

Received: 23.09.2025

Revised: 04.12.2025



Accepted: 12.12.2025



DOI: 10.17804/2410-9908.2025.6.050-067



MECHANICAL PROPERTIES OF A COPPER–STEEL BIMETAL PRODUCED BY EXPLOSION WELDING IN THE TEMPERATURE RANGE BETWEEN -70 AND $+70$ °C

I. A. Veretennikova^a*, D. I. Vichuzhanin^b, and S. V. Smirnov^c

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

^a  <https://orcid.org/0000-0002-8371-7546>  stpxia@gmail.com;

^b  <https://orcid.org/0000-0002-6508-6859>  mmm@imach.uran.ru;

^c  <https://orcid.org/0000-0002-2083-5377>  svs@imach.uran.ru

*Corresponding author. Email: stpxia@gmail.com

Address for correspondence: ul. Komsomolskaya, 34, Ekaterinburg, 620049, Russia

Tel.: +7 (343) 375-3576; fax: +7 (343) 374-5330

The paper studies the mechanical properties of an explosion-welded bimetal consisting of M1 copper and 09G2S steel layers in uniaxial tensile testing at temperatures ranging between -70 to $+70$ °C. Besides, similar characteristics of each individual metal in the same temperature range are compared with the characteristics of the bimetal. In the temperature range under study, the offset yield strength and ultimate tensile strength of the bimetal are lower than the similar characteristics of the 09G2S steel, but they significantly exceed the values for copper M1. The elongation of the bimetal is lower than that of the constituent metals, while the contraction ratio for all the specimens is approximately at the same level. It is found that, in the bimetal, explosion welding results in the appearance of a zone at the weld boundary that differs in the mechanical properties from the constituents and significantly affects the mechanical properties of the bimetal as a whole. The set of mechanical properties obtained in uniaxial tensile tests for the bimetal made of M1 copper and 09G2S steel shows the possibility of using this bimetal as a structural material at temperatures ranging between -70 and $+70$ °C.

Keywords: bimetal made of M1 copper and 09G2S steel, explosion welding, weld, uniaxial tension, temperature tests, mechanical properties, mixture rule

Acknowledgment

The work was performed under the state assignment No. 124020700063-3 for the IES UB RAS. The equipment of the Plastometriya shared research facilities, IES UB RAS, was used for the research. We appreciate the assistance of Nikolai S. Michurov in the fractographic examination by means of a Tescan Vega II XMU scanning electron microscope.

References

1. Potapov, I.N., Lebedev, V.N., Kobelev, A.G., Kuznetsov, E.V., Bykov, A.A., and Klyuchnikov, P.M. *Sloistye metallicheskie kompozitsii* [Layered Metal Compositions]. Metallurgiya Publ., Moscow, 1986, 216 p. (In Russian).
2. Arisova, V.N., Gurevich, L.M., Golikova, A.P., and Semenova, V.S. Investigation welded copper-steel bimetal after bending. *Izvestiya VolgGTU*, 2023, 10 (281), 6–11. DOI: 10.35211/1990-5297-2023-10-281-6-11. (In Russian).

3. Shan, S., Liu, Y., Zhang, J., Fan, X., and Jiao, K. Explosion welding research on large-size ultra-thick copper-steel composites: a review. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 24, 4130–4142. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.04.087.
4. Song, X., Yang, Y., Cheng, Y., Wang, Y., and Zheng, H. Study on copper-stainless steel explosive welding for nuclear fusion by generalized interpolated material point method and experiments. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2024, 160, 160–172. DOI: 10.1016/j.enganabound.2024.01.003.
5. Vahedi Nemani, A., Ghaffari, M., Sabet Bokati, K., Valizade, N., Afshari, E., and Nasiri, A. Advancements in additive manufacturing for copper-based alloys and composites: a comprehensive review. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2024, 8 (2), 54. DOI: 10.3390/jmmp8020054.
6. Shen, Z., Chen, Y., Haghshenas, M., Nguyen, T., Galloway, J., and Gerlich, A.P. Interfacial microstructure and properties of copper clad steel produced using friction stir welding versus gas metal arc welding. *Materials Characterization*, 2015, 104, 1–9. DOI: 10.1016/j.matchar.2015.02.022.
7. Huang, R., Huang, X., Wang, D., and Yang, L. Effect of swing-spiral-trajectory on pulsed fiber laser welding stainless steel/copper dissimilar metals. *Optics & Laser Technology*, 2022, 156, 108516. DOI: 10.1016/j.optlastec.2022.108516.
8. Zainelabdeen, I.H., Ismail, L., Mohamed, O.F., Khan, K.A., and Schiffer, A. Recent advancements in hybrid additive manufacturing of similar and dissimilar metals via laser powder bed fusion. *Materials Science and Engineering: A*, 2024, 909, 146833. DOI: 10.1016/j.msea.2024.146833.
9. Yongqiang, Y., Menglong, J., and Cheng, D. Research progress of copper-steel functional materials prepared by additive manufacturing. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2023, 66 (4), 14–24.
10. Guo, S., Zhou, Q., Kon, J., Peng, Y., Xiang, Y., Luo, T.Y., Wang, K.H., and Zhu, J. Effect of beam offset on the characteristics of copper/304stainless steel electron beam welding. *Vacuum*, 2016, 128, 205–212. DOI: 10.1016/j.vacuum.2016.03.034.
11. Chu, Q., Li, Y., Cao, Q., Zhang, M., Zhao, P., Yan, F., Luo, H., Wang, X., and Yan, C. Microstructure and mechanical properties of Cu/steel dissimilar joints. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2022, 200, 104828. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2022.104828.
12. Arisova, V.N., Trudov, A.F., Gurevich, L.M., Kharlamov, V.O., and Nazarova, V.Yu. Structure transformation in the zone of bimetal copper + steel 30CrMnSiA after explosion welding and following annealing. *Izvestiya VolgGTU*, 2021, 4 (251), 13–18. (In Russian). DOI: 10.35211/1990-5297-2021-4-251-13-18.
13. Zafari, A. and Xia, K. Nano/ultrafine grained immiscible Fe-Cu alloy with ultrahigh strength produced by selective laser melting. *Materials Research Letters*, 2021, 9 (6), 247–254. DOI: 10.1080/21663831.2021.1884620.
14. Arisova, V.N., Bogdanov, A.I., Gurevich, L.M., Semenova, V.S., and Golikova, A.P. X-ray studies of explosion-welded copper-steel bimetal after thermal impacts. *Izvestiya VolgGTU*, 2024, 10 (293), 19–24. (In Russian). DOI: 10.35211/1990-5297-2024-10-293-19-24.
15. Zykova, A., Chumaevskii, A., Vorontsov, A., Kalashnikov, K., Gurianov, D., Gusarova, A., and Kolubaev, E. Evolution of microstructure and properties of Fe-Cu, manufactured by electron beam additive manufacturing with subsequent friction stir processing. *Materials Letters*, 2022, 307, 131023. DOI: 10.1016/j.matlet.2021.131023.
16. Ogolikhin, V.M. and Yakovlev, I.V. *Svarka vzryvom v elektrometallurgii* [Explosion Welding in Electrometallurgy]. SB RAS Publ., Novosibirsk, 2009, 160 p. (In Russian).
17. Durgutlu, A., Gülenç, B., and Findik, F. Examination of copper/stainless steel joints formed by explosive welding. *Materials and Design*, 2005, 26, 497–507. DOI: 10.1016/j.matdes.2004.07.021.

18. Loureiro, A., Carvalho, G.H.S.F.L., Galvão, I., Leal, R.M., and Mendes, R. Explosive welding. In: *Advanced Joining Processes*, Elsevier, 2021, ch. 6, pp. 207–237. DOI: 10.1016/B978-0-12-820787-1.00006-1.
19. Sherpa, B.B. and Rani, R. Advancements in explosive welding process for bimetallic material joining: a review. *Journal of Alloys and Metallurgical Systems*, 2024, 6, 100078. DOI: 10.1016/j.jalmes.2024.100078.
20. Findik, F. Recent developments in explosive welding. *Materials and Design*, 2011, 32 (11), 1081–1093. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.10.017.
21. Mori, A., Bataev, I., Wada, N., and Hokamoto, K. Explosive welding. In: Hokamoto, K., ed., *Explosion, Shock-wave and High-strain-rate Phenomena of Advanced Materials Multiphysics: Advances and Applications*, Academic Press, 2021, ch. 3, pp. 35–70. DOI: 10.1016/B978-0-12-821665-1.00002-X.
22. Wang, Y., Li, X., Wang, X., and Yan, H. Fabrication of a thick copper-stainless steel clad plate for nuclear fusion equipment by explosive welding. *Fusion Engineering and Design*. 2018, 137, 91–96. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2018.08.017.
23. Barannikova, S.A. and Li, Y.V. Features of deformation of a bimetallic plate. *Vestnik PNIPU*, 2024, 3, 57–64. (In Russian). DOI: 10.15593/perm.mech/2024.3.04.
24. Veretennikova, I.A., Vichuzhanin, D.I., Michurov, N.S., and Smirnov, S.V. Mechanical properties and fracture behavior of the “copper M1-steel 09G2S” bimetal produced by explosion welding. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2016, 6, 28–38. DOI: 10.17804/2410-9908.2016.6.028-038. Available at: http://dream-journal.org/issues/2016-6/2016-6_111.html
25. Lysak, V.I. and Kuzmin, S.V. *Svarka vzryvom* [Explosive Welding]. Mashinostroenie Publ., Moscow, 2005, 543 p. (In Russian).
26. Greenberg, B.A., Ivanov, M.A., Rybin, V.V., Kuzmin, S.V., Lysak, V.I., Elkina, O.A., Patselov, A.M., Antonova, O.V., Inozemtsev, A.V., Volkova, A.Yu., and Plotnikov, A.V. Dissipative structures during explosive welding. *Izvestiya VolgGTU*, 2012, 14 (101), 27–43. (In Russian).
27. Zhang, H., Jiao, K.X., Zhang, J.L., and Liu, J. Experimental and numerical investigations of interface characteristics of copper/steel composite prepared by explosive welding. *Materials and Design*, 2018, 154, 140–152. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.05.027.
28. Khaustov, S.V., Kuzmin, S.V., Lysak, V.I., and Pai, V.V. Thermal processes in explosive welding. Thermal processes in explosive welding. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2014, 50, 732–738. DOI: 10.1134/S0010508214060161.
29. Gladkovsky, S.V., Kuteneva, S.V., and Sergeev, S.N. Microstructure and mechanical properties of sandwich copper/steel composites produced by explosive welding. *Materials Characterization*, 2019, 154, 294–303. DOI: 10.1016/j.matchar.2019.06.008.
30. Zhang, B., Ma, H., Xu, J., Li, L., Shen, Z., Ding, L., and Tian, J. Investigations on the microstructure evolution and mechanical properties of explosive welded ODS-Cu/316 L stainless steel composite. *Fusion Engineering and Design*, 2022, 179, 113142. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2022.113142.
31. Feng, R., Zhao, W., Gan, K., Feng, M., Li, Z., Pan, Y., Sun, Z., and Li, J. Investigation of interface microstructure and properties of copper/304 stainless steel fabricated by explosive welding. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 18, 2343–2353. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.03.142.
32. Zhang, H., Jiao, K.X., Zhang, J.L., and Liu, J. Microstructure and mechanical properties investigations of copper-steel composite fabricated by explosive welding. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 731, 278–287. DOI: 10.1016/j.msea.2018.06.051.

33. Smirnov, S.V. and Veretennikova, I.A. Anisotropy of the mechanical properties of a “08Cr18Ni10Ti steel-St10 steel” bimetal strip produced by explosion welding. *Proizvodstvo Prokata*, 2017, 1, 30–36. (In Russian).
34. Veretennikova, I.A., Kononov, D.A., and Smirnov, S.V. Patterns of the change in the mechanical properties of a bimetallic welded joint under plastic deformation. *AIP Conf. Proc.*, 2016, 1785, 040089. DOI: 10.1063/1.4967146.
35. Zolotarevsky, V.S. *Mekhanicheskie svoystva metallov* [Mechanical Properties of Metals]. MISIS Publ., Moscow, 1998, 400 p. (In Russian).
36. Feng, B., Feng, X., Yan, C., Xin, Y., Wang, H., Wang, J., and Zheng, K. On the rule of mixtures for bimetal composites without bonding. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2020, 8 (4), 1253–1261. DOI: 10.1016/j.jma.2019.11.016.
37. Mikulskij, V.G., ed. *Stroitelnye materialy* [Construction Materials (Materials Science and Technology): Textbook]. ASV Publ., Moscow, 2002, 531 p. (In Russian).
38. Shayanpoor, A.A. and Rezaei Ashtiani, H.R. Constitutive model for hot deformation behaviors of Al/Cu bimetal composites based on their components. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2023, 33 (12), 3641–3660. DOI: 10.1016/S1003-6326(23)66360-5.
39. Taherzadeh-Fard, A., Jiménez, S., Cornejo, A., Oñate, E., and Barbu, L.G. Fatigue delamination damage analysis in composite materials through a rule of mixtures approach. *Composite Structures*, 2025, 351, 118613. DOI: 10.1016/j.compstruct.2024.118613.

Подана в журнал: 23.09.2025



УДК 620.172



DOI: 10.17804/2410-9908.2025.6.050-067



МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУЧЕННОГО СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ МЕДНО-СТАЛЬНОГО БИМЕТАЛЛА В ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР ОТ -70 ДО $+70$ °С

И. А. Веретенникова^а*, Д. И. Вичужанин^б, С. В. Смирнов^в

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

^а  <https://orcid.org/0000-0002-8371-7546>  stpxia@gmail.com;

^б  <https://orcid.org/0000-0002-6508-6859>  mmm@imach.uran.ru;

^в  <https://orcid.org/0000-0002-2083-5377>  svs@imach.uran.ru

*Ответственный автор. Электронная почта: stpxia@gmail.com

Адрес для переписки: ул. Комсомольская, 34, Екатеринбург, 620049, Россия

Тел.: (343) 375-35-96; факс: (343) 374-53-30

В статье изучены механические свойства при испытаниях на одноосное растяжение в диапазоне температур от -70 до $+70$ °С полученного сваркой взрывом биметалла, состоящего из слоев меди М1 и стали марки 09Г2С. Также проведено сравнение аналогичных характеристик каждого металла отдельно в том же диапазоне температур с характеристиками биметалла. В рассматриваемом температурном интервале условный предел текучести и временное сопротивление разрыву биметалла оказываются ниже аналогичных характеристик стали 09Г2С, но заметно превосходят соответствующие величины для меди М1. Показатель относительного удлинения у биметалла ниже, чем у составляющих металлов, тогда как относительное сужение для всех образцов находится примерно на одном уровне. Установлено, что в биметалле в результате сварки взрывом в области сварной границы получена зона, отличающаяся по механическим свойствам от составляющих биметалла и существенно влияющая на механические свойства биметалла в целом. Полученный комплекс механических свойств в испытаниях на одноосное растяжение для биметалла «медь М1 – сталь 09Г2С» показывает возможность применения его в качестве конструкционного материала в диапазоне температур от -70 до $+70$ °С.

Ключевые слова: биметалл «медь М1 – сталь 09Г2С», сварка взрывом, сварной шов, одноосное растяжение, температурные испытания, механические свойства, правило смеси

1. Введение

Одной из современных тенденций в машиностроении является использование слоистых металлических материалов или биметаллов. Они применяются для экономии цветных металлов, а также для придания материалам новых свойств. Характерная черта биметаллов заключается в том, что основной слой (часто выполненный из более дешевого металла) обеспечивает необходимую механическую прочность, а поверхностный (плакирующий) слой (чаще всего изготовленный из более дорогого металла) – защиту от коррозии, износостойкость, жаропрочность и другие важные эксплуатационные характеристики [1]. Одним из перспективных видов биметаллов являются медно-стальные соединения, способные выдерживать воздействие высокого давления, механических нагрузок, экстремально низких либо повышенных температурных режимов [2]. В настоящее время медно-стальные биметаллы получают все большее распространение в энергетике, ракетно-космической и криогенной

технике, поскольку соединения меди со сталью позволяют не только создать рациональные сварные конструкции, но и обеспечить значительную экономию цветного металла [3–5]. В современном производстве подобные материалы могут быть получены разными методами: сваркой взрывом, пакетной прокаткой или прессованием заготовок, электродуговой наплавкой, сваркой трением с перемешиванием и другими [5–9]. Однако процесс соединения меди и стали сопряжен с рядом сложностей, вызванных различием физико-химических свойств. Медь характеризуется повышенной склонностью к взаимодействию с кислородом, низкой температурой плавления, интенсивным поглощением газов в расплавленном состоянии, а также существенным расхождением в значении коэффициента теплопроводности по сравнению со сталью и т. д. [6, 10–15].

В работах [3, 16, 17] показано, что сварка взрывом биметаллов «медь + сталь» приводит к образованию качественного сварного шва и является наиболее оптимальным методом соединения медно-стальных пластин большой площадью. Под воздействием высокого давления на границе возникает значительная локальная пластическая деформация, которая приводит к возникновению связи между соединяемыми материалами. В настоящее время в России и за рубежом проведено большое количество исследований, направленных на достижение требуемого качества сварных швов, оценке факторов, влияющих на свариваемость материалов [18, 19]. Накоплено большое количество информации о влиянии параметров сварки взрывом на получаемые свойства биметалла [3, 4, 20–22].

Конструкционный биметалл «медь + сталь» различной толщины и большой площадью соединения является перспективным материалом для химической аппаратуры благодаря сочетанию высокой коррозионной стойкости меди плакирующего слоя и прочности стальной основы, и в перспективе он может быть широко использован для производства резервуарных конструкций для хранения и перевозки различных агрессивных сред. В реальных условиях окружающей среды, в том числе условиях Крайнего Севера, резервуарные конструкции могут работать достаточно часто при температурах ниже $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. В соответствии с ГОСТ 15150-69 диапазон рабочих температур указанных изделий со всеклиматическим исполнением составляет от -60 до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Проектирование сооружений и деталей машин, работающих в этих условиях, требует особого внимания. В биметалле, полученном сваркой взрывом, имеется сварной шов, структура и свойства которого могут приводить к наличию неоднородностей различных видов вблизи границы соединения металлов и в объемах, прилегающих к ней, и, как следствие, во многих случаях процесс разрушения биметалла может начинаться со структурных неоднородностей и концентраторов напряжения в области контакта слоев двух разнородных металлов [23]. В связи с вышесказанным, актуальным является вопрос оценки механических свойств биметаллов в условиях температуры окружающей среды как в Российской Федерации, так и в других регионах мира. Цель настоящей работы заключается в изучении механических свойств биметаллического соединения «медь М1 – сталь 09Г2С», изготовленного методом сварки взрывом, путем сравнения его характеристик с характеристиками однослойных металлических материалов в широком интервале температур ($-70\dots+70\text{ }^{\circ}\text{C}$).

2. Материалы и методика исследования

Объектами исследований в работе были образцы из меди М1 и стали марки 09Г2С, а также биметалл, полученный сваркой взрывом из этих материалов.

Конструкционная низколегированная сталь марки 09Г2С используется для изготовления проката, предназначенного для сварных конструкций и элементов. Легирование осуществляется марганцем и кремнием, причем марганец улучшает такие характеристики, как прочность и пластичность, снижая одновременно порог вязко-хрупкого перехода («хладноломкость»), а кремний обеспечивает высокую ударную вязкость.

Медь марки М1 отличается высокими антикоррозионными свойствами, проявляющимися как в обычных условиях, так и в агрессивных средах. Она находит широкое применение в электронике и электротехнической промышленности, при изготовлении криогенных установок благодаря отсутствию эффекта хладноломкости и способности работать при низких температурах.

Сварка взрывом была выполнена предприятием «Уралтехнопроект» (Екатеринбург) согласно оптимальной производственной технологии. Толщины исходных листов из стали 09Г2С и меди М1 составляли 4 и 2 мм соответственно. После сварки взрывом общая толщина полученных биметаллов «медь М1 – сталь 09Г2С» составляет 5,75 мм (толщина слоя из стали 09Г2С составляла 3,9 мм, из меди М1 – 1,85 мм) [24].

Химический состав меди М1 и стали 09Г2С был получен с помощью спектрометра SPECTROMAXx и приведен в табл. 1 и 2 соответственно.

Таблица 1

Химический состав меди М1, содержание элементов в масс. %

Fe	Ni	S	As	Pb	Sb	Bi	Sn	Ag	Cu
0,002	0,0014	0,004	0,002	0,002	0,0012	0,001	0,002	0,002	99,9

Таблица 2

Химический состав стали 09Г2С, содержание элементов в масс. % (остальное железо)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
0,116	0,69	1,48	0,019	0,01	0,058	0,032	0,059

Изучение поверхностей разрушения и выявление локального химического состава на сварной границе биметалла выполнялись с использованием сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega II ХМУ.

Измерения микротвердости проводились с использованием специализированного комплекса NanoTriboindenter TI 950 с применением нагрузки в 500 мН и шагом индентирования 0,1 мм, что исключало воздействие соседних отпечатков на точность результатов измерений. Измерения выполнялись поперек образца вдоль трех отдельных линий от начала меди М1 до конца стали 09Г2С.

Испытания на одноосное растяжение образцов при температурах в диапазоне от -70 до $+70$ °С осуществлялись на испытательном оборудовании Instron-8801, снабженном температурным кабинетом. Скорость перемещения подвижного захвата машины составила 1 мм/мин. Температуру образца контролировали хромель-копелевой термопарой. Испытания на растяжение проводились в соответствии с ГОСТ 1497-2023, ГОСТ 9651-84 и ГОСТ 11150-84 в зависимости от температуры. Применялись прямоугольные плоские образцы с головками (тип I), размеры образцов для испытаний соответствовали ГОСТам. Испытания проводили на двух образцах на точку, что позволяет ГОСТ 1497-2023, разброс в получаемых экспериментальных данных находится в пределах 7 %.

3. Результаты и обсуждение

В работе была проведена оценка полученной в результате сварки взрывом границы соединения биметалла «медь М1 – сталь 09Г2С». Показано, что область соединения меди и стали имеет характерное для сварки взрывом волнообразное строение (рис. 1 а), которое в литературных источниках объясняется разными формами гидродинамической неустойчивости [25]. На рис. 1 б приведено распределение химических элементов меди и железа в образце: достаточно ярко прослеживается резкий переход от одного элемента к другому. Это объясняется высокой скоростью протекания процесса сварки, что предотвращает возникно-

вление диффузионных процессов и образование хрупких интерметаллидных соединений, характерных для обычных процессов сварки с расплавлением. Этот результат согласуется с экспериментами других авторов [22]. Дальнейшее детальное исследование границы соединения биметалла показало наличие локальных участков перемешивания меди с железом (рис. 2 *a–г*) в виде вихревых областей, причем их размер варьируется. Образование вихрей обусловлено турбулентным движением и активным перемешиванием, возникающими вследствие прохождения взрывной волны, которое сопровождается значительной пластической деформацией. Авторы работы [26] применили термин «фрагментация типа дробления» (ФТД) для описания подобного явления перемешивания. Этот процесс носит кратковременный характер и протекает в течение короткого промежутка времени, ограниченного длительностью самого взрыва. Итогом ФТД становится образование слоя, состоящего из мелких частиц («фрагментов») и непосредственно примыкающего к границе сварного соединения. В частности, в исследуемом биметалле подобный слой отчетливо заметен на рис. 2 *г* и *д*, где в меди отчетливо видны субмикронные стальные частицы разной формы. Подобные структуры характерны для данного вида биметалла [27].

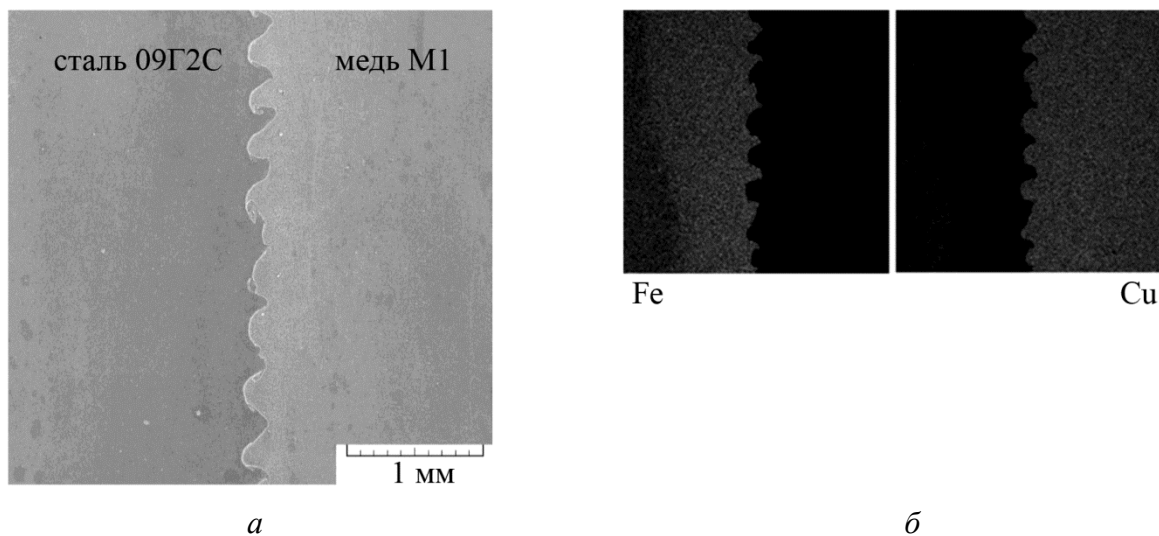


Рис. 1. Вид сварного шва в биметалле «медь М1 – сталь 09Г2С» (*a*) и распределение химических элементов Fe (железа) и Cu (меди) по сечению сварного шва (*б*)

В зоне контакта соединяемых материалов при сварке взрывом наблюдается нагрев соударяющихся поверхностей потоком ударно-сжатого газа (температура ударно-сжатого газа может достигать нескольких тысяч градусов), но поскольку процесс быстротечен [28], то тепловое влияние потока ударно-сжатого газа имеет немонотонный неоднородный характер, и протекание активных термоактивированных процессов отсутствует по всей поверхности контакта свариваемых материалов. Однако, согласно исследованиям [26], нагрев зоны вблизи границы соединения материалов, так же как и процессы диффузии, при сварке взрывом становится возможным лишь при остаточных температурах и напряжениях. Согласно данным авторов работы [29], зоны локального оплавления содержат смесь твердых растворов меди в α -железе и измельченных частиц стали, полученных дроблением, в меди. В других исследованиях ([30], [31]) продемонстрировано разнообразие структурных форм зерен в зонах диффузии и оплавления на сварном стыке, включающих вытянутые, прямоугольные, столбчатые и равноосные мелкие зерна. Как следствие этих процессов, на границе соединения исследуемого в работе биметалла так же наблюдаются зоны оплавления.

Таким образом, в исследуемом биметалле «медь М1 – сталь 09Г2С» на сварной границе образуются локальные диффузионные зоны и участки локального оплавления, которые могут влиять на дальнейшую работоспособность изделия из данного биметалла.

На рис. 3 приведен график усредненных значений твердости по сварному соединению. Хорошо видно, что в зоне сварного шва сформировалась область повышенного упрочнения шириной порядка 0,5 мм, в которой микротвердость превышает аналогичные показатели для исходных компонентов биметалла. Микротвердость сварного шва изменяется от 2 ± 5 % ГПа на границе с медью до $4,82 \pm 5$ % ГПа на локальных участках в областях ближе к стали 09Г2С. Участки стального листа 09Г2С и медной заготовки М1, удаленные от околошовной зоны, демонстрируют значения микротвердости в пределах от 3,52 до 3,91 ГПа и от 1,83 до 2,02 ГПа соответственно. Такие изменения в микротвердости на сварной границе объясняются интенсивной локальной пластической деформацией, возникающей в процессе сварки взрывом и наличием нанокристаллитов в этой зоне [32].

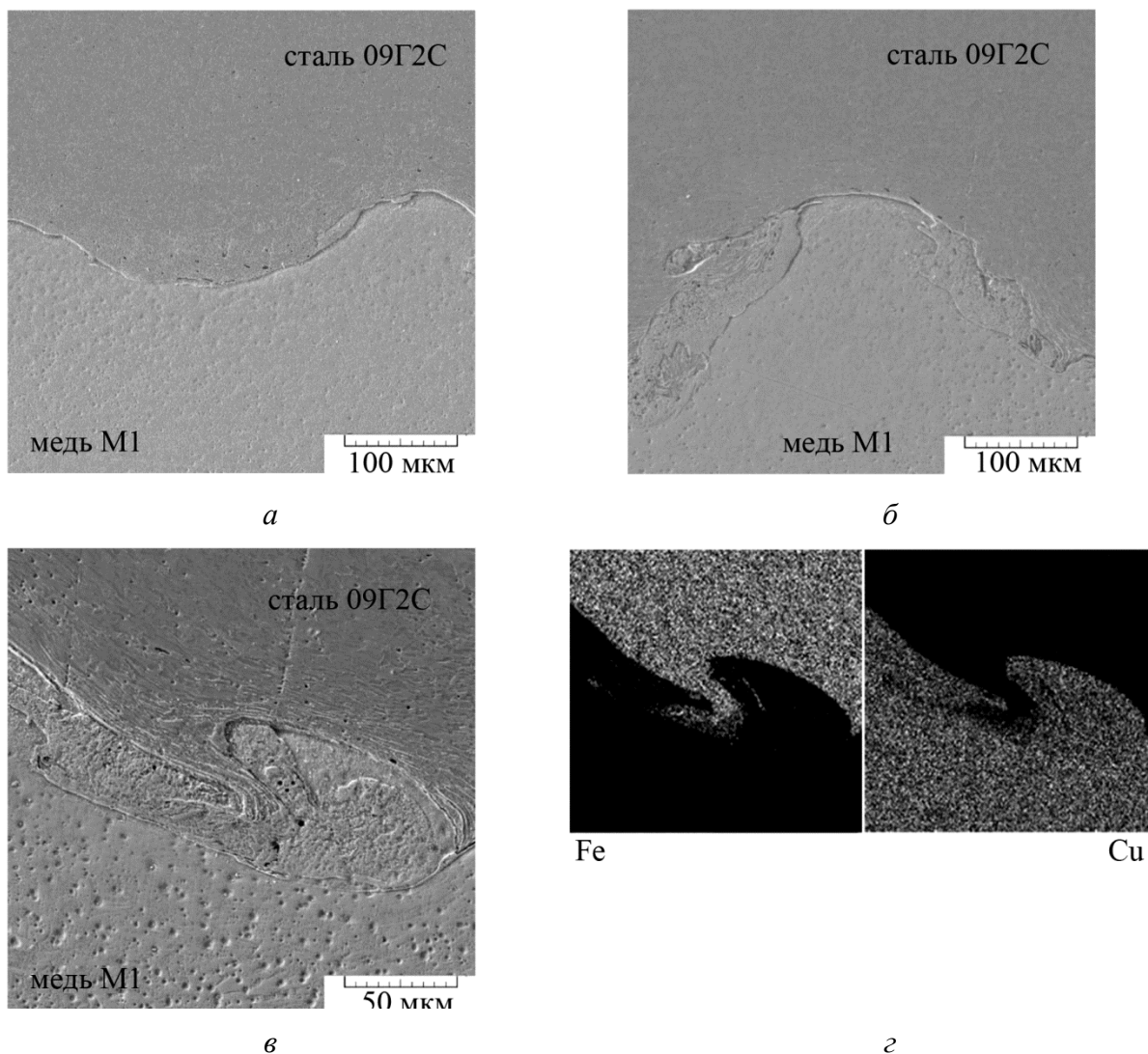


Рис. 2. Зоны сварного шва биметалла «медь М1 – сталь 09Г2С» (а–в) и химический анализ зоны интенсивного перемешивания (г)

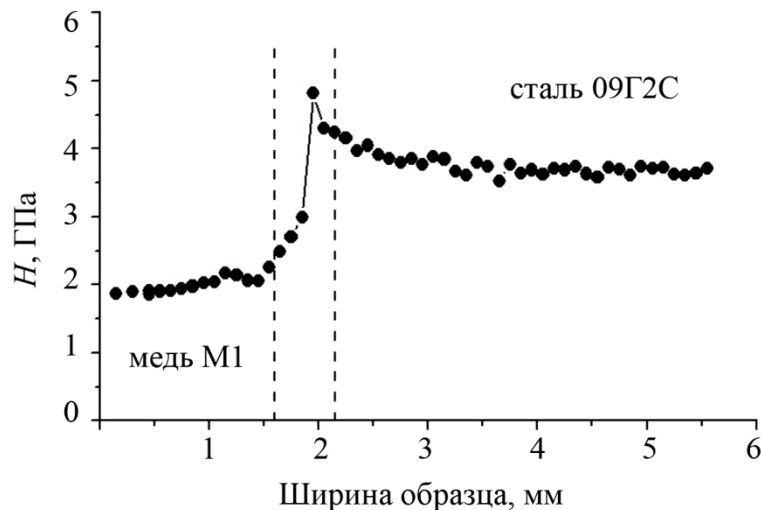


Рис. 3. Распределение микротвердости в биметалле «медь М1 – сталь 09Г2С»

Таким образом, около сварной границы в биметалле сформировалась область максимального упрочнения шириной приблизительно 0,5 мм, характеризующаяся показателями твердости, отличными от показателей исходных компонентов биметалла, и способная влиять на общие прочностные качества материала.

Одним из ключевых факторов перспективности применения биметалла в качестве конструкционного материала является его конструкционная прочность. Под конструкционной прочностью понимается комплекс механических свойств, обеспечивающих надежную и длительную работу в условиях эксплуатации. Важнейшими составляющими конструкционной прочности являются прочностные характеристики, такие как условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ и временное сопротивление разрыву σ_B , а также пластические свойства, выражаемые относительным удлинением δ и сужением после разрыва Ψ . Прочностные и пластические характеристики для биметалла «медь М1 – сталь 09Г2С» и для отдельных образцов из меди М1 и стали 09Г2С при разных температурах испытания представлены графически на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что условный предел текучести стали 09Г2С во всем диапазоне температур выше, чем условный предел текучести биметалла. Отличие в величинах для стали 09Г2С и биметалла варьируется следующим образом: разница в 9,5 % наблюдается для температуры -70 °С, в температурном интервале от -20 до $+20$ °С эта разница составляет примерно 16 %, максимальная разница в 33 % отмечается для температуры $+70$ °С. В свою очередь, условный предел текучести биметалла выше, чем условный предел текучести меди, примерно на 65 % в температурном диапазоне от -70 до $+20$ °С, для температуры $+70$ °С эта разница составляет 75 %. Для временного сопротивления разрыву наблюдаются схожие закономерности, отличающиеся только численно. Временное сопротивление разрыву биметалла ниже временного сопротивления разрыву стали 09Г2С всего на 5–10 %, но выше временного сопротивления разрыву меди в 3 раза.

Предел текучести $\sigma_{0,2}$ с понижением температуры фактически остается постоянным, а временное сопротивление разрыву σ_B растет. Предел текучести отражает начало необратимой деформации металла. При низких температурах величина энергии активации дефектов кристаллической решетки (дислокаций) увеличивается, что затрудняет движение дислокаций. Однако для начала течения достаточно небольшого числа подвижных дислокаций, поэтому начальные этапы деформации происходят стабильно даже при низких температурах, рассматриваемых в работе. Зато при дальнейшем деформировании временное сопротивление разрыву увеличивается при понижении температуры, поскольку снижается подвижность дефектов и повышается энергия активации распространения трещин. Иными словами, металл

требует большего внешнего воздействия для разрыва связи между атомами. Кроме того, в низколегированной стали 09Г2С легирующие элементы (марганец) стабилизируют структуру феррита, предотвращая фазовые переходы при охлаждении.

Относительные сужения для биметалла, меди М1 и стали 09Г2С находятся практически на одном уровне (рис. 4 з).

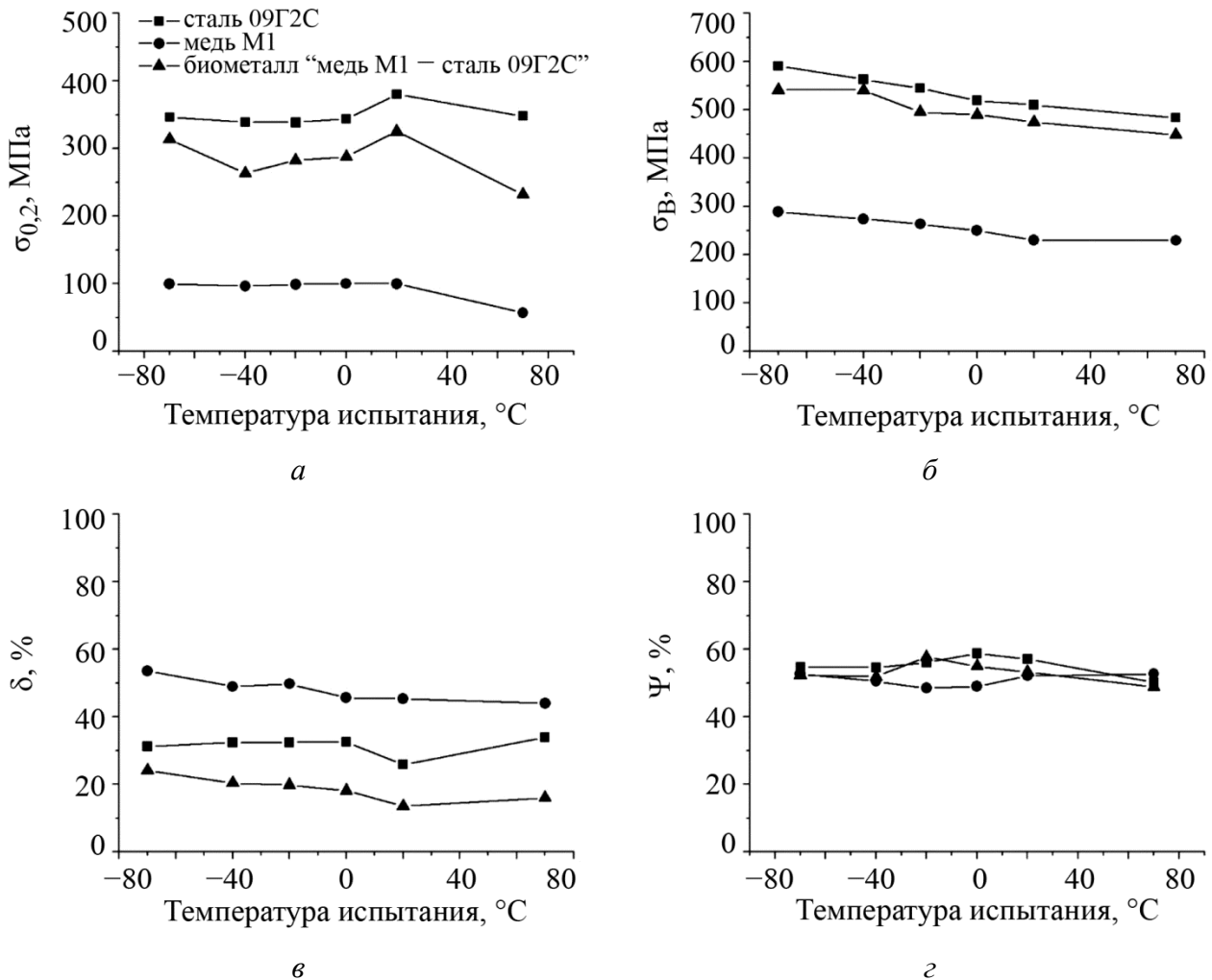


Рис. 4. Изменения условного предела текучести $\sigma_{0,2}$, временного сопротивления разрыву σ_B , относительного удлинения после разрыва δ , относительного сужения после разрыва Ψ материалов в зависимости от температуры

Относительное удлинение биметалла значительно уступает показателям как меди М1, так и стали 09Г2С во всем рассмотренном температурном диапазоне. Более того, величины относительного удлинения для меди превышают соответствующие значения для биметалла почти в 2,5 раза при любых условиях испытания. Относительное удлинение стали 09Г2С в 1,3–1,7 раза выше, чем у биметалла, в температурном интервале от -70 до 0 °С. Для температуры -70 °С отличие в величине относительного удлинения стали 09Г2С и биметалла составила 23 %.

Аналогичные тенденции изменения пластических свойств биметаллов отмечены в работе [33].

Низкое относительное удлинение биметалла по сравнению со сталью объясняется несколькими факторами. Во-первых, из-за различия в физико-химических характеристиках компонентов (модуль Юнга, коэффициент теплового расширения, прочность) возникают

внутренние напряжения, препятствующие равномерному распределению деформации, что снижает общую пластичность материала. Во-вторых, этот эффект объясняется присутствием переходного слоя, расположенного непосредственно вокруг сварного шва и прилегающих областей. После процедуры сварки взрывом этот слой уже претерпел значительную пластическую деформацию, что привело к частичному истощению ресурса пластичности материала. Также этот переходный слой может содержать дефекты (микропустоты, включения), которые становятся источниками зарождения трещин [1, 3]. Подтверждением существования такого слоя служат данные о микротвердости, представленные на рис. 3, а также выводы других исследований [34].

Хотя пластические характеристики биметалла уступают аналогичным параметрам исходных материалов, показатель относительного удлинения 14 % признается вполне допустимым для конструкционных целей. Например, нормативные требования для авиационных материалов предусматривают минимальный уровень относительного удлинения не менее 5 % [35]. Вообще говоря, относительное сужение является более информативной характеристикой пластичности, чем относительное удлинение. Можно заключить, что пластические свойства всех трех исследованных материалов находятся примерно на одном уровне.

Таким образом, во всем рассматриваемом интервале температур условный предел текучести и временное сопротивление разрыву биметалла оказываются ниже аналогичных показателей для стали 09Г2С, однако заметно превышают значения, характерные для меди М1. Относительное удлинение для биметалла ниже, чем для исходных материалов, а относительное сужение для всех трех рассматриваемых образцов находится примерно на одном уровне.

В работах по прогнозированию работоспособности изделий из биметаллов часто для определения механических свойств применяется правило смеси [36]. Правило смеси – это метод расчета эффективных свойств композиционных материалов, основанный на взвешенном усреднении свойств компонентов с учетом их объемных долей. Оно позволяет прогнозировать модуль упругости, прочность, плотность и другие характеристики композита [37]. В рамках работы была выполнена проверка применимости этого правила для прогнозирования механических свойств биметалла «медь М1 – сталь 09Г2С» в зависимости от температуры на основе знания механических свойств составляющих биметалла при этих температурах. Наиболее часто используемое правило смеси для теоретической оценки прочности многокомпонентных композитных систем предполагает, что каждая составляющая материала вносит вклад в определенную механическую характеристику пропорционально величине этой характеристики для самой составляющей и ее объемной доле в составе композита. Применительно к условному пределу текучести данное правило выражается следующим образом [38]:

$$\sigma_{0,2к} = \sum_{n=1}^m \sigma_{0,2n} V_n, \quad (1)$$

где $\sigma_{0,2к}$ и $\sigma_{0,2n}$ – условный предел текучести композита и каждого отдельного составляющего, V_n – объемная доля составляющего композита по отношению к общему объему, m – количество составляющих в композите.

Воспользовавшись формулой (1), получили теоретические значения $\sigma_{0,2}$ (табл. 3). В формуле (1) использовали значения $\sigma_{0,2}$, полученные для исходных однослойных материалов стали 09Г2С и меди. Из табл. 3 видно, что расчетные значения $\sigma_{0,2}$ для биметалла после сварки взрывом почти в 1,5 раза ниже значений, полученных в эксперименте. Различие экспериментальных и расчетных данных для материалов после сварки взрывом связано с тем, что в биметалле на границе соединения появляется зона, значительно упрочненная деформацией. Эта упрочненная зона вносит вклад в общие механические характеристики биметалла после сварки взрывом. Как вариант, при использовании пра-

вила смеси необходимо учитывать эту упрочненную зону как некий отдельный слой со своими механическими свойствами [39].

Таблица 3

Расчетные значения условного предела текучести биметалла по правилу смеси

Температура испытания, °С	+70	+20	0	-20	-40	-70
$\sigma_{0,2к}$, МПа (формула (1))	176	253	228	224	210	245
$\sigma_{0,2к}$, МПа (эксперимент)	242	325	288	282	263	314

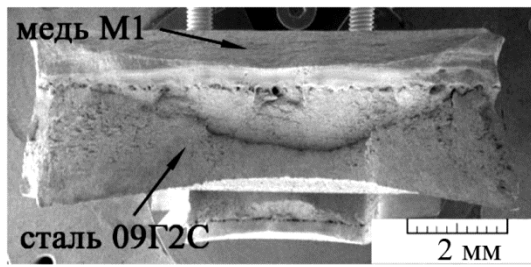
Обобщив всю приведенную информацию, можно сделать вывод, что полученный комплекс механических свойств биметалла «медь М1 – сталь 09Г2С» при рассмотрении его в качестве конструкционного материала в диапазоне температур от -70 до $+70$ °С находится на приемлемом уровне. Однако надо понимать, что для конкретных изделий существуют требования, прописанные в нормативно-конструкторской документации, и в реальных условиях они и будут требуемыми. Данные, полученные в работе, показывают возможность применения биметалла «медь М1 – сталь 09Г2С», полученного сваркой взрывом, для изготовления деталей, работающих в интервале температур от -70 до $+70$ °С.

Фрактографическое исследование поверхностей разрушения после разрыва было проведено для выяснения механизмов разрушения биметаллических материалов. Примеры поверхностей разрушения после испытания на растяжение при $+20$ и -70 °С приведены на рис. 5. Внешний вид излома носит неоднородный характер, слой стали 09Г2С, слой меди М1 и сварная граница имеют разный тип разрушения.

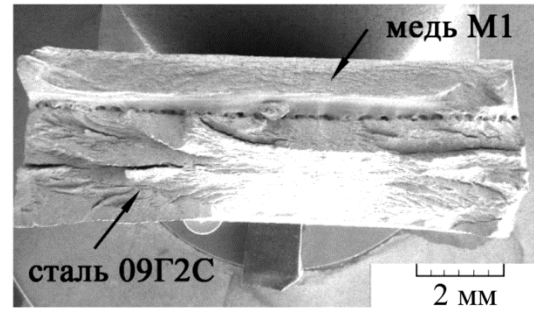
При всех температурах, рассмотренных в работе, разрушение происходит по границе раздела двух материалов, но полного расслоения не наблюдается, чередуются участки разрушения с участками наличия связи (рис. 5 в, г). Это показывает, что сварной шов не является самым слабым местом в биметалле, его прочность сопоставима с составляющими биметалла. Помимо этого, при разрушении по границе сварки взрывом встречаются вторичные небольшие трещины, перпендикулярные направлению роста магистральной трещины, скорее всего, в результате локальной релаксации напряжений.

На рис. 5 в, г видно, что поверхность разрушения меди, образованная отрывом, характеризуется участками практически без выраженной структуры, но с четким проявлением вязких ямок. Увеличенное количество этих ямок отмечается именно на границах сварного шва, независимо от испытываемых температур, что указывает на увеличение энергетических затрат, необходимых для реализации процесса разрушения в данном месте.

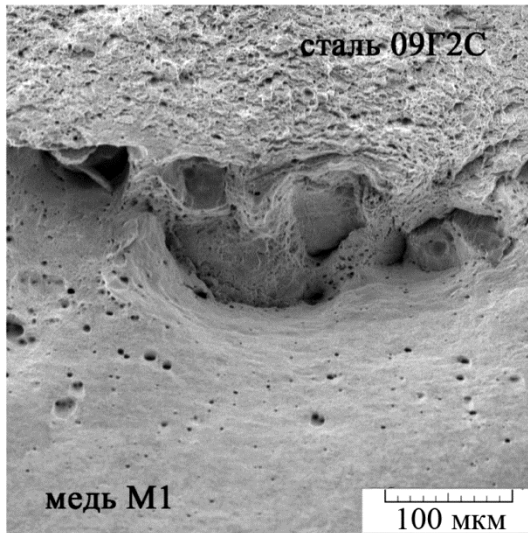
Особенно стоит отметить характер разрушения входящей в биметалл стали 09Г2С (рис. 5 д и рис. 5 е). Видно, что при температуре $+20$ °С наблюдается вязкий механизм разрушения, о чем свидетельствует ямочная топография поверхности разрушения (наблюдаются равноосные или полусферические ямки). В стали 09Г2С при -70 °С, помимо наличия равноосных и сферических ямок, наблюдаются фасетки квазискола, говорящие о том, что при отрицательной температуре к вязкому рельефу добавляются элементы хрупкого разрушения.



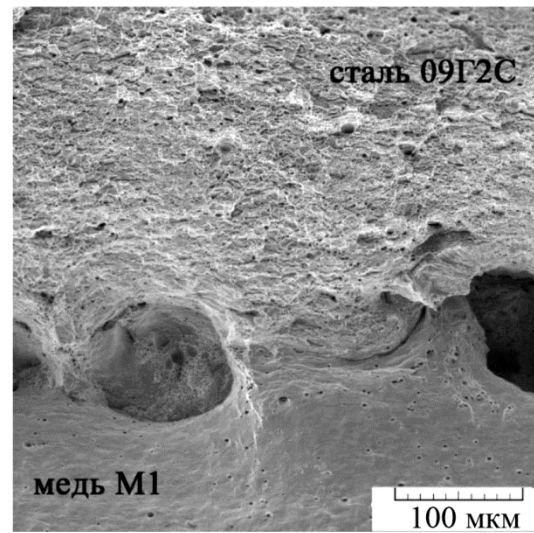
a



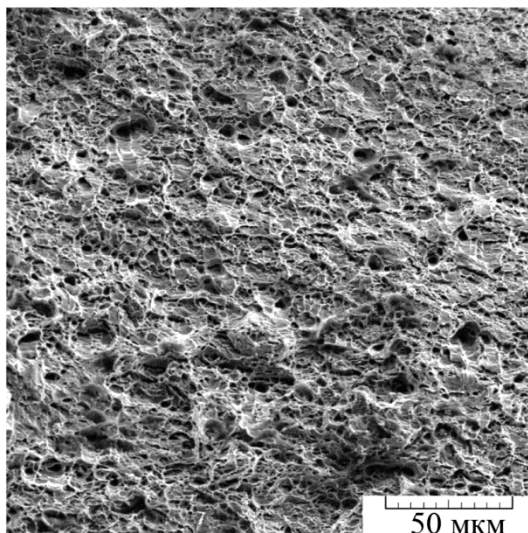
б



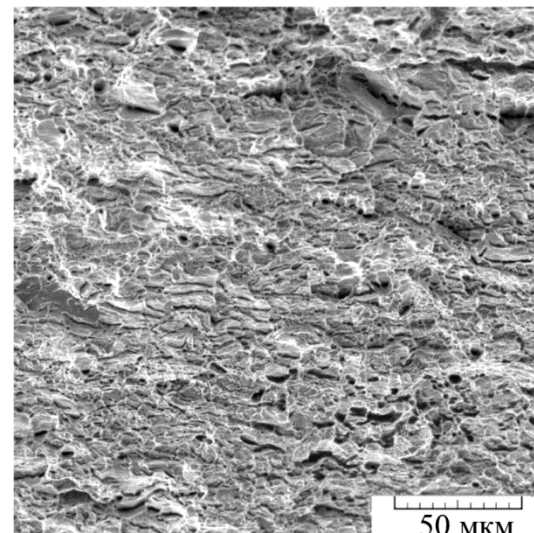
в



з



д



е

Рис. 5. Поверхности разрушения после растяжения в образце «медь М1 – сталь 09Г2С»: общий вид разрывного образца при +20 °С (*a*) и –70 °С (*б*); зона сварного шва биметалла при +20 °С (*в*) и –70 °С (*з*); слой стали 09Г2С при +20 °С (*д*) и –70 °С (*е*)

4. Заключение

Сварная граница биметалла «медь М1 – сталь 09Г2С» имеет волнообразное строение с резким переходом от меди к железу. Дополнительно на границе присутствуют участки интенсивного перемешивания меди и железа, а также зоны оплавления. В непосредственной близости от границы соединения слоев сформировалась околосшовная сварная зона шириной примерно 0,5 мм, характеризующаяся иной величиной микротвердости, чем у исходных компонентов биметалла. Показатели микротвердости в этой зоне варьируются от 2,2 ГПа на границе с медью до 4,8 ГПа на отдельных участках в центре сварного шва. Микротвердость удаленных от зоны сварного шва стали 09Г2С и меди М1 находится в пределах от 3,5 до 3,9 ГПа и от 1,8 до 2 ГПа соответственно.

Во всем рассматриваемом температурном диапазоне условный предел текучести и временное сопротивление разрыву биметалла ниже, чем эти же параметры для стали 09Г2С, но выше, чем для меди М1. Временное сопротивление разрыву биметалла ниже временного сопротивления разрыву стали 09Г2С на 5–10 %, но выше временного сопротивления разрыву меди в 3 раза. Относительное удлинение для биметалла ниже, чем для меди М1 и для стали 09Г2С во всем температурном интервале. Так, относительное удлинение меди в 2,5 раза выше почти для всех испытаний, чем тот же параметр для биметалла. В свою очередь, этот же параметр для стали 09Г2С в 1,3–1,7 раз выше, чем для биметалла, в температурном интервале от –70 до 0 °С. Относительное сужение для всех трех рассматриваемых образцов находится примерно на одном уровне для всех испытаний.

Теоретический расчет условного предела текучести по правилу смеси в диапазоне температур от –70 до +70 °С показывает почти в 1,5 раза заниженные значения этого показателя при минусовых температурах.

Фрактографическое исследование поверхностей разрушения после разрыва показало, что во всем диапазоне исследуемых температур происходит разрушение сварного шва по границе раздела двух материалов, но полного расслоения не наблюдается. В меди разрушение путем отрыва характеризуется участками практически без выраженного рельефа поверхности разрушения, но с преобладанием в изломе вязких ямок. Разрушение входящей в биметалл стали 09Г2С при плюсовых температурах имеет вязкий характер, при отрицательной температуре к вязким элементам разрушения добавляются хрупкие.

Полученные данные о механических свойствах соединения «медь М1 – сталь 09Г2С» в диапазоне температур от –70 до +70 °С показывают, что биметалл имеет приемлемый комплекс механических свойств по прочности и пластичности и что возможно его применение для изделий, работающих в данном температурном интервале.

Благодарность

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием № 124020700063-3 для Института машиноведения имени Э. С. Горкунова УрО РАН. Исследования проведены с использованием оборудования ЦКП «Пластометрия» Института машиноведения имени Э. С. Горкунова УрО РАН. Авторы выражают благодарность Мичурову Николаю Сергеевичу за помощь при проведении фрактографических исследований с использованием сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega II XMU.

Литература

1. Слоистые металлические композиции : учебное пособие / И. Н. Потапов, В. Н. Лебедев, А. Г. Кобелев, Е. В. Кузнецов. – М. : Металлургия, 1986. – 216 с.
2. Исследование сваренного взрывом медно-стального биметалла после изгиба / В. Н. Арисова, Л. М. Гуревич, А. П. Голикова, В. С. Семенова // Известия ВолгГТУ. – 2023. – № 10 (281). – С. 6–11. – DOI: 10.35211/1990-5297-2023-10-281-6-11.

3. Explosion welding research on large-size ultra-thick copper-steel composites: a review / S. Shan, Y. Liu, J. Zhang, X. Fan, K. Jiao // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2023. – Vol. 24. – P. 4130–4142. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.04.087.
4. Study on copper-stainless steel explosive welding for nuclear fusion by generalized interpolated material point method and experiments / X. Song, Y. Yang, Y. Cheng, Y. Wang, H. Zheng // *Engineering Analysis with Boundary Elements*. – 2024. – Vol. 160. – P. 160–172. – DOI: 10.1016/j.enganabound.2024.01.003.
5. Advancements in additive manufacturing for copper-based alloys and composites: a comprehensive review / A. Vahedi Nemani, M. Ghaffari, K. Sabet Bokati, N. Valizade, E. Afshari, A. Nasiri // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. – 2024. – Vol. 8 (2). – P. 54. – DOI: 10.3390/jmmp8020054.
6. Interfacial microstructure and properties of copper clad steel produced using friction stir welding versus gas metal arc welding / Z. Shen, Y. Chen, M. Haghshenas, T. Nguyen, J. Galloway, A. P. Gerlich // *Materials Characterization*. – 2015. – Vol. 104. – P. 1–9. – DOI: 10.1016/j.matchar.2015.02.022.
7. Effect of swing-spiral-trajectory on pulsed fiber laser welding stainless steel/copper dissimilar metals / R. Huang, X. Huang, D. Wang, L. Yang // *Optics & Laser Technology*. – 2022. – Vol. 156. – P. 108516. – DOI: 10.1016/j.optlastec.2022.108516.
8. Recent advancements in hybrid additive manufacturing of similar and dissimilar metals via laser powder bed fusion / I. H. Zainelabdeen, L. Ismail, O. F. Mohamed, K. A. Khan, A. Schiffer // *Materials Science and Engineering: A*. – 2024. – Vol. 909. – P. 146833. – DOI: 10.1016/j.msea.2024.146833.
9. Yongqiang Y., Menglong J., Cheng D. Research progress of copper-steel functional materials prepared by additive manufacturing // *Aeronautical Manufacturing Technology*. – 2023. – Vol. 66 (4). – P. 14–24. – DOI: 10.1016/J.JMST.2020.07.044.
10. Effect of beam offset on the characteristics of copper/304stainless steel electron beam welding / S. Guo, Q. Zhou, J. Kong, Y. Peng, Y. Xiang, T. Y. Luo, K. H. Wang, J. Zhu // *Vacuum*. – 2016. – Vol. 128. – P. 205–212. – DOI: 10.1016/j.vacuum.2016.03.034.
11. Microstructure and mechanical properties of Cu/steel dissimilar joints / Q. Chu, Y. Li, Q. Cao, M. Zhang, P. Zhao, F. Yan, H. Luo, X. Wang, C. Yan // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. – 2022. – Vol. 200. – P. 104828. – DOI: 10.1016/j.ijpvp.2022.104828.
12. Трансформация структуры в зоне соединения биметалла медь М3 + сталь 30ХГСА после сварки взрывом и последующего отжига / В. Н. Арисова, А. Ф. Трудов, Л. М. Гуревич, В. О. Харламов, В. Ю. Назарова // *Известия ВолгГТУ*. – 2021. – № 4 (251). – С. 13–18. – DOI: 10.35211/1990-5297-2021-4-251-13-18.
13. Zafari A., Xia K. Nano/ultrafine grained immiscible Fe–Cu alloy with ultrahigh strength produced by selective laser melting // *Materials Research Letters*. – 2021. – Vol. 9 (6). – P. 247–254. – DOI: 10.1080/21663831.2021.1884620.
14. Рентгеноструктурные исследования сваренного взрывом медно-стального биметалла после термических воздействий / В. Н. Арисова, А. И. Богданов, Л. М. Гуревич, В. С. Семенова, А. П. Голикова // *Известия ВолгГТУ*. – 2024. – № 10 (293). – С. 19–24. – DOI: 10.35211/1990-5297-2024-10-293-19-24.
15. Evolution of microstructure and properties of Fe-Cu, manufactured by electron beam additive manufacturing with subsequent friction stir processing / A. Zykova, A. Chumaevskii, A. Vorontsov, K. Kalashnikov, D. Gurianov, A. Gusarova // *Materials Letters*. – 2022. – Vol. 307. – P. 131023. – DOI: 10.1016/j.matlet.2021.131023.
16. Оголихин В. М., Яковлев И. В. Сварка взрывом в электрометаллургии. – Новосибирск : СО РАН, 2009. – 159 с.
17. Durgutlu A., Gülenç B., Findik F. Examination of copper/stainless steel joints formed by explosive welding // *Materials and Design*. – 2005. – Vol. 26. – P. 497–507. – DOI: 10.1016/j.matdes.2004.07.021.

18. Explosive welding / A. Loureiro, G. H. S. F. L. Carvalho, I. Galvão, R. Leal, R. Mendes // *Advanced Joining Processes*. – Elsevier, 2021. – Ch. 6. – P. 207–237. – DOI: 10.1016/B978-0-12-820787-1.00006-1.
19. Sherpa B. B., Rani R. Advancements in explosive welding process for bimetallic material joining: a review // *Journal of Alloys and Metallurgical Systems*. – 2024. – Vol. 6. – 100078. – DOI: 10.1016/j.jalms.2024.100078.
20. Findik F. Recent developments in explosive welding // *Materials and Design*. – 2011. – Vol. 32 (11). – P. 1081–1093. – DOI: 10.1016/j.matdes.2010.10.017.
21. Explosive welding / A. Mori, I. Bataev, N. Wada, K. Hokamoto // *Explosion, Shock-wave and High-strain-rate Phenomena of Advanced Materials Multiphysics: Advances and Applications* / ed. by K. Hokamoto. – Academic Press, 2021. – Ch. 3. – P. 35–70. – DOI: 10.1016/B978-0-12-821665-1.00002-X.
22. Fabrication of a thick copper-stainless steel clad plate for nuclear fusion equipment by explosive welding / Y. Wang, X. Li, X. Wang, H. Yan // *Fusion Engineering and Design*. – 2018. – Vol. 137. – P. 91–96. – DOI: 10.1016/j.fusengdes.2018.08.017.
23. Баранникова С. А., Ли Ю. В. Особенности деформации биметаллической пластины // *Вестник ПНИПУ. Механика*. – 2024. – № 3. – С. 57–64. – DOI: 10.15593/perm.mech/2024.3.04.
24. Mechanical properties and fracture behavior of the “copper M1 – Steel 09g2s” bimetal produced by explosion welding / I. A. Veretennikova, D. I. Vichuzhanin, N. S. Michurov, S. V. Smirnov // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2016. – Iss. 6. – P. 28–38. – DOI: 10.17804/2410-9908.2016.6.028-038. – URL: http://dream-journal.org/issues/2016-6/2016-6_111.html
25. Лысак В. И., Кузьмин С. В. Сварка взрывом. – М.: Машиностроение, 2005. – 543 с.
26. Диссипативные структуры при сварке взрывом / Б. А. Гринберг, М. А. Иванов, В. В. Рыбин, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, О. А. Елкина, А. М. Пацелов, О. В. Антонова, А. В. Иноземцев, А. Ю. Волкова, А. В. Плотников // *Известия ВолгГТУ*. – 2012. – № 14 (101). – С. 27–43.
27. Experimental and numerical investigations of interface characteristics of copper/steel composite prepared by explosive welding / H. Zhang, K. X. Jiao, J. L. Zhang, J. Liu // *Materials and Design*. – 2018. – Vol. 154. – P. 140–152. – DOI: 10.1016/j.matdes.2018.05.027.
28. Thermal processes in explosive welding. Thermal processes in explosive welding / S. V. Khaustov, S. V. Kuzmin, V. I. Lysak, V. V. Pai // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. – 2014. – Vol. 50. – P. 732–738. – DOI: 10.1134/S0010508214060161.
29. Gladkovsky S. V., Kuteneva S. V., Sergeev S. N. Microstructure and mechanical properties of sandwich copper/steel composites produced by explosive welding // *Materials Characterization*. – 2019. – Vol. 154. – P. 294–303. – DOI: 10.1016/j.matchar.2019.06.008.
30. Investigations on the microstructure evolution and mechanical properties of explosive welded ODS-Cu/316 L stainless steel composite / B. Zhang, H. Ma, J. Xu, L. Li, Z. Shen, L. Ding, J. Tian // *Fusion Engineering and Design*. – 2022. – Vol. 179. – P. 113142. – DOI: 10.1016/j.fusengdes.2022.113142.
31. Investigation of interface microstructure and properties of copper/304 stainless steel fabricated by explosive welding / R. Feng, W. Zhao, K. Gan, M. Feng, Z. Li, Y. Pan, Z. Sun, J. Li // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2022. – Vol. 18. – P. 2343–2353. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.03.142.
32. Microstructure and mechanical properties investigations of copper-steel composite fabricated by explosive welding / H. Zhang, K. X. Jiao, J. L. Zhang, J. Liu // *Materials Science and Engineering: A*. – 2018. – Vol. 731. – P. 278–287. – DOI: 10.1016/j.msea.2018.06.051.
33. Смирнов С. В., Веретенникова И. А. Анизотропия механических свойств листа из биметалла сталь 08X18H10Т-сталь Ст10, изготовленного сваркой взрывом // *Производство проката*. – 2017. – № 1. – С. 30–36.

34. Veretennikova I. A., Konovalov D. A., Smirnov S. V. Patterns of the change in the mechanical properties of a bimetallic welded joint under plastic deformation // AIP Conf. Proc. – 2016. – Vol. 1785. – P. 040089. – DOI: 10.1063/1.4967146.
35. Золоторевский В. С. Механические свойства металлов. – М. : МИСИС, 1998. – 400 с.
36. On the rule of mixtures for bimetal composites without bonding / B. Feng, X. Feng, C. Yan, Y. Xin, H. Wang, J. Wang, K. Zheng // Journal of Magnesium and Alloys. – 2020. – Vol. 8 (4). – P. 1253–1261. – DOI: 10.1016/j.jma.2019.11.016.
37. Микульский В. Г. Строительные материалы (материаловедение и технология) : учебное пособие. – М. : АСВ, 2002. – 536 с.
38. Shayanpoor A. A., Rezaei Ashtiani H. R. Constitutive model for hot deformation behaviors of Al/Cu bimetal composites based on their components // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2023. – Vol. 33 (12). – P. 3641–3660. – DOI: 10.1016/S1003-6326(23)66360-5.
39. Fatigue delamination damage analysis in composite materials through a rule of mixtures approach / A. Taherzadeh-Fard, S. Jiménez, A. Cornejo, E. Oñate, L. G. Barbu // Composite Structures. – 2025. – Vol. 351. – 118613. – DOI: 10.1016/j.compstruct.2024.118613.