

Received : 31.10.2025

Revised: 25.12.2025

Accepted: 26.12.2025

DOI: 10.17804/2410-9908.2025.6.100-113

DISTRIBUTION OF MAGNETIC BARKHAUSEN NOISE PARAMETERS, MICROMECHANICAL CHARACTERISTICS, AND RESIDUAL STRESSES IN THE WELDED JOINT OF A BIMETALLIC PIPE

E. A. Putilova^{1, a, *}, K. D. Malygina^{1, b}, V. E. Veselova^{1, c}, I. S. Kamantsev^{1, d},
 E. Yu. Priymak^{2, 3, e}, and Ya. S. Semka^{2, 3, f}

¹*Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
 34 Komsomolskaya St., Ekaterinburg, 620049, Russia*

²*ZBO Drill Industries, Inc.,
 118 Pobedy Ave., Orenburg, 460026, Russia*

³*Orenburg State University,
 13 Pobedy Ave. Orenburg, 460018, Russia*

^a  <http://orcid.org/0000-0002-8508-8413>  tuevaevgenya@mail.ru;
^b  <http://orcid.org/0000-0002-9932-2346>  kristina.kryucheva@mail.ru;
^c  <http://orcid.org/0000-0002-4955-6435>  Le-ra@le-ra.ru;
^d  <http://orcid.org/0000-0003-0775-4043>  trophyland@mail.ru;
^e  <http://orcid.org/0000-0002-4571-2410>  elena-pijjmak@yandex.ru;
^f  semkazbo@bk.ru

*Corresponding author. Email: tuevaevgenya@mail.ru

Address for correspondence: ul. Komsomolskasya, 34, Ekaterinburg, 620049, Russia
 Tel.: +7 (922) 111-3637

The development of nondestructive testing methods for welds of structural materials is an urgent and demanding problem for increasing productivity and ensuring safety during operation of parts and structural elements. The paper contains the results of experimental studies on the distribution of magnetic Barkhausen noise parameters, micromechanical characteristics, and the level of residual stresses along the cross-section of a welded joint obtained by rotary friction welding of a bimetallic pipe. Patterns of changes in certain parameters depending on the width of the welded joint and the features of its macrostructure have been established.

Keywords: bimetallic pipe, rotary friction welding, magnetic Barkhausen noise parameters, residual stresses, micromechanical characteristics

Acknowledgment

The work was performed under the state assignment for the IES UB RAS, No. 12407500003-6. The equipment of the Plastometriya shared research facilities, IES UB RAS, was used for the research.

References

1. Wang, C., Bi, Z.Y., Zhang, W.P., Yang, Y.B., and Han, C.C. Research status on double-metal composite pipe at home and abroad. *Welded Pipe and Tube*, 2015, 38 (12), 7–12.
2. Spence, M.A. and Roscoe, C.V. Bi-metal CRA-lined pipe employed for North Sea field development. *Oil and Gas Journal*, 1999, 97, 80–88.

3. Wang, X., Yang, L., Sun, T., Rasool, G., Sun, M., Hu, N., and Guo, Z. A review of development and application of out-of-pipe detection technology without removing cladding. *Measurement*, 2023, 219, 113249. DOI: 10.1016/j.measurement.2023.113249.
4. Smith, L. *Engineering with Clad Steel*, Nickel Institute Technical Series No 10 064.
5. Sleptsov, O.I., Lyglaev, A.V., Bolshakov, A.M., and Sintsov, S.A. Diagnostics and safety of aging large mechanical systems operating under conditions of the Far North: the problem and ways to solve it. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2008, 44, 395–402. DOI: 10.1134/S1061830908060053.
6. Syromyatnikova, A.S. *Ekspluatatsionnaya degradatsiya metalla trub magistralnykh gazoprovodov Severa* [Operational Degradation of Metal Pipes of the North Main Gas Pipelines]. SO RAN Publ., Novosibirsk, 2017, 95 p. (In Russian).
7. Priymak, E.Yu., Yakovleva, I.L., Tereshchenko, N.A., Stepanchukova, A.V., and Morozova, A.N. Evolution of the structure and mechanism of the formation of welded joints of medium-carbon steels upon rotary friction welding. *The Physics of Metals and Metallography*, 2019, 120, 1091–1096. DOI: 10.1134/S0031918X19110127.
8. Poyarkova, E.V. and Kuzeev, I.R. To the question of solving the problem of improving the reliability of equipment in oil and gas industry based on the quality control of welded joints. *Neftegazovoe Delo*, 2008, 6 (1), 239–244. (In Russian).
9. Saraev, Yu.N., Bezborodov, V.P., and Putilova, E.A. Effect of heat input pulse on the structure and properties of welded joints of steels ferritic-pearlitic class, operating under low-frequency temperature-force loading. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2015, 91, 012014. DOI: 10.1088/1757-899X/91/1/012014.
10. Henager Jr., C.H., McCloy, J.S., Ramuhalli, P., Edwards, D.J., Hu, S., and Li, Y. Investigation of magnetic signatures and microstructures for heat-treated ferritic/martensitic HT–9 alloy. *Acta Materialia*, 2013, 61 (9), 3285–3296. DOI: 10.1016/j.actamat.2013.02.017.
11. Putilova, E.A., Mushnikov, A.N., Zadvorkin, S.M., and Kryucheva, K.D. Effect of tensile elastic deformations on magnetic properties of preliminarily deformed structural steel operating under pressure. *Metal Science and Heat Treatment*, 2022, 64, 410–414. DOI: 10.1007/s11041-022-00822-w.
12. Zadvorkin, S.M., Gorkunov, E.S., Goruleva, L.S., Putilova, E.A., and Maltseva, A.N. Comparison of x-ray analysis and EBSD analysis methods for residual stresses estimation in welded pipes made of 13CrVA steel. *AIP Conference Proceedings*, 2019, 2167 (1), 020397. DOI: 10.1063/1.5132264.
13. Vértesy, G., Mészáros, I., and Tomáš, I. Nondestructive magnetic characterization of TRIP steels. *NDT & E International*, 2013, 54, 107–114. DOI: 10.1016/j.ndteint.2012.12.008.
14. Stupakov, O., Pal'a, J., Tomáš, I., Bydžovský, J., and Novák, V. Investigation of magnetic response to plastic deformation of low-carbon steel. *Materials Science and Engineering: A*, 2007, 462 (1–2), 351–354. DOI: 10.1016/j.msea.2006.02.475.
15. Franco, F.A., González, M.F.R., De Campos, M.F., and Padovese, L.R. Relation between magnetic Barkhausen noise and hardness for Jominy quench tests in SAE 4140 and 6150 steels. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2013, 32, 93–103. DOI: 10.1007/s10921-012-0162-8.
16. Xu, H., Avila, J.R.S., Wu, F., Roy, M.J., Xie, Y., Zhou, F., Peyton, A., and Yin, W. Imaging x70 weld cross-section using electromagnetic testing. *NDT & E International*, 2018, 98, 155–160. DOI: 10.1016/j.ndteint.2018.05.006.
17. Vourna, P., Ktena, A., Tsakiridis, P.E., and Hristoforou, E. An accurate evaluation of the residual stress of welded electrical steels with magnetic Barkhausen noise. *Measurement*, 2015, 71, 31–45. DOI: 10.1016/j.measurement.2015.04.007.
18. Gorkunov, E.S., Povolotskaya, A.M., Tueva, E.A., Goruleva, L.S., and Zadvorkin, S.M. Determination of the magnetic properties of separate zones of welds and the width of welded joints

based on magnetic measurements. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2011, 47, 577–586. DOI: 10.1134/S1061830911090038.

19. Page, T.F. and Hainsworth, S.V. Using nanoindentation techniques for the characterization of coated systems: a critique. *Surface and Coatings Technology*, 1993, 61 (1–3), 201–208.

20. Putilova, E., Kryucheva, K., Kamantsev, I., and Priymak, E. Microstructure, physical-mechanical, and magnetic characteristics of a butt-welded joint obtained by rotary friction welding technology of bimetallic pipe. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2024, 8 (6), 271–283. DOI: 10.3390/jmmp8060271.

21. Mahmoud, B.M.M. *Effects of Thermal and Mechanical Treatments on the Fatigue Performance of Friction Welded Joints*: Doctoral Thesis (Dissertation), Cairo, Egypt, 2018, 179 p.

22. Rombaut, P. *Joining of Dissimilar Through Rotary Friction Welding*: Master Thesis, Gent, 2011, 112 p.

23. GOST R 8.748–2011.

24. Rusakov, A.A. *Rentgenografiya metallov* [X-Ray Analysis for Metals]. Atomizdat Publ., Moscow, 1977, 480 p. (In Russian).

25. 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, 1, 6–40. DOI: 10.17804/2410-9908.2015.1.006-040. Available at: http://dream-journal.org/issues/2015-1/2015-1_19.html

26. Priymak, E.Yu., Atamashkin, A.S., Yakovleva, I.L., and Fot, A.P. Interrelation between the microstructure and impact toughness of the interface of welded joints of 32HGMA and 40HN2MA steels produced by rotary friction welding. *Frontier Materials & Technologies*, 2025, 2, 73–85. DOI: 10.18323/2782-4039-2025-2-72-6.

Подана в журнал: 31.10.2025
УДК 669-1;539.533;537.624
DOI: 10.17804/2410-9908.2025.6.100-113








РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНЫХ ШУМОВ БАРКГАУЗЕНА, МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНОМ СОЕДИНЕНИИ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ТРУБЫ

Е. А. Путилова^{1, а, *}, К. Д. Малыгина^{1, б}, В. Е. Веселова^{1, в}, И. С. Каманцев^{1, г},
Е. Ю. Приймак^{2, 3, д}, Я. С. Семка^{2, 3, е}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения им. Э. С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук,
ул. Комсомольская, 34, Екатеринбург, 620049, Россия

²АО «Завод бурового оборудования»,
пр. Победы, д. 118, г. Оренбург, 460026, Россия

³Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Оренбургский государственный университет»,
пр. Победы, д. 13, г. Оренбург, 460018, Россия

^а  <http://orcid.org/0000-0002-8508-8413>  tuevaevgenya@mail.ru;
^б  <http://orcid.org/0000-0002-9932-2346>  kristina.kryucheva@mail.ru;
^в  <http://orcid.org/0000-0002-4955-6435>  Le-ra@le-ra.ru;
^г  <http://orcid.org/0000-0003-0775-4043>  trophyland@mail.ru;
^д  <http://orcid.org/0000-0002-4571-2410>  elena-pijjmak@yandex.ru;
^е  semkazbo@bk.ru

*Ответственный автор. Электронная почта: tuevaevgenya@mail.ru
Адрес для переписки: ул. Комсомольская, 34, Екатеринбург, 620049, Россия
Тел.: +7 (922) 111-36-37

Развитие неразрушающих методов контроля сварных швов конструкционных материалов является актуальной и требующей внимания проблемой для повышения производительности и обеспечения безопасности при эксплуатации деталей и элементов конструкций. Статья содержит результаты экспериментальных исследований распределения параметров магнитных шумов Баркгаузена, микромеханических характеристик и уровня остаточных напряжений по сечению сварного соединения биметаллической трубы, полученного по технологии ротационной сварки трением. Установлены закономерности изменения определенных параметров в зависимости от ширины сварного соединения и особенностей его макроструктуры.

Ключевые слова: биметаллическая труба, ротационная сварка трением, параметры магнитных шумов Баркгаузена (МШБ), остаточные напряжения, микромеханические характеристики

1. Введение

Сварка является одним из наиболее широко используемых методов создания неразъемных соединений в различных областях промышленности. Получение прочного сварного соединения для материалов различного класса с применением перспективных методов сварки является актуальной и не всегда тривиальной задачей. Так, например, активное освоение арктических шельфов, развитие нефтегазовой, энергетической и химической промышленности предъявляют повышенные требования к надежности и долговечности трубопроводных конструкций. Применение биметаллических труб для транспортировки нефти и газа, в качестве обсадных труб для скважин и в различном оборудовании для добычи и обработки нефти

и газа оправданно и находит свое применение [1–3]. Условия эксплуатации в нефтегазовой промышленности часто включают в себя высокие давления и агрессивные химические среды, такие как соленые воды, кислоты и другие коррозионно-активные вещества. Биметаллические трубы, благодаря своей конструкции из двух или более различных металлических материалов, способны выдерживать такие условия эксплуатации и обеспечивать долговечность и надежность оборудования [3]. Для создания протяженных конструкций необходимо получение стыковых соединений материалов, отличающихся по своей структуре, степени легирования и механическим характеристикам. Особенно важным при получении длинномерных трубных конструкций является обеспечение высокого качества сварных соединений при сохранении эксплуатационных характеристик, таких как коррозионная стойкость, на высоком уровне [5, 6].

Неотъемлемой частью сварочного процесса являются последствия влияния режимов (температуры, давления, усилия и т. п.) на микроструктуру свариваемого материала, что, в свою очередь, напрямую определяет конечные свойства готового изделия [7–9]. Контроль состояния сварных соединений и выявление возможных дефектов без нарушения целостности трубопроводов является одним из важных аспектов неразрушающих методов контроля. Электромагнитные и магнитные методы широко применяются для исследования свойств металлов и их сварных соединений [10–14]. На данный момент установлена взаимосвязь между напряженным состоянием и параметрами магнитных шумов Баркгаузена для различных ферромагнитных сталей [15–18]. Магнитные шумы Баркгаузена (МШБ) в достаточной мере чувствительны к изменениям микроструктуры и распределениям остаточных напряжений [17, 18]. Применение метода МШБ позволяет проводить оперативный неразрушающий контроль качества и ширины получаемого сварного соединения, а также состояния трубопроводов непосредственно в процессе эксплуатации. При этом данный метод не требует вырезки образцов, сложной подготовки поверхности и долгой подготовки оператора контроля.

Важным аспектом развития магнитных методов неразрушающего контроля является исследование распределения магнитных параметров в сопоставлении с распределением характеристик прочности материала. Измерение микромеханических свойств с помощью наноиндентора позволяет получать точные данные о твердости и упругопластическом поведении материала в микромасштабах [19]. Сопоставление этих данных с магнитными параметрами дает возможность оценивать прочность и пластичность сварного соединения без испытаний на разрушение.

Особенно актуальным является развитие подобных методов для биметаллических труб, где различие в свойствах соединяемых материалов создает неоднородность структуры, сложное неравномерное распределение внутренних напряжений, механических и магнитных характеристик [20].

Таким образом, целью настоящего исследования является установление распределения параметров магнитных шумов Баркгаузена, микромеханических характеристик и уровня остаточных напряжений в сварных соединениях биметаллических труб, полученных ротационной сваркой трением.

2. Материал и методика

В качестве объекта исследования была выбрана биметаллическая труба. Основа трубы выполнена из конструкционной стали 32Г2С, обеспечивающей необходимый уровень прочностных характеристик, а плакирование осуществлялось коррозионностойкой сталью 08Х18Н10Т с целью обеспечить повышенную стойкость в кислой среде. Биметаллическая труба изготавливалась путем лейнирования. Более подробное описание методики получения трубы приведено в статье [20]. Для определения химического состава исследуемых материа-

лов использовался эмиссионный оптический спектрометр SPECTROMAXx. Химический состав исследуемых сталей приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав исследуемых сталей, масс. %

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

Одной из наиболее перспективных технологий соединения подобных разнородных материалов является ротационная сварка трением (РСТ). Это процесс соединения металлов в твердой фазе, позволяющий получать соединения с минимальными дефектами, исключая введение дополнительного материала электрода, а также образование хрупких интерметаллических фаз, характерных для традиционных дуговых методов сварки [21, 22]. Сварка трубных заготовок осуществлялась в АО «Завод бурового оборудования» на автоматизированной машине для сварки трением Thompson-60 производства Великобритании (компания Thompson Friction Welding). Была выполнена ротационная сварка биметаллической трубы трением по различным режимам. Параметры РСТ для обоих режимов представлены в табл. 2. Параметры процесса РСТ, которые использовались при первом режиме, рекомендованы для группы среднеуглеродистых сталей производителем сварочного оборудования Thompson-60. Однако результаты исследования микроструктуры и механических свойств образцов, сваренных по первому режиму, оказались неудовлетворительными [20]. Были составлены рекомендации по оптимизации параметров сварки, а именно: увеличение давления притирки почти в 2 раза, уменьшение давления проковки в 1,2 раза, уменьшение частоты вращения при разогреве на 200 об/мин, а также произвели изменение геометрии кромок свариваемой трубы (рис. 1). Предполагается, что данные изменения способствуют лучшему начальному контактированию материалов для повышения качества сварного соединения.

Таблица 2

Параметры режимов РСТ

Параметры РСТ	1-й режим	2-й режим
Давление притирки	50 кН	90 кН
Давление проковки	210 кН	180 кН
Частота вращения при разогреве	800 об/мин	600 об/мин

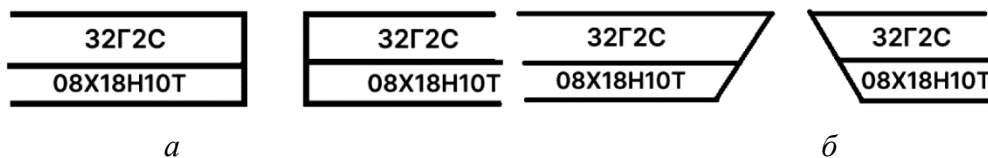


Рис. 1. Разделка кромок под 90° при 1-м режиме РСТ (а) и под 45° при 2-м режиме (б)

Исследования макроструктуры полученных сварных соединений проводились с использованием оптического микроскопа Neophot-21 при небольших увеличениях. Из сварных соединений изготавливались продольные образцы для металлографического анализа со сварным швом по центру (рис. 2).

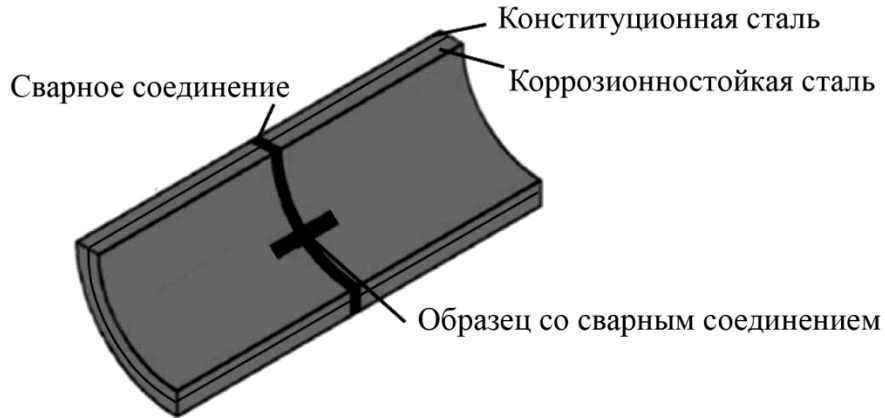


Рис. 2. Схема вырезки образцов со сварным соединением

Кинетическое микроиндентирование с записью диаграммы нагружения проводили на измерительной системе Fischerscope HM2000 XYm с использованием индентора Виккерса и программного обеспечения WIN-HCU при максимальной нагрузке 0,245 Н, времени нагружения 5 с, выдержке при нагрузке 20 с и времени разгрузки 5 с. Согласно стандарту ISO 14577 [23] определяли твердость по Мартенсу НМ, в которой учитывается, наряду с пластической, также и упругая деформация. Рассчитывалось также отношение пластичности $\delta_A = W_r/W_t$, где W_r – работа остаточного формоизменения, W_t – общая механическая работа вдавливания. Данный параметр характеризует способность материала восстанавливаться после нагрузки, то есть его локальную пластичность. Измерения проводили на поверхности трубы со стороны конструкционной стали. Вблизи зоны соединения шаг составлял 1 мм, по мере удаления от сварного соединения, включая линию контакта и зону термомеханического влияния, шаг увеличивался до 5 мм.

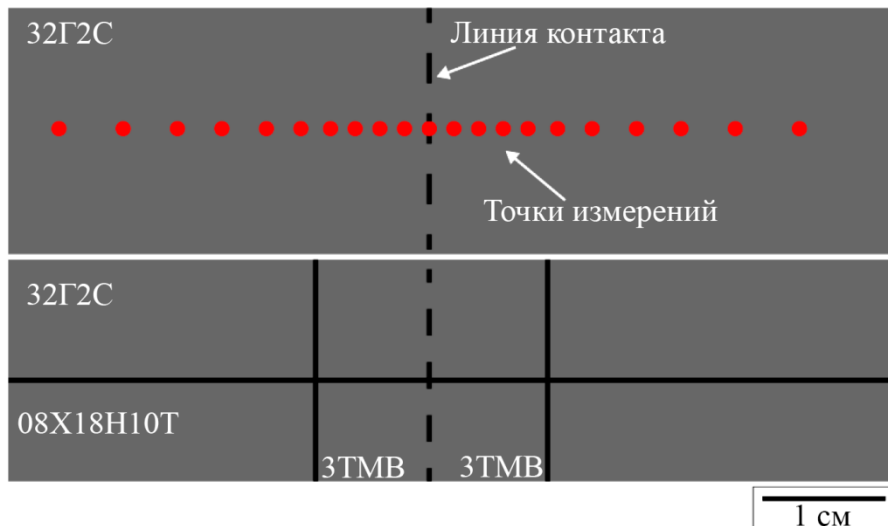


Рис. 3. Схема образца с расположением точек для измерения параметров МШБ и остаточных напряжений

С применением анализатора магнитных шумов Баркгаузена Microscan 600 определяли параметры МШБ, а именно амплитуду среднеквадратичного значения напряжения МШБ (RMS) и число скачков Баркгаузена (N) при частоте перемагничивания 95 Гц в пакете из 10 циклов. Частота перемагничивания была выбрана по максимальному отношению сиг-

нал/шум. При измерении параметров МШБ образец намагничивали вдоль длинной оси, используя преобразователь анализатора. 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 краям образцов со стороны конструкционной стали (рис. 3). 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 %.

Рентгеноструктурный анализ образцов проводили с помощью дифрактометра Shimadzu XRD 7000 с использованием монохроматизированного хромового K_{α} -излучения. Макронапряжения определяли методом $\sin^2\psi$ по линии (211) α -фазы [24]. Толщина слоя, дающего 90 % интенсивности этого рентгеновского рефлекса, составляла примерно 15 мкм. Измерения на образцах проводили в тех же точках, что и измерение параметров МШБ (рис. 3).

3. Результаты и обсуждение

Внешний вид полученных сварных труб представлен на рис 4. При РСТ в результате осевого усилия пластифицированный металл вытеснялся из стыка, образуя грат. Дальнейшие измерения параметров МШБ, микромеханических характеристик и остаточных напряжений проводили с внешней стороны трубных заготовок, т. е. со стороны конструкционной стали. Для удобства проведения исследований с образцов сняли грат и получили прямоугольные образцы. Измерения только с одной стороны обусловлены тем, что в реальных условиях эксплуатации доступ к трубам данной геометрии возможен только с внешней стороны, т. е. со стороны конструкционной стали. Таким образом, выбранные методики исследования отражают реальные эксплуатационные условия и позволяют оценивать однородность структуры, ширину сварного соединения и изменение физико-механических свойств материала в зоне сварного соединения при одностороннем доступе.



Рис. 4. Внешний вид биметаллической трубы после РСТ, реализованной по 1-му режиму (а) и 2-му режиму (б)

Панорамное изображение микроструктуры сварного соединения и его схематическое представление приведены на рис. 5. Видно, что в структуре сварного соединения, полученного по первому режиму РСТ, происходит взаимное «затекание» как коррозионностойкой стали в зону конструкционной, так и наоборот. Это обусловлено повышением текучести привариваемого материала вследствие локального разогрева в процессе сварки. Образование подобных взаимных участков влияет на снижение прочности сварного соединения. При реализации сварки по второму режиму с оптимизированными параметрами удалось ликвидировать взаимное «затекание» металла. В данном случае зафиксировано «затекание» только

коррозионностойкой стали в зону конструкционной стали, что указывает на более контролируемый процесс деформации в зоне соединения.

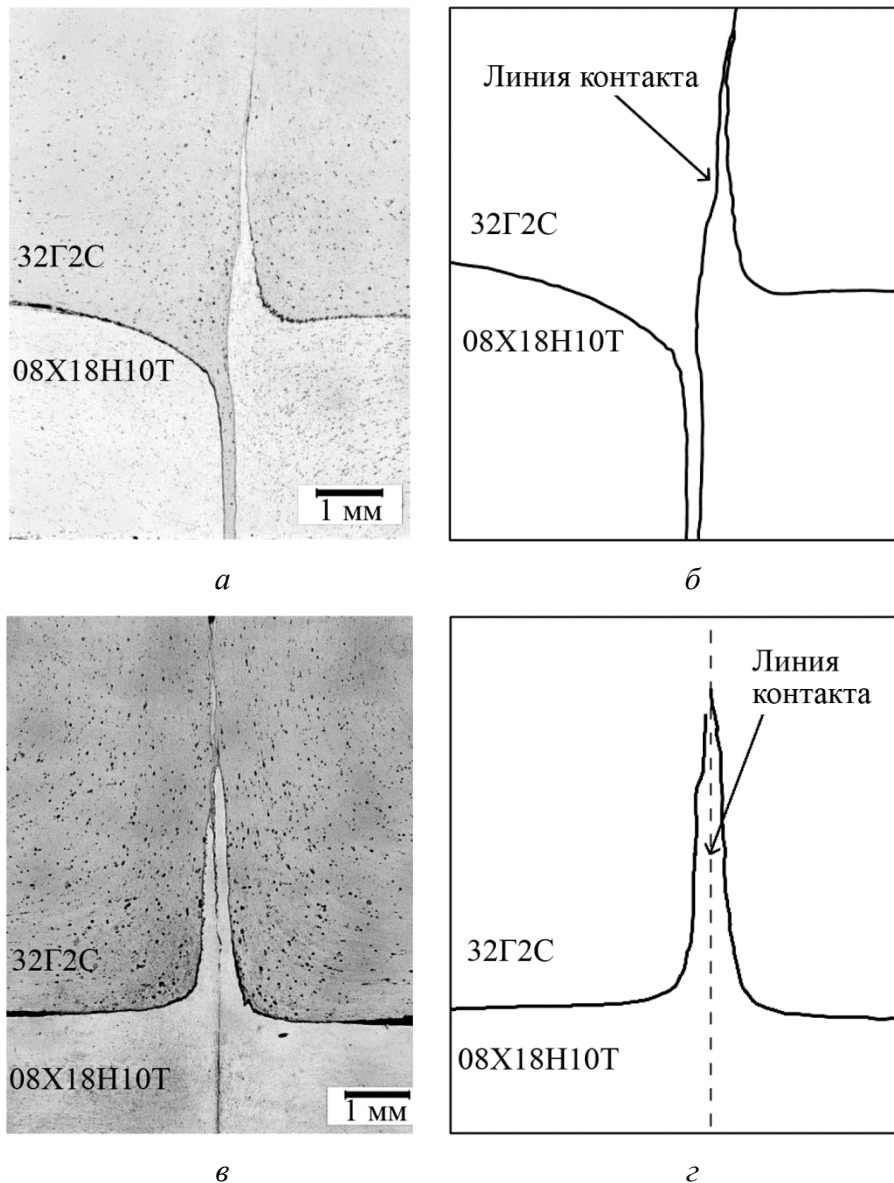


Рис. 5. Панорамное изображение микроструктуры сварного соединения (а, в) и его схематическое представление (б, г) после 1-го режима сварки (а, б) и после 2-го режима (в, г)

Результаты измерений микромеханических характеристик сварного соединения со стороны конструкционной стали выявили зоны с различными механическими свойствами (рис. 6). В зоне основного металла, которая не подверглась термомеханическим воздействиям во время сварки, зафиксированы стабильные значения микромеханических характеристик: $НМ = 3,5$ ГПа, $\delta_A \approx 0,86$ для 1-го режима сварки; $НМ = 2,5$ ГПа, $\delta_A \approx 0,88$ для 2-го режима. При переходе к зоне термомеханического влияния (ЗТМВ) (по 15–17 мм в каждую сторону от линии контакта) наблюдается значительный градиент свойств. Видно, что в центре сварного соединения (вблизи линии контакта) значения твердости по Мартенсу $НМ$ максимальны, что связано с образованием закалочной микроструктуры в результате воздействия температур и деформаций во время сварочного процесса. Помимо этого, значительный вклад

в упрочнение вносит формирование сильно деформированной структуры, что было показано в предыдущем исследовании [20], где на картах рекристаллизации данная зона характеризовалась преобладанием деформированных зерен, что свидетельствует о высокой плотности дислокаций. Пластичность, характеризующаяся параметром δ_A , снижается в центре шва, что возможно усиливает склонность данного участка к трещинообразованию. Для образца, полученного по второму режиму сварки, наблюдается тенденция к повышению этого показателя, а значит, и средней пластичности сварного соединения в целом, что положительным образом будет влиять на сварное изделие в целом.

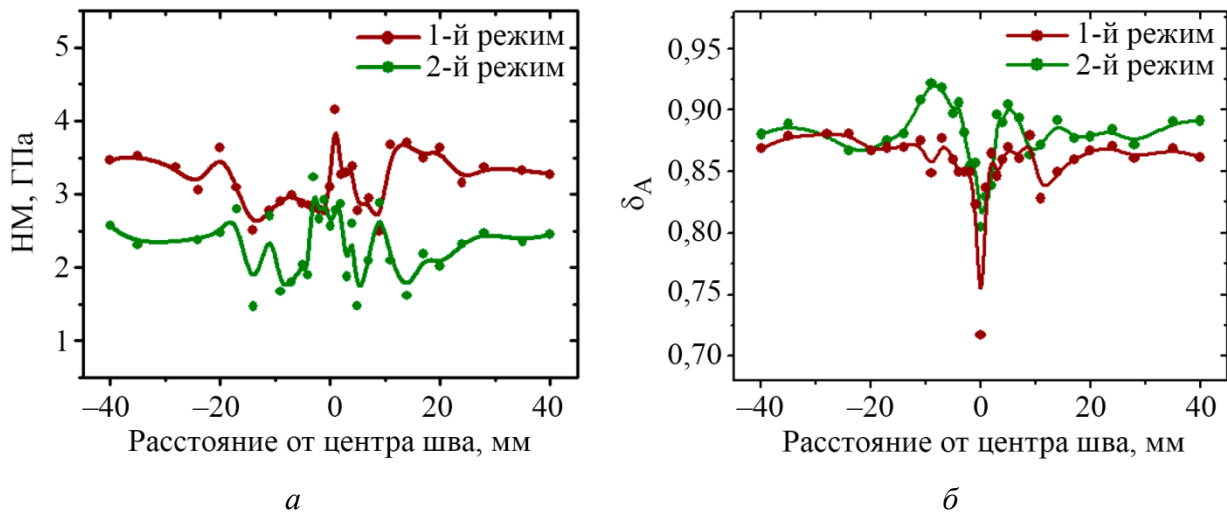


Рис. 6. Распределение твердости по Мартенсу НМ (а), показателя пластичности δ_A (б) поперек сварного соединения

На рис. 7 показано распределение параметров магнитных шумов Баркгаузена (амплитуда среднеквадратичных значений напряжения RMS и число скачков N) по ширине сварного соединения со стороны конструкционной стали. В центре зоны сварного соединения (на линии контакта), где зафиксированы максимальные значения НМ, значения RMS минимальны. Высокая плотность дислокаций и границ зерен в ЗТМВ ввиду образования мартенситной и сильно дефектной структуры создают энергетические барьеры для перемещения магнитных доменных стенок. Это приводит к их закреплению, то есть происходит подавление амплитуды сигнала МШБ. Поскольку препятствий больше, доменные стенки совершают больше скачков при перемагничивании, что приводит к росту числа скачков МШБ (рис. 7 б) [18]. В основном металле значения параметров МШБ становятся более равномерными. Это связано с преобладанием равноосной зеренной структуры, которая создает более однородное магнитное поле и облегчает движение доменных стенок по сравнению с зоной сварного шва и ЗТМВ.

Так же видно, что после второго режима сварки распределение параметров МШБ стало более равномерным, ширина зоны интенсивного изменения значений уменьшилась. Это указывает на формирование более структурно однородного, менее широкого и качественного сварного соединения. В более ранних работах уже было показано, что данные магнитные параметры можно использовать для оценки изменения ширины шва сварных соединений [18, 25]. Различия по абсолютным значениям параметров МШБ для основного металла, ЗТМВ и зоны сварного соединения позволяют использовать эти параметры для оценки формируемой микроструктуры, а в дальнейшем, следовательно, и свойств в процессе сварки по зонам.

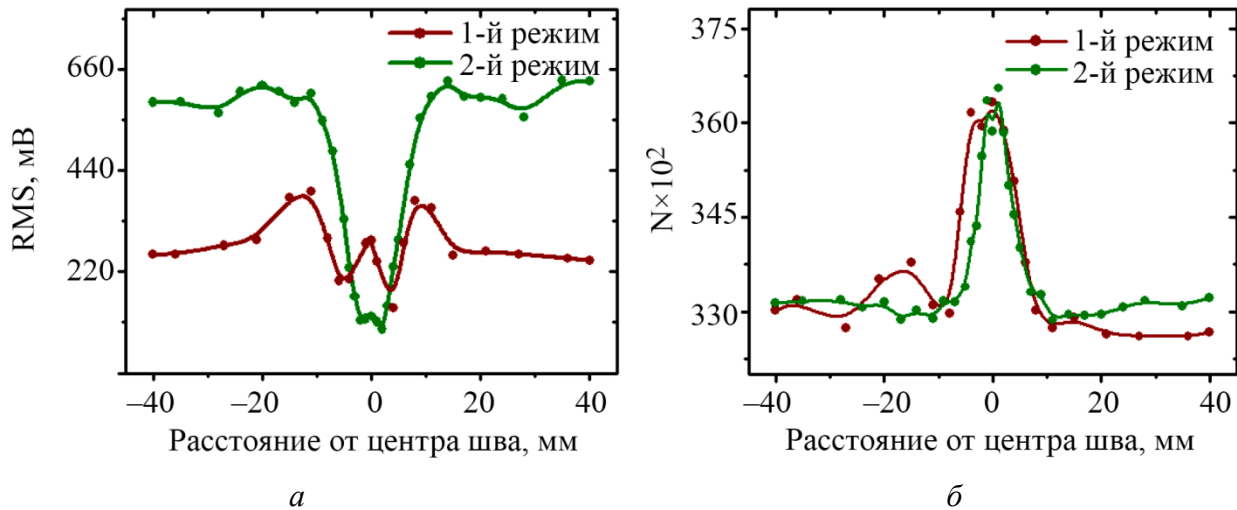


Рис. 7. Распределение среднеквадратичных значений напряжения RMS (*a*) и числа скачков *N* (*б*) по длине образцов со сварным соединением

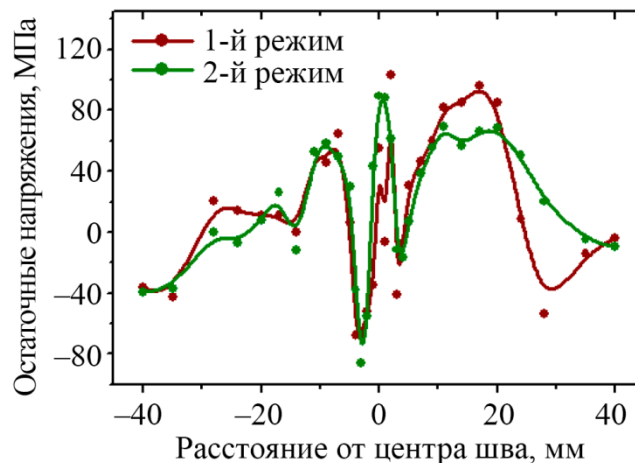


Рис. 8. Распределение остаточных напряжений по ширине сварных соединений

Распределение остаточных напряжений по зонам сварного соединения имеет неоднородный характер. Вблизи линии контакта (до 1 мм), в области действия максимальных термомеханических воздействий, формируются наибольшие по модулю растягивающие остаточные напряжения. Их возникновение обусловлено интенсивным деформированием и нагревом в процессе сварки, в результате чего происходит увеличение плотности дефектов, образование мартенситной структуры, обладающей большим удельным объемом [26]. В данном случае образуется область соединения с более высокой твердостью, хрупкостью и пониженной пластичностью. Участки зоны сварного соединения на расстоянии до 4–5 мм испытывают сжимающие напряжения. Возникновение остаточных напряжений в сварных соединениях связано с действием внешних сжимающих сил при ротационной сварке трением и протекающим мартенситным превращением [26]. Кривые остаточных напряжений имеют идентичный характер изменения для образцов, сваренных по различным режимам, что говорит об одинаковых механизмах влияния сварки на этот параметр.

Установленные распределения магнитных и микромеханических свойств дополнительно подтверждаются характером изменения остаточных напряжений. Наличие в центре шва и в околосшовной зоне значительных остаточных напряжений, обусловленных образованием мартенсита, создает дополнительную (магнитоупругую) составляющую [25]. Эти внут-

ренние напряжения оказывают влияние на движение доменных стенок, что и фиксируется в изменении параметров МШБ. Таким образом, метод МШБ чувствителен не только к структурно-фазовому состоянию материала, но и к наличию остаточных напряжений при сварке, что делает его комплексным инструментом для оценки структурно-напряженного состояния сварного соединения.

4. Заключение

В ходе работы установлен характер распределения параметров магнитных шумов Баркгаузена, микромеханических характеристик и полей остаточных напряжений сварных соединений биметаллических труб, полученных ротационной сваркой трением. Показано, что распределение амплитуды среднеквадратичных значений напряжения и числа скачков магнитных шумов Баркгаузена по ширине сварного соединения отражает локальные изменения микротвердости и пластичности материала, а также формирование закалочной, сильно деформированной структуры на линии контакта и в зоне термомеханического влияния.

Снижение амплитуды среднеквадратичных значений напряжения и увеличение числа скачков магнитных шумов Баркгаузена в зоне сварного соединения указывает на более жесткую магнитную структуру, обусловленную высокой плотностью дефектов и значительными остаточными напряжениями после термических и деформационных воздействий при сварке. Этот же участок характеризуется высокими значениями микротвердости и меньшей пластичностью, что показывает связь между механическим упрочнением и изменением магнитных свойств материала.

Установлено, что результаты распределения параметров магнитных шумов Баркгаузена позволяют идентифицировать зону термомеханического влияния и оценить ее ширину для различных режимов сварки, а также могут служить эффективными индикаторами микромеханического состояния материала и величины остаточных напряжений. Перспективы применения метода магнитных шумов Баркгаузена дают возможность проведения дальнейших исследований и разработки неразрушающей методики оценки качества сварного соединения биметаллических труб, формируемого ротационной сваркой трением.

Благодарность

Работа выполнена в рамках госзадания ИМАШ УрО РАН № 12407500003-6 с использованием оборудования ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН.

Литература

1. Research status on double-metal composite pipe at home and abroad / C. Wang, Z. Y. Bi, W. P. Zhang, Y. B. Yang, C. C. Han // *Welded Pipe and Tube*. – 2015. – Vol. 38 (12). – P. 7–12.
2. Spence M. A., Roscoe C. V. Bi-metal CRA-lined pipe employed for North Sea field development // *Oil and Gas Journal*. – 1999. – Vol. 97. – P. 80–88.
3. A review of development and application of out-of-pipe detection technology without removing cladding / X. Wang, L. Yang, T. Sun, G. Rasool, M. Sun, N. Hu, Z. Guo // *Measurement*. – 2023. – Vol. 219. – P. 113249. – DOI: 10.1016/j.measurement.2023.113249.
4. Smith L. *Engineering with Clad Steel*. – Nickel Institute Technical Series No 10 064.
5. Diagnostics and safety of aging large mechanical systems operating under conditions of the Far North: the problem and ways to solve it / O. I. Sleptsov, A. V. Lyglav, A. M. Bolshakov, S. A. Sintsov // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2008. – Vol. 44. – P. 395–402. – DOI: 10.1134/S1061830908060053.
6. Сыромятникова А. С. Эксплуатационная деградация металла труб магистральных газопроводов Севера – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2017. – 95 с.

7. Evolution of the structure and mechanism of the formation of welded joints of medium-carbon steels upon rotary friction welding / E. Yu. Priymak, I. L. Yakovleva, N. A. Tereshchenko, A. V. Stepanchukova, A. N. Morozova // *The Physics of Metals and Metallography*. – 2019. – Vol. 120. – P. 1091–1096. – DOI: 10.1134/S0031918X19110127.
8. Пояркова Е. В., Кузеев И. П. К вопросу о решении проблемы повышения надежности оборудования нефтегазовой отрасли на основании контроля качества сварных соединений // *Нефтегазовое дело*. – 2008. – Т. 6 (1). – С. 239–244.
9. Saraev Yu. N., Bezborodov V. P., Putilova E. A. Effect of heat input pulse on the structure and properties of welded joints of steels ferritic-pearlitic class, operating under low-frequency temperature-force loading // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2015. – Vol. 91. – 012014. – DOI: 10.1088/1757-899X/91/1/012014.
10. Investigation of magnetic signatures and microstructures for heat-treated ferritic/martensitic HT-9 alloy / C. H. Henager Jr., J. S. McCloy, P. Ramuhalli, D. J. Edwards, S. Hu, Y. Li // *Acta Materialia*. – 2013. – Vol. 61 (9). – P. 3285–3296. – DOI: 10.1016/j.actamat.2013.02.017.
11. Effect of tensile elastic deformations on magnetic properties of preliminarily deformed structural steel operating under pressure / E. A. Putilova, A. N. Mushnikov, S. M. Zadvorkin, K. D. Kryucheva // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2022. – Vol. 64. – P. 410–414. – DOI: 10.1007/s11041-022-00822-w.
12. Comparison of x-ray analysis and EBSD analysis methods for residual stresses estimation in welded pipes made of 13CrVA steel / S. M. Zadvorkin, E. S. Gorkunov, L. S. Goruleva, E. A. Putilova, A. N. Maltseva // *AIP Conference Proceedings*. – 2019. – Vol. 2167 (1). – 020397. – DOI: 10.1063/1.5132264.
13. Vértesy G., Mészáros I., Tomáš I. Nondestructive magnetic characterization of TRIP steels // *NDT & E International*. – 2013. – Vol. 54. – P. 107–114. – DOI: 10.1016/j.ndteint.2012.12.008.
14. Investigation of magnetic response to plastic deformation of low-carbon steel / O. Stupakov, J. Pal'a, I. Tomáš, J. Bydžovský, V. Novák // *Materials Science and Engineering: A*. – 2007. – Vol. 462 (1–2). – P. 351–354. – DOI: 10.1016/j.msea.2006.02.475.
15. Relation between magnetic Barkhausen noise and hardness for Jominy quench tests in SAE 4140 and 6150 steels / F. A. Franco, M. F. R. González, M. F. de Campos, L. R. Padovese // *Journal of Nondestructive Evaluation*. – 2013. – Vol. 32. – P. 93–103. – DOI: 10.1007/s10921-012-0162-8.
16. Imaging x70 weld cross-section using electromagnetic testing / H. Xu, J. R. S. Avila, F. Wu, M. J. Roy, Y. Xie, F. Zhou, A. Peyton, W. Yin // *NDT & E International*. – 2018. – Vol. 98. – P. 155–160. – DOI: 10.1016/j.ndteint.2018.05.006.
17. An accurate evaluation of the residual stress of welded electrical steels with magnetic Barkhausen noise / P. Vourna, A. Ktena, P. E. Tsakiridis, E. Hristoforou // *Measurement*. – 2015. – Vol. 71. – P. 31–45. – DOI: 10.1016/j.measurement.2015.04.007.
18. Determination of the magnetic properties of separate zones of welds and the width of welded joints based on magnetic measurements / E. S. Gorkunov, A. M. Povolotskaya, E. A. Tueva, L. S. Goruleva, S. M. Zadvorkin // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2011. – Vol. 47. – P. 577–586. – DOI: 10.1134/S1061830911090038.
19. Page T. F., Hainsworth S. V. Using nanoindentation techniques for the characterization of coated systems: a critique // *Surface and Coatings Technology*. – 1993. – Vol. 61 (1–3). – P. 201–208.
20. Microstructure, physical-mechanical, and magnetic characteristics of a butt-welded joint obtained by rotary friction welding technology of bimetallic pipe / E. Putilova, K. Kryucheva, I. Kamantsev, E. Priymak // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. – 2024. – Vol. 8 (6). – P. 271–283. – DOI: 10.3390/jmmp8060271.
21. Mahmoud B. M. M. Effects of Thermal and Mechanical Treatments on the Fatigue Performance of Friction Welded Joints : Doctoral Thesis (Dissertation). – Cairo, Egypt, 2018. – 179 p.

22. Rombaut P. Joining of Dissimilar Through Rotary Friction Welding : Master Thesis. – Gent, 2011. – 112 p.
23. ГОСТ Р 8.748-2011.
24. Русаков А. А. Рентгенография металлов. – М. : Атомиздат, 1977. – 480 с.
25. 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. – URL: http://dream-journal.org/issues/2015-1/2015-1_19.html
26. Взаимосвязь микроструктуры и ударной вязкости зоны сопряжения сварных соединений сталей 32ХГМА и 40ХН2МА, полученных ротационной сваркой трением / Е. Ю. Приймак, А. С. Атамашкин, И. Л. Яковлева, А. П. Фот // *Frontier Materials & Technologies*. – 2025. – № 2. – С. 73–85. – DOI: 10.18323/2782-4039-2025-2-72-6.