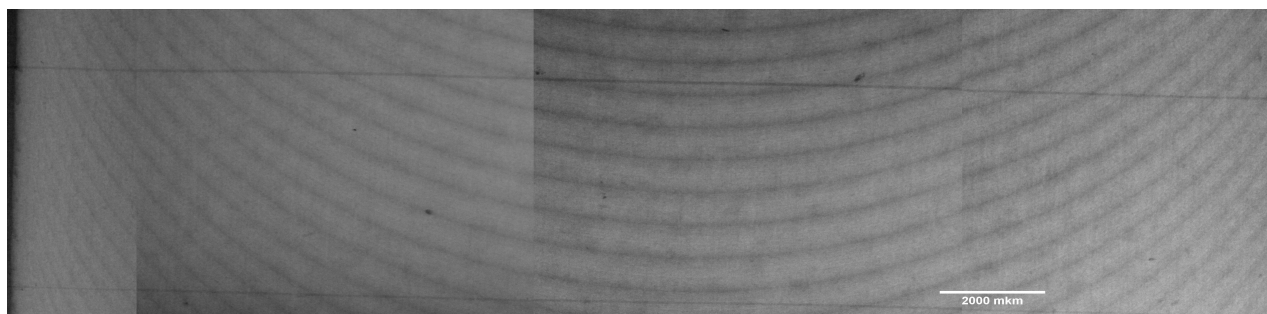
Рис.2 Фрагмент теста JIMA RT RC-02B

Для 140 кВ и 30 Вт достигалось разрешение 5 мкм (Рис.2), следовательно, размер фокусного пятна на аноде трубки был не более 10 мкм. Реально использовалось излучение 120 кВ, 20 Вт, что заведомо улучшало разрешение. Съемка шва проводилась по частям так, чтобы последовательные кадры перекрывались по ширине шва.

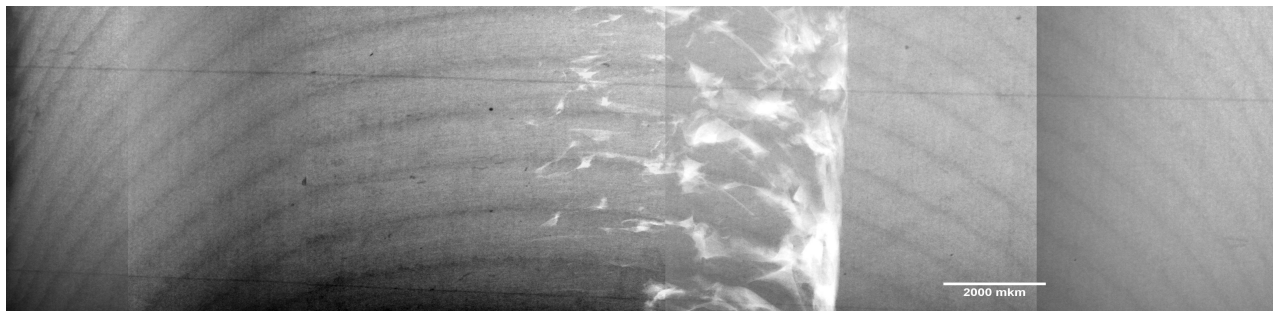
В качестве материала для сварки трением с перемешиванием применяли пластины из термически неупрочняемого деформируемого сплава АМг5М в отожженном состоянии. Две пластины сваривались по длине с использованием опытно-промышленной установки, разработанной ЗАО Чебоксарское предприятие «Сеспель». Толщина свариваемых пластин составляла 8 мм, ширина образца после сварки 185 мм. Длина сварных соединений, полученных при разных режимах сварки, составляла около 500 мм. Были исследованы два образца, полученные сваркой трением с перемешиванием (СТП) при следующих условиях сварки: частота вращения инструмента 400 об/мин, усилие прижатия инструмента к столу 3200 и 3500 кг, скорость сварки 300 и 400 мм/мин.

### Результаты и обсуждение

В результате были получены радиографические изображения швов, составные изображения которых показаны на Рис.3а, б.



а)



б)

Рис.3. Радиографические составные изображения швов, полученных СТП (а) 8 мм, 400 об/мин, 3200 кг, 300 мм/мин; (б) 8 мм, 400 об/мин, 3500 кг, 400 мм/мин

Шов, полученный по режиму 400 об/мин, 3200 кг, 300 мм/мин (Рис.3, а) не содержал дефектов в виде пустот. Единственным типом дефекта в нем были инородные включения. При увеличении скорости сварки до 400мм/мин в шве формируется продольный дефект в виде несплошности сложной формы (Рис.3, б). Такой тип дефекта в литературе называется "wormhole". Этот дефект сформировался, несмотря на то, что сила прижатия инструмента была увеличена с 3200 до 3500 кг. По-видимому, скорость сварки имеет большее значение с точки зрения образования дефекта, чем сила прижатия. Такой вывод подтверждается результатами работ [3, 4], где указывается на роль скорости сварки и частоты вращения инструмента как на основные факторы, обеспечивающие пластифицирование материала в зоне сварки.

Наличие инородных включений обусловлено двумя причинами. В первом случае это могут быть вольфрамовые включения, образованные при дополнительном фиксировании свариваемых пластин аргонодуговой сваркой. Второй тип включений образуется при работе изношенным инструментом, когда на поверхности инструмента образуется трибологический слой в результате диффузионного взаимодействия свариваемого материала и инструмент [6]. Частицы этого слоя могут отслаиваться и замешиваться в металл шва.

### **Заключение**

Таким образом, была исследована возможность использования микрофокусных источников для детектирования дефектов сварных соединений, полученных методом сварки трением с перемешиванием. Показано, что скорость сварки является превалирующим фактором для формирования дефектов типа несплошности в зоне сварки.

*Работа выполнена по Проекту III.23.2.1 «Разработка научных основ создания мультимодальных функциональных материалов и покрытий триботехнического назначения на основе динамики контактирования поверхностей» и при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 02.G25.31.0063) в рамках реализации Постановления Правительства РФ № 218.*

### **Список литературы**

- 1.Тарасов С.Ю., Рубцов В.Е., Колубаев Е.А., Гнюсов С.Ф. Радиоскопическая графическая идентификация дефектов сварного шва, полученного методом сварки трением с перемешиванием. Сварка и Диагностика.
- 2.Friction stir welding: From basics to applications. Ed. by D. Lohwasser and Zh. Chen Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC. 2010. 432 p.
- 3.Kim Y.G., Fujii H., T. Tsumura, T. Komazaki, K. Nakata. Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy Materials Science and Engineering A. 2006. 415. 250–254.
- 4.Li B., Shen Y., Hu W. The study on defects in aluminum 2219-T6 thick butt friction stir welds with the application of multiple non-destructive testing methods. Materials and Design. 2011. 32. 2073–2084.
- 5.Mishra R. S. and Mahoney M.. Friction stir welding and processing. ASM International. 2007. 360 p.
- 6.Rubtsov V.E., Kolubaev E.A. A proposed diffusion-controlled wear mechanism of alloy steel friction stir welding (FSW)tools used on an aluminum alloy Wear 318 (2014)130–134.

**Рецензенты:**

Гнюсов С.Ф., д.т.н., профессор кафедры Оборудование и технология сварочного производства НИ ТПУ, г.Томск;

Колубаев А.В., д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией физики упрочнения поверхности ИФПМ СО РАН, г.Томск.