

**Кристина Денисовна Малыгина<sup>1\*</sup>, Евгения Александровна Путилова<sup>1</sup>,  
Светлана Евгеньевна Крылова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ИМАШ УрО РАН 1, г. Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup>Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, Россия

\**kristina.kryucheva@mail.ru*,

## **АНАЛИЗ МИКРОСТРУКТУРЫ И МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТЫКОВОГО СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ТРУБЫ ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ**

Развитие и освоение месторождений нефти и газа приводят к необходимости создания протяженных конструкций, как с высокой конструкционной прочностью, так и зачастую с высокими требованиями к обеспечению коррозионной стойкости. К материалам, позволяющим обеспечивать подобный уровень свойств можно отнести биметаллы. Однако в связи с необходимостью производства длинномерных биметаллических конструкций возникает задача изучения способов их соединения. Сварные соединения биметаллов представляют собой сложную систему, образующуюся при соединении металлов различного структурного класса с разной степенью легирования. Поэтому необходимо понимать особенности формирования микроструктуры и свойств по ширине сварного соединения при различных условиях сварки.

*Ключевые слова:* биметаллические трубы; стыковое сварное соединение; лазерная сварка; зона термического влияния (ЗТВ); магнитные шумы Баркгаузена (МШБ).

***Kristina D. Malygina, Evgenia A. Putilova, Svetlana E. Krylova***

## **ANALYSIS OF MICROSTRUCTURE AND MAGNETIC CHARACTERISTICS OF BUTT WELDED JOINT OF BIMETALLIC PIPE AFTER LASER WELDING**

The development and exploitation of oil and gas fields lead to the necessity to create extended structures with high structural strength and often with high requirements for corrosion resistance. Bimetals can be referred to the materials allowing to provide such level of properties. However, due to the need to produce long bimetallic structures, the task of studying the methods of their connection arises. Welded joints of bimetals are a complex system formed by joining metals of different structural classes with different degrees of alloying. Therefore, it is necessary to understand the features of the formation of microstructure and properties across the width of the welded joint under different welding conditions.

*Keywords:* bimetallic pipes; butt welded joint; laser welding; thermal affected zone (TAZ); Barkhausen magnetic noise (BMN).

Работа посвящена исследованию структуры и магнитных характеристик стыкового сварного соединения, полученного по технологии лазерной сварки. В настоящее время лазерная сварка является распространенным методом соединения материалов, что связано с надежностью и эффективностью данного метода. [1,2]. Однако, сварка именно биметаллических изделий представляет собой малоизученную область. Особенности взаимодействия различных материалов, их свойств и структур при сварке требуют детального исследования [3,4]. Это важно не только для обеспечения качества и прочности сварных соединений, но и для предотвращения потенциальных дефектов и повреждений, которые могут возникнуть в процессе эксплуатации.

В качестве материалов для изготовления биметаллической трубы использовались конструкционная сталь 32Г2С и коррозионностойкая высоколегированная сталь 08Х18Н10Т. Биметаллическая труба изготавливалась по технологии лейнирования [5]. Химический состав исследуемых сталей приведен в таблице 1.

Таблица 1.

Химический состав исследуемых сталей, масс. %

| Марка стали      | C    | Si   | Mn   | S    | Cr    | Ni   | Mo   | Cu   | Fe    | Ti   |
|------------------|------|------|------|------|-------|------|------|------|-------|------|
| <b>32Г2С</b>     | 0,32 | 0,50 | 1,55 | 0,01 | 0,14  | 0,17 | 0,03 | 0,21 | 96,70 | -    |
| <b>08Х18Н10Т</b> | 0,08 | 0,76 | 1,09 | 0,02 | 16,58 | 9,82 | 0,2  | 0,23 | 70,07 | 0,59 |

Микроструктурные исследования проводились с использованием оптического микроскопа NEOPHOT-21. С применением анализатора магнитных шумов Баркгаузена (МШБ) MICROSCAN 600 определяли параметры МШБ, а именно среднеквадратичное значение напряжения МШБ (U) и число скачков Баркгаузена (N) при частоте перемагничивания 95 Гц в пакете из 10 циклов. Первичным преобразователем служил накладной датчик с сечением полюсов 3×8 мм и расстоянием между полюсами 4 мм. Измерение параметров шумов Баркгаузена проводили, размещая датчики от центра шва к периферии образцов со стороны конструкционной стали. Для каждой точки проводили серию из пяти измерений с переустановкой датчиков, после чего полученные результаты усредняли. Максимальное отклонение измеренных величин от средних значений не превышало 5 %.

В данной работе проводился радиографический контроль полученных сварных соединений на 3D Томографе. Результаты представлены на рис. 3.

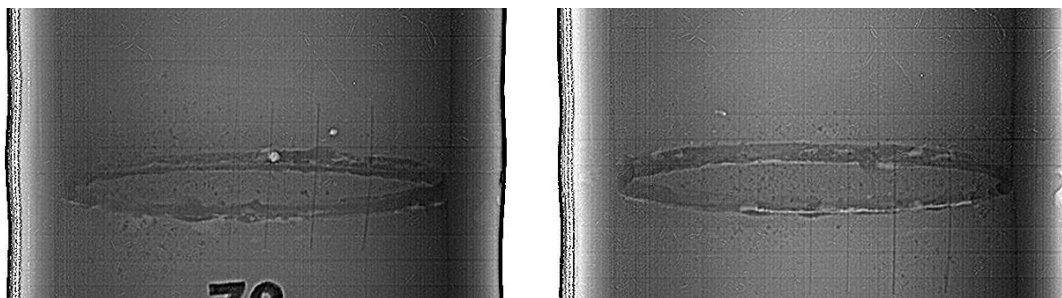


Рис. 1. Рентгенограмма стыкового сварного соединения, полученного лазерной сваркой.

На радиографическом снимке образца после лазерной сварки наблюдается непровар длиной 30 мм - дефект, характеризующийся отсутствием соединения между свариваемыми поверхностями. Заметны подрезы - углубления или выемки, образующиеся вдоль края сварного шва. Присутствуют поры – прожог и кратер.

Микроструктура сварного стыка и приконтактных зон в исследуемом образце после лазерной сварки, полученная при исследовании на оптическом микроскопе, представлена на рисунке 2.

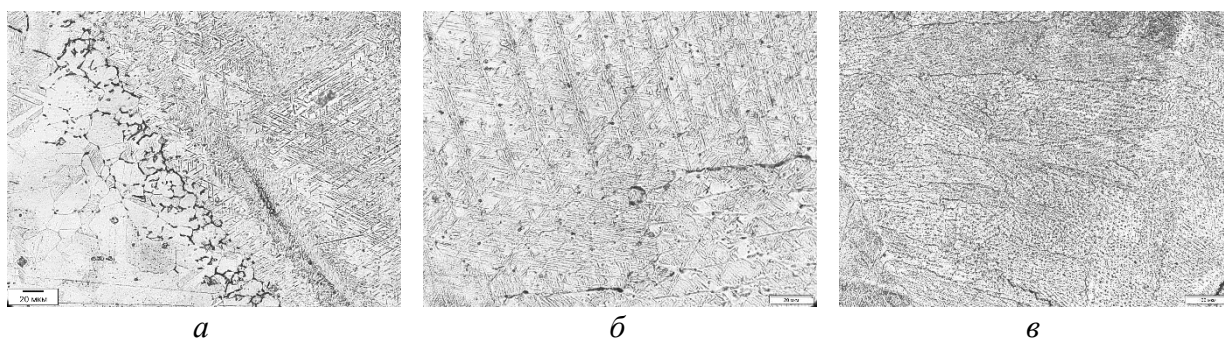


Рис. 2. Микроструктура сварного шва и приконтактных зон после лазерной сварки.

На микроструктуре сварного соединения выявляется зона термического воздействия (ЗТВ) протяженностью около 4.5 мм, по обе стороны, от которой располагается основной металл (2а). При лазерной сварке быстрый процесс нагрева и охлаждения привел к образованию мартенситных структур в сварном шве (2б). Так же данные участки имеют характерное для литого металла столбчатое строение (2в).

На рис. 3 показано распределение параметров магнитных шумов Баркгаузена по ширине сварного соединения.

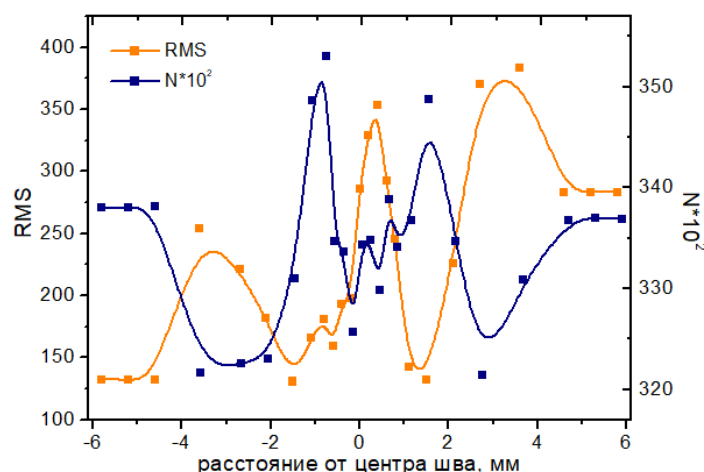


Рис. 3. Распределение параметров RMS и числа скачков МШБ по длине образцов со сварным соединением.

Распределение магнитных параметров характеризуется локальным повышением в зоне шва ввиду образования закалочных структур. Магнитные параметры можно использовать для оценки изменения ширины шва [6].

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Cui L., Dual beam laser keyhole welding of steel/aluminum lapped joints / L. Cui, B. Chen, L. Chen, D. He // J Mater Process Technol. 2018. V. 256. P. 87-97.
2. W. Huang, H. Wang, T. Rinker, W. Tan «Investigation of metal mixing in laser keyhole welding of dissimilar metals» // Mater Des, 195 (2020), Article 109056.
3. Горкунов Э.С. Влияние структуры и напряженного состояния на магнитные свойства металла в различных зонах сварных труб большого диаметра / Э.С. Горкунов, С. М. Задворкин, Е. А. Путилова, Р.А. Саврай // ФММ. 2014. № 10. С. 1011–1018.
4. I. Hajiannia, M. Shamanian, M. Kasiri «Microstructure and mechanical properties of AISI 347 stainless steel/A335 low alloy steel dissimilar joint produced by gas tungsten arc welding» // Mater. Des., 50 (2013), pp. 566-573
5. Астров Е.И. Плакированные многослойные металлы / Е.И. Астров. М.: Металлургия, 1965. 239 с.
6. Горкунов Э. С. Использование магнитного структурно-фазового анализа для диагностики и оценки ресурса изделий и элементов конструкций. Часть 1 // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. - 2015. № 1. С. 6-40. DOI: 10.17804/2410-9908.2015.1.006-040.

#### REFERENCES

1. Cui L., Dual beam laser keyhole welding of steel/aluminum lapped joints / L. Cui, B. Chen, L. Chen, D. He // J Mater Process Technol. 2018. V. 256. P. 87-97.
2. W. Huang, H. Wang, T. Rinker, W. Tan «Investigation of metal mixing in laser keyhole welding of dissimilar metals» // Mater Des, 195 (2020), Article 109056.

3. Gorkunov, E.S. Influence of structure and stress state on magnetic properties of metal in different zones of welded large-diameter pipes / E.S. Gorkunov, S.M. Zadvorkin, E.A. Putilova, R.A. Savrai // FMM. 2014. № 10. P. 1011-1018.
4. I. Hajiannia, M. Shamanian, M. Kasiri «Microstructure and mechanical properties of AISI 347 stainless steel/A335 low alloy steel dissimilar joint produced by gas tungsten arc welding» // Mater. Des., 50 (2013), pp. 566-573
5. Astrov, E.I. Clad multilayer metals / E.I. Astrov. Moscow: Metallurgy, 1965. 239 c.
6. Gorkunov E. S. Magnetic Structural-Phase Analysis as Applied to Diagnosing and Evaluating the Lifetime of Products and Structural Components. Part 1 // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. - 2015.Iss. 1.P. 6-40. DOI: 10.17804/2410-9908.2015.1.006-040.