

Received: 28.01.2025
Revised: 21.04.2025
Accepted: 25.04.2025
DOI: 10.17804/2410-9908.2025.2.060-082

EXPERIENCE IN PRODUCING WELDED JOINTS OF CHROMIUM-NICKEL STEELS AND TITANIUM ALLOYS: REVIEW

E. I. Senaeva^{1, a, *} and A. V. Makarov^{1, 2, b, *}

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

²*M. N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
18 S. Kovalevskoy St., Ekaterinburg, 620137, Russia*

^a  <https://orcid.org/0000-0001-8625-2310>  katty14-12@yandex.ru;
^b  <https://orcid.org/0000-0002-2228-0643>  makarov@imach.uran.ru

*Corresponding author. Email: katty14-12@yandex.ru
Address for correspondence: ul. Komsomolskaya, 34, Ekaterinburg, 620049, Russia
Tel.: +7 (890) 580-7371

The paper reviews the data of the scientific and technical literature on challenges in the production of permanent joints of chromium-nickel steels and titanium alloys. It analyzes the results of studying the effect of welding methods on the structure and properties of joints. Laser welding is shown to form a welded joint with a strength exceeding that of titanium. A comparative analysis of the use of intermediate inserts in laser welding of chromium-nickel steels and titanium alloys is given. Changes in the structural state of a laser-welded joint are considered, which allow phase formation in welds and their strength to be controlled.

Keywords: chromium-nickel steels, titanium alloys, welding, structure, phases, solid solutions, intermetallics, microhardness, strength

Acknowledgment

The research was done under the state assignment for IES UB RAS, theme No. 124020700063-3.

References

1. *Spravochnik po lazernoy svarke* [Handbook of Lazer Welding Technologies, ed., S. Katayama]. Tekhnosfera Publ., Moscow, 2015, 704 p. (In Russian).
2. Li, Y.j., Wang, J., and Liu, P. Application and Welding of Difficulty to Weld Dissimilar Materials, Chemical Industry Press, Beijing, 2004, 208 p.
3. Fang, Y., Jiang, X., Mo, D., Zhu, D., and Luo, Z. A review on dissimilar metals' welding methods and mechanisms with interlayer. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2019, 102, 2845–2863. DOI: 10.1007/s00170-019-03353-6.
4. Zvezdin, V.V. and Rakhimov, R.R. Study of laser welding of dissimilar metals. *Sotsialno-Ekonomicheskie i Tekhnicheskie Sistemy: Issledovanie, Proektirovanie, Optimizatsiya*, 2017, 2 (75), 16–23. (In Russian).
5. Pervukhin, L.B., Denisov, I.V., Shishkin, T.A., and Pervukhina, O.L. Experience in production of large-size titanium-steel bimetal for pipe boards of NPP. *Izvestiya VolgGTU*, 2020, 11 (246), 37–40. (In Russian). DOI: 10.35211/1990-5297-2020-11-246-37-40.

6. Kah, P., Shrestha, M., and Martikainen, J. Trends in joining dissimilar metals by welding. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 440, 269–276. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.440.269.
7. Tomaschuk, I. and Sallamand, P. Metallurgical strategies for the joining of titanium alloys with steels. *Advanced Engineering Materials*, 2018, 20 (6), 1700764. DOI: 10.1002/adem.201700764.
8. Mo, D.-f., Song, D.-f., Fang, Y.-j., Jiang, X.-s., Luo, C.Q., Simpson, M.D., and Luo, Z.-p. A review on diffusion bonding between titanium alloys and stainless steels. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, 2018, 8701890, 1–15. DOI: 10.1155/2018/8701890.
9. Ryabov, V.R., Rabkin, D.M., Kurochko, R.S., and Strizhevskaya, L.G. *Svarka raznorodnykh metallov i splavov* [Welding of Dissimilar Metals and Alloys]. Mashinostroenie Publ., Moscow, 1984, 239 p. (In Russian).
10. Nikulina, A.A., Bataev, A.A., Smirnov, A.I., and Burov, V.G. The investigation of heterogeneous steels joined by the method of contact welding. *Obrabotka Metallov (Tekhnologiya, Oborudovanie, Instrumenty)*, 2010, 2 (47), 24–28. (In Russian).
11. STO 00220368–022–2–7. (In Russian).
12. Zinoviev, V.E. *Teplofizicheskie svoystva metallov pri vysokikh temperaturakh* [Handbook of Thermophysical Properties of Metals at High Temperatures]. Metallurgiya Publ., Moscow, 1989, 384 p. (In Russian).
13. Lyakishev, N.P. *Diagrammy sostoyaniya dvoynykh metallicheskiykh sistem: spravochnik v 3 t.* [Diagrams of the States of Double Metallic Systems: Handbook in 3 vols., ed. by N.P. Lyakishev]. Mashinostroenie Publ., Moscow, 1996–2000. (In Russian).
14. Orishich, A.M., Cherepanov, A.N., Shapeev, V.P., and Pugacheva, N.B. *Nanomodifitsirovaniye svarnykh soedineniy pri lazernoi svarke metallov i splavov* [Nano-Modification of Welds by Laser Welding Metals and Alloys]. SO RAN Publ., Novosibirsk, 2014, 252 p. (In Russian).
15. Teslyuk, M.Yu. *Metallicheskie soedineniya so strukturami faz Lavesa* [Metal Compounds with Laves Phase Structures]. Nauka Publ., Moscow, 1969, 136 p. (In Russian).
16. Sedykh, V.S. and Kazak, N.N. *Svarka vzryvom i svoystva svarnykh soediny* [Explosive Welding and Properties of Welded Joints]. Mashinostroenie Publ., Moscow, 1971, 71 p. (In Russian).
17. Gerashchenkov, D.A., Gerashchenkova, E.Ju., Farmakovskij, B.V., Vasilyev, A.F., Leonov, V.P., Schastlivaja, I.A., Oderyshev, D.E., and Fokichev, A.I. RF Patent No. 2560472, Byull. Izobret. No. 23, 2015.
18. Shi, Z., Cui, L., He, D., Huang, Z., Li, H., Gao, Q., Bu, F., and Pan, Y. Enhanced strength of laser welded steel/titanium butt joints with vanadium multi-layers and a copper plate as a composite intermediate. *Optics and Laser Technology*, 2025, 180, 111478. DOI: 10.1016/j.optlastec.2024.111478.
19. Zhang, Y., Sun, D.Q., Gu, X.Y., Duan, Z.Z., and Li, H.M. Nd:YAG pulsed laser welding of TC4 Ti alloy to 301L stainless steel using Ta/V/Fe composite interlayer. *Materials Letters*, 2018, 212 (1), 54–57. DOI: 10.1016/j.matlet.2017.10.057.
20. Grigoryants, A.G. and Shiganov, I.N. *Lazernaya tekhnika i tekhnologiya: v 7 kn. Kn. 5. Lazernaya svarka metallov* [Laser Equipment and Technology. Book. 5: Laser Welding of Metals]. Vysshaya Shkola Publ., Moscow, 1988, 207 p. (In Russian).
21. Ng, C.H., Mok, E.S.H., and Man, H.C. Effect of Ta interlayer on laser welding of NiTi to AISI 316L stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 226, 69–77. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.06.039.
22. Hahnen, R., Fox, G., and Dapino, M.J. Fusion welding of nickel–titanium and 304 stainless steel tubes. Part I. Laser welding. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2012, 24 (8), 945–961. DOI: 10.1177/1045389X12461075.
23. Fox, G., Hahnen, R., and Dapino, M.J. Fusion welding of nickel–titanium and 304 stainless steel tubes. Part II. Tungsten inert gas welding. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2012, 24 (8), 962–972. DOI: 10.1177/1045389X12461076.

24. Tomashchuk, I., Sallamand, P., Belyavina, N., and Pilloz, M. Evolution of microstructures and mechanical properties during dissimilar electron beam welding of titanium alloy to stainless steel via copper interlayer. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, 585, 114–122. DOI: 10.1016/j.msea.2013.07.050.
25. Zoeram, A.S., Rahmani, A., and Akbari Mousavi, S.A.A. Microstructure and properties analysis of laser-welded Ni-Ti and 316 sheets using copper interlayer. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 26, 355–363. DOI: 10.1016/j.jmapro.2017.02.005.
26. Pugacheva, N.B., Smirnov, S.V., Vichuzhanin, D.I., Afonin, A.M., Oryshich, A.M., Zadvorkin, S.M., and Goruleva, L.S. Strength and structure of permanent joint of VT1-0 alloy and 12X18N10T steel under different laser welding modes. *Deformatsiya i Razrushenie Metallov*, 2012, 7, 26–32. (In Russian).
27. Tomashchuk, I., Sallamand, P., Andrzejewski, H., and Grevey, D. The formation of intermetallics in dissimilar Ti6Al4V/copper/AISI 316 L electron beam and Nd:YAG laser joints. *Intermetallics*, 2011, 19 (10), 1466–1473. DOI: 10.1016/j.intermet.2011.05.016.
28. Hosseini, S.R.E., Feng, K., Nie, P., Zhang, K., Huang, J., Chen, Y., Shu, D., Li, Z., Guo, B., and Xue, S. Fracture surface characterization of laser welding processed Ti alloy to stainless steel joints. *Welding in the World*, 2018, 62, 947–960. DOI: 10.1007/s40194-018-0586-6.
29. Isaev, V.I., Cherepanov, A.N., and Shapeev, A.N. Numerical study of heat modes of laser welding of dissimilar metals with an intermediate insert. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 99, 711–720. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.04.019.
30. Pugacheva, N.B., Orishich, A.M., Volkova, E.G., Makarov, A.V., Senaeva, E.I., and Malikov, A.G. Role of ultra-fine intermetallic particles and martensite in strengthening of AISI 321/Cu/Ti laser welded joint. *Materials Characterization*, 2022, 185, 111702. DOI: 10.1016/j.matchar.2021.111702.
31. Pugacheva, N.B., Makarov, A.V., Senaeva, E.I., and Volkova, E.G. Crystallization of dissimilar Ti/Cu/steel laser welds. *Journal of Crystal Growth*, 2019, 526, 125212. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2019.125212.
32. Pugacheva, N.B., Senaeva, E.I., and Makarov, A.V. Effect of the laser welding conditions on the chemical composition of the AISI 321/Cu/Ti material. *AIP Conference Proceedings*, 2020, 2315, 030015. DOI: 10.1063/5.0036864.
33. Pugacheva, N.B., Cherepanov, A.N., Orishich, A.M., Malikov, A.G., Drozdov, V.O., Mali, V.I., and Senaeva, E.I. Investigation of the structure and properties of a composite insert applied at laser welding of steel with titanium. *AIP Conference Proceedings*, 2017, 1893, 030107. DOI: 10.1063/1.5007565.

Подана в журнал: 28.01.2025
УДК 669.017.165
DOI: 10.17804/2410-9908.2025.2.060-082

ОПЫТ ПОЛУЧЕНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ СТАЛЕЙ И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ: ОБЗОР

Е. И. Сенаева^{1, а, *}, А. В. Макаров^{1, 2, б}

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

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики металлов имени М. Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук,
ул. С. Ковалевской, 18, Екатеринбург, 620137, Россия

^а  <https://orcid.org/0000-0001-8625-2310>  katty14-12@yandex.ru;
^б  <https://orcid.org/0000-0002-2228-0643>  makarov@imach.uran.ru

*Ответственный автор. Электронная почта: katty14-12@yandex.ru
Адрес для переписки: ул. Комсомольская, д. 34, Екатеринбург, 620049, Россия
Тел.: +7 (905) 807-03-71

Приведен обзор данных научно-технической литературы по проблемам, возникающим при получении неразъемных соединений хромоникелевых сталей и титановых сплавов. Проанализированы результаты научных исследований влияния способа сварки на структуру и свойства соединений. Показано, что при лазерной сварке формируется сварное соединение, прочность которого превышает значения для титана. Приведен сравнительный анализ использования промежуточных вставок при лазерной сварке хромоникелевых сталей и титановых сплавов. Рассмотрены изменения структурного состояния сварного соединения при лазерной сварке, позволяющие регулировать фазообразование в сварных швах и их прочность.

Ключевые слова: хромоникелевые стали, титановые сплавы, сварка, структура, фазы, твердые растворы, интерметаллиды, микротвердость, прочность

1. Введение

Современный уровень развития техники вызывает необходимость получения сварных соединений разнородных материалов [1–3]. Это обусловлено требованием снижения веса и стоимости конструкций ответственного назначения, а также различием функционального назначения отдельных частей деталей. Например, авторы работы [4] рассматривают необходимость использования сварки разнородных материалов деталей ротора электродвигателей, выполняющих разные функции. Для материала оси ротора важным является обеспечение механической прочности конструкции при вращении, а для материала сердечника – обеспечение высокой магнитной проницаемости. Для получения данных деталей используются хромоникелевые стали в совокупности с титановыми сплавами. Совмещение функций в однородных материалах приводит к увеличению габаритно-весовых характеристик ротора при заданных механических и электромагнитных характеристиках. Необходимость сварки стали с титаном возникает также при изготовлении биметаллических трубных досок конденсаторов АЭС и атомных ледоколов [5]. Кроме того, сварка сталей с титановыми сплавами востребована в аэрокосмической, транспортной, энергетической и химической промышленности [3, 6, 7].

Разнородными принято считать материалы, отличающиеся по химическому и фазовому составу [8, 9]. Одни из первых экспериментальных исследований по сварке разнородных

материалов были проведены инженером Мотовилихинского завода (г. Пермь) Н. Г. Славяновым, который в 1893 году подготовил экспонат для Всемирной электротехнической выставки (США) в виде многогранника, сваренного из семи разных материалов: стали, чугуна, меди, никеля, бронзы, нейзильбера и томпака [9]. Определенные трудности возникают при сварке разнородных сталей, отличающихся химическим и фазовым составами [10]. На основе многочисленных исследований и производственного опыта сформулированы требования к выбору сварочных электродов и режимам сварки разнородных сталей [11].

С 1992 года в зарубежных и российских научных журналах опубликовано множество статей по исследованию влияния режимов сварки коррозионностойких сталей и титановых сплавов на структуру и прочность получаемых сварных соединений. Известно [7, 9, 10], что данные материалы обладают существенными различиями теплофизических свойств (теплопроводность λ составляет 21,9 Вт/м·К и 15 Вт/м·К для титана и хромоникелевой стали соответственно, а температурный коэффициент линейного расширения α , наоборот, у стали выше, $16,6 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$, для титана он $9,2 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$), а также очень низкой взаимной растворимостью металлов и образованием интерметаллических фаз FeTi и Fe₂Ti (фаза Лавеса) [11]. Если интерметаллид FeTi имеет твердость 600 HV, то фаза Лавеса настолько хрупкая, что невозможно измерить точное значение твердости ($>1000 \text{ HV}$) [7]. В случае сварки титановых сплавов с хромоникелевыми сталями образуются дополнительные хрупкие фазы с Cr, а Ni обычно растворяется в образующихся интерметаллических соединениях и твердых растворах. Локальное накопление хрупких фаз приводит к образованию холодных трещин, и именно поэтому сварка плавлением этих материалов считалась невозможной в течение многих лет [7]. Ввиду приведенных различий данных материалов и образования хрупких фаз при их непосредственном соединении, ученые искали разные способы соединения без нагрева, с помощью механических классов сварки. Анализ публикаций, посвященных соединению титана со сталью за последние двадцать лет, показывает высокую популярность методов диффузионной сварки с пиком в 2008–2010 годах и возникновение интереса к методам с использованием мощного луча, таким как лазерная и электронно-лучевая сварка, после 2010 года. С 2014 года проводятся интенсивные исследования в области методов сварки механического класса, таких как трение, трение с перемешиванием и сварка взрывом. При использовании сварки плавлением были опробованы различные специальные технологические приемы с целью получения прочности на растяжение на уровне одного из соединяемых материалов – титанового сплава.

Целью данной работы является сравнительный анализ структуры и прочности сварных соединений хромоникелевой стали и титанового сплава, полученных разными способами сварки.

2. Способы прямой сварки хромоникелевых сталей с титановыми сплавами

Прямое соединение титановых сплавов с хромоникелевыми сталями является весьма сложным, поскольку, согласно диаграмме состояния Fe–Ti (рис. 1), в полученном соединении неизбежно образуются интерметаллиды TiFe, TiFe₂, Ti₂Fe, а также эвтектики различного состава.

При кристаллизации сварного шва (СШ) и последующем его охлаждении из-за различий теплофизических свойств, как правило, в зоне сплавления появляются поры и трещины, что приводит к быстрому разрушению [7, 9] непосредственно после охлаждения сварной конструкции (рис. 2). Для того чтобы избежать подобного растрескивания, предложено несколько подходов [7, 9]:

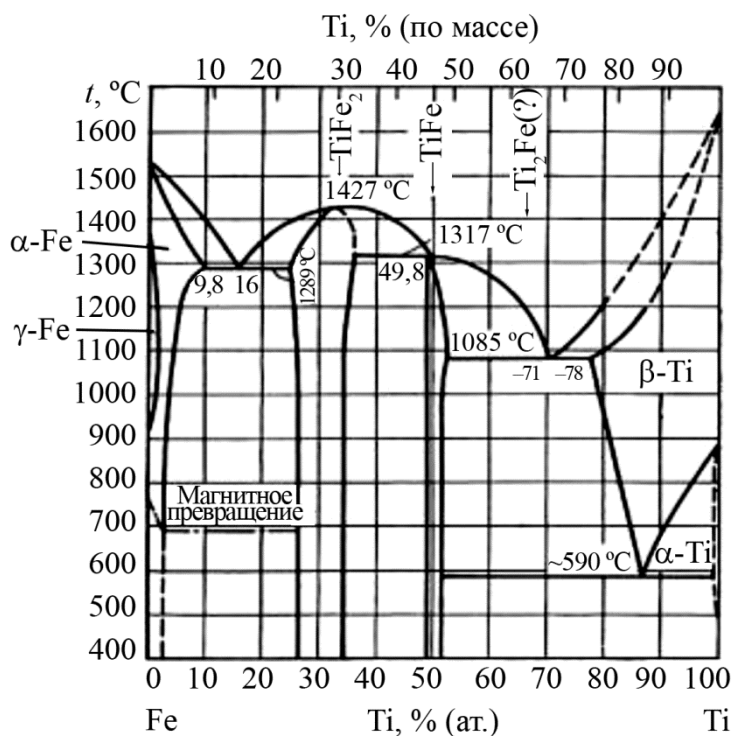
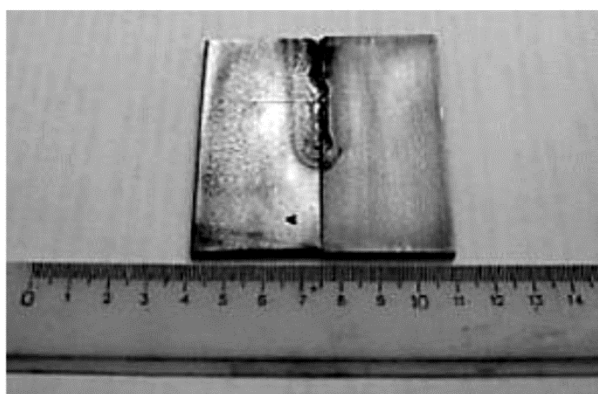
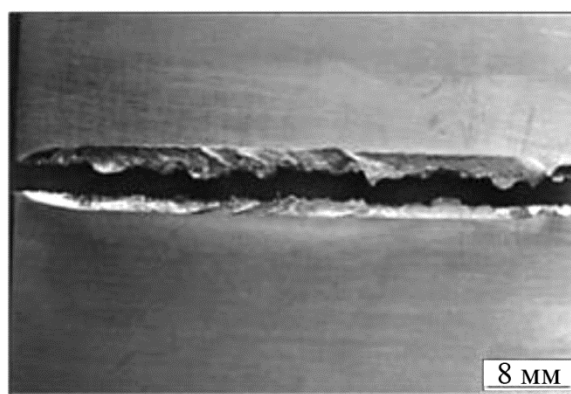


Рис. 1. Диаграмма состояния Fe-Ti [13]

- 1) избежать образования хрупких фаз за счет применения сварки трением с перемешиванием или сварки взрывом, относящихся к механическому классу сварки;
- 2) создать очень тонкий, но достаточный барьерный слой между соединяемыми материалами с очень слабым плавлением или с отсутствием такового при использовании диффузионной сварки (термомеханический класс сварки) или вакуумной пайки;
- 3) расплавить только один из материалов и создать узкую зону интерметаллидных соединений, используя смещение луча от линии стыка (сварка лазером или электронным лучом);
- 4) диспергировать хрупкие интерметаллиды в мягкой матрице, что можно осуществить при импульсной лазерной сварке или дуговой сварке [7, 9].



a



б

Рис. 2. Трещина в СШ титанового сплава ВТ1-0 и хромоникелевой стали 12Х18Н10Т, образовавшаяся сразу после лазерной сварки [14]

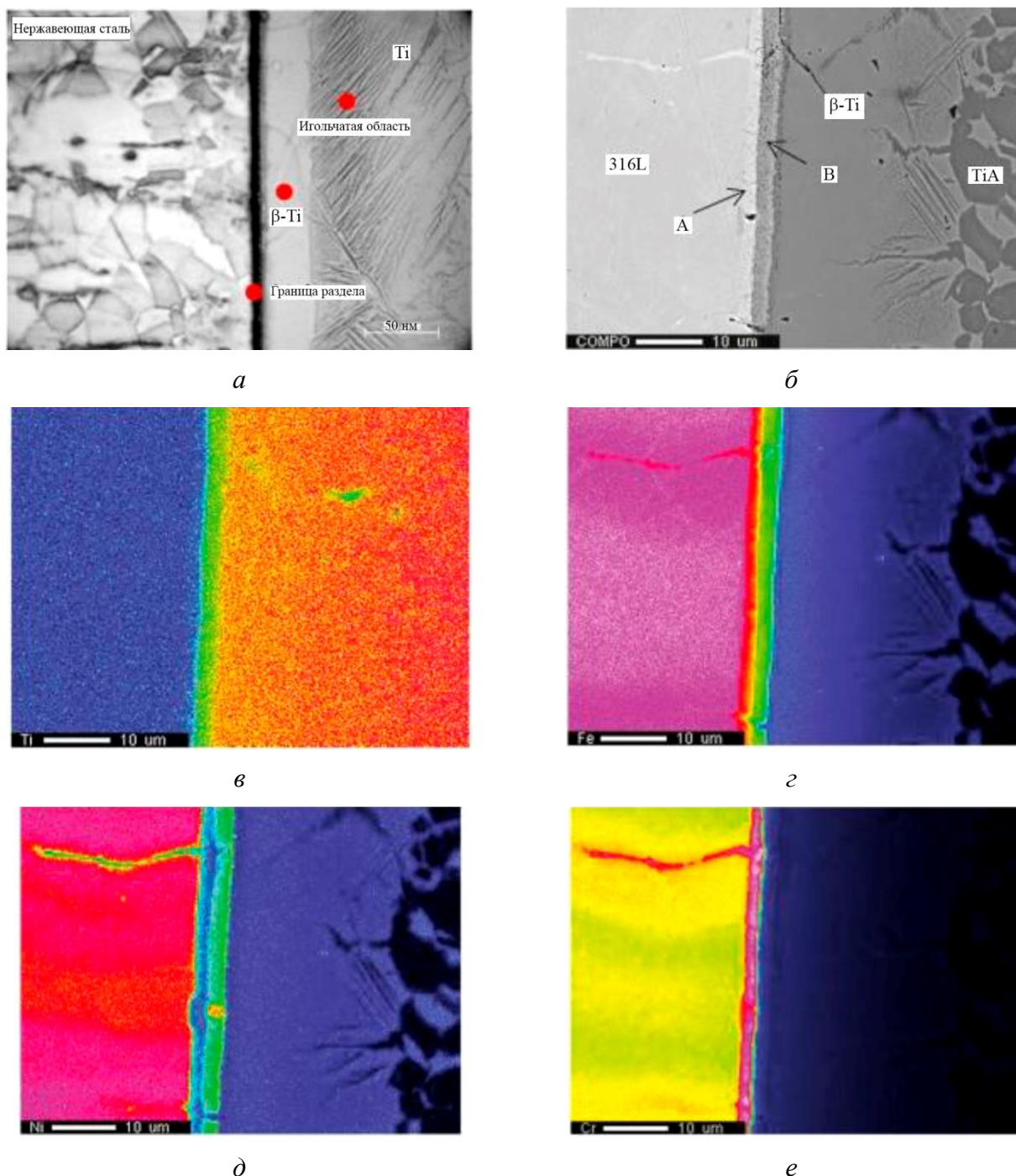


Рис. 3. Изображение СШ листов сплава Ti–6Al–4V и стали 316L, соединенных при 900 °С и давлении 1 МПа: изображение в отраженных электронах (а, б); карта распределения Ti (в); карта Fe (г); карта Ni (д); карта Cr (е) [8]

Диффузионная сварка (ДС) является первым методом, позволившим получить бездефектные соединения титановых сплавов со сталями. При ДС свариваемые поверхности сближаются главным образом из-за пластической деформации микровыступов и приповерхностных слоев, вызванной приложением внешних сжимающих напряжений и нагревом металла. Из-за отсутствия плавления и конвективного диффузионного взаимодействия СШ представляет собой слоистую структуру (рис. 3 а, б), общая толщина СШ контролируется температурой и временем сварки. В работе [8] отмечено, что процесс развития соединения

включает три этапа: непосредственное соединение поверхностей материалов, взаимная диффузия и образование хрупких интерметаллидных соединений, образование пустот Киркендалла. В результате диффузионного взаимодействия в СШ формируются две диффузионные зоны, отличающиеся по химическому составу (рис. 3 в–е). Прочность соединения на разрыв увеличивается вместе с толщиной СШ, пока не начинают образовываться частицы хрупкой фазы Fe_2Ti , а также пустоты Киркендалла. Для диффузионной сварки титанового сплава и хромоникелевой стали оптимальным является температурный интервал 800–950 °С, достаточно нагрузки около 1 МПа, которая должна действовать в течение 60–120 мин. Максимально зафиксированная прочность такого соединения не превышала $\sigma_b = 200$ МПа [8], что существенно ниже прочности титанового сплава и тем более хромоникелевой стали.

Увеличение длительности температурно-силового воздействия приводит к увеличению количества и размеров частиц интерметаллидов (рис. 4). Когда они образуют сплошные прослойки, происходит растрескивание по СШ сразу при охлаждении после ДС, как показано на рис. 2. Чрезмерно высокие температуры ДС также способствуют развитию диффузионных процессов и образованию хрупких интерметаллидов. Поскольку титану свойственно поглощение газов из воздушной атмосферы, с увеличением температуры и/или длительности выдержек при ДС возможно образование кислородсодержащих соединений, как показано на рис. 4 з. Вызывает сомнение присутствие в СШ $\alpha\text{-Fe}$, как показано на рис. 4 з, поскольку хромоникелевые стали имеют аустенитную структуру. Возможно, авторы [7] имели в виду мартенсит, что требует уточнения проведением электронно-микроскопических исследований на просвет. Обнаруженные χ - и λ -фазы представляют собой интерметаллиды: λ -фаза – это фаза Лавеса Fe_2Ti с ГПУ решеткой типа MnZn_2 , а χ -фаза – интерметаллид переменного состава типа АВ, содержащий Fe, Cr, Ti, с кубической кристаллической решеткой типа $\alpha\text{-Mn}$ [15]. Для повышения прочности соединения при ДС хромоникелевой стали и титанового сплава предложено использовать промежуточные вставки [7, 9], позволяющие избежать формирования хрупких интерметаллидов FeTi и Fe_2Ti (χ - и λ -фаз).

При *сварке трением* (СТ), трением с перемешиванием и сварке взрывом смешивание соединяемых материалов происходит в твердом состоянии и определяется пластической деформацией под действием внешней силы. Тепловложение в зону соединения значительно ниже, чем при сварке плавлением, а термический цикл значительно короче, чем при ДС. Следовательно, правильная оптимизация процесса соединения позволяет получать прочные соединения. В работе [7] приведены следующие данные по прочности соединений хромоникелевых сталей с титановыми сплавами при СТ:

1) при растяжении образцов, полученных сваркой трением технического титана и стержней из нержавеющей стали 304 под давлением 100 МПа, предел прочности σ_b составил 400 МПа, разрушение произошло в титане вдали от СШ, в котором не обнаружены интерметаллиды;

2) СТ сплава Ti–6Al–4V и низкоуглеродистой стали, выполненная под давлением 90 МПа, также привела к формированию СШ без интерметаллидов Fe–Ti, разрушение произошло в низкоуглеродистой стали вдали от соединения, $\sigma_b = 370$ МПа.

Опыт применения *сварки трением с перемешиванием* (СТП) хромоникелевой стали и титанового сплава показал, что на границе между соединяемыми материалами формируются многофазные зоны перемешивания. Поскольку при СТП происходит локальный разогрев металлов в зоне контакта с инструментом, в зоне соединения не удастся избежать образования интерметаллидных фаз разной степени дисперсности. Так, в работе [7] показано, что на границе между сталью 304L и зоной перемешивания, богатой титаном, после СТП со скоростью вращения инструмента 1100 об/мин и при линейной скорости его перемещения 50 мм/с был обнаружен интерметаллидный слой толщиной 6 мкм, содержащий частицы FeTi и Fe_2Ti . Локальное измерение термопарой показало повышение температуры во время СТП до 1120 °С. Соединение листов внахлест разрушилось на границе между сталью и зоной перемешивания,

прочность оказалась низкой и составила всего $\sigma_b = 110$ МПа. При снижении скорости перемешивания до 250 об/мин и линейной скорости движения инструмента 25–100 м/мин прочность соединений увеличилась до $\sigma_b = 230$ МПа с разрушением по титановому сплаву вблизи СШ. Минимальная линейная скорость сварки 25 мм/мин привела к формированию грубой слоистой морфологии приграничной зоны, состоящей из фаз β -Ti + ω -Ti, Ti₂Ni, FeTi + Fe₂Ti и σ -FeCr, шириной 2 мм, тогда как при скорости 50 мм/мин ширина этой зоны составила 1 мкм при том же фазовом составе. Фрикционное перемешивание внахлест титана с конструкционной сталью при скорости вращения 300 об/мин и скорости сварки 75 мм/мин позволило получить прочность $\sigma_b = 270$ МПа. Этот результат был объяснен авторами эффективным перемешиванием соединяемых материалов и образованием мелких частиц FeTi+Fe₂Ti (рис. 5). Разрушение образца при растяжении происходило по скоплениям частиц интерметаллидов в зонах перемешивания.

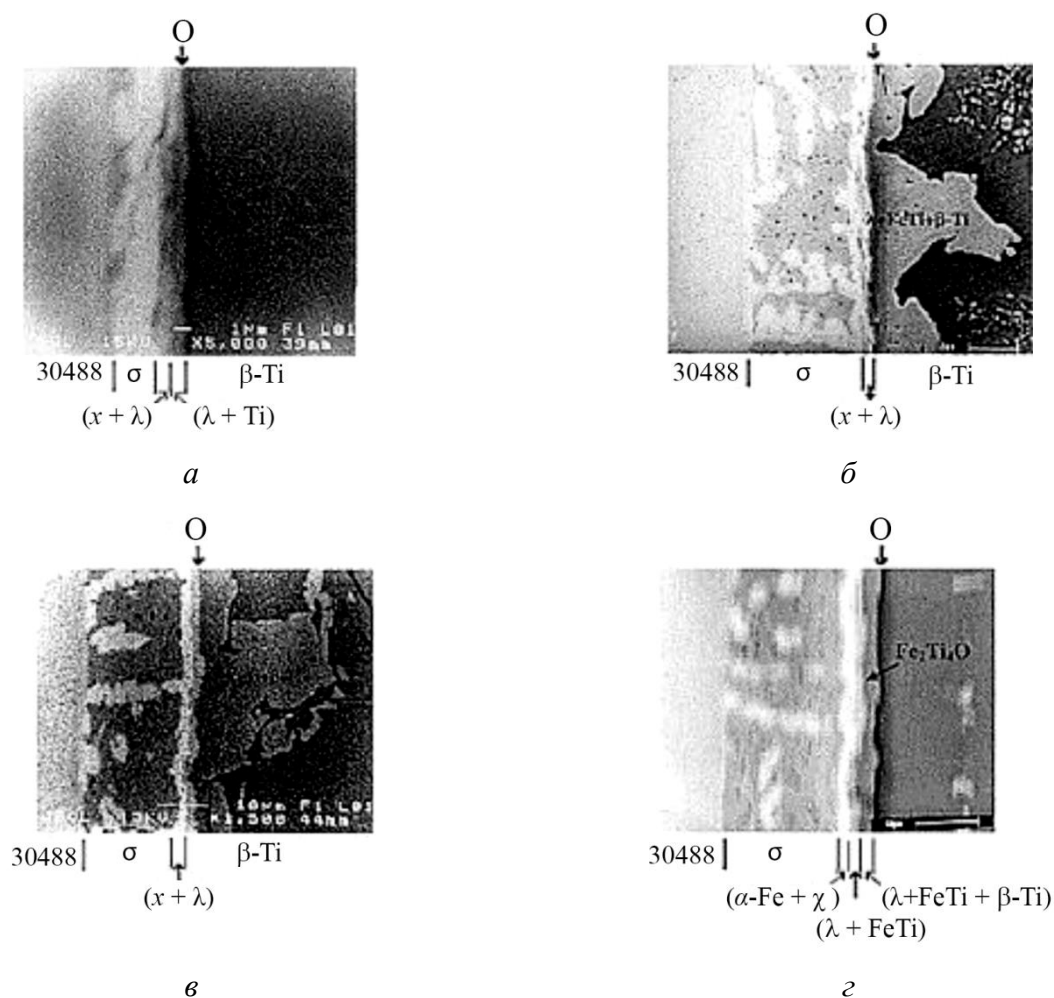


Рис. 4. Эволюция фазового состава СШ при увеличении длительности температурно-силового воздействия при ДС (изображения в отраженных электронах) [7]: 30 мин выдержки (а); 60 мин (б); 90 мин (в); 120 мин (г)

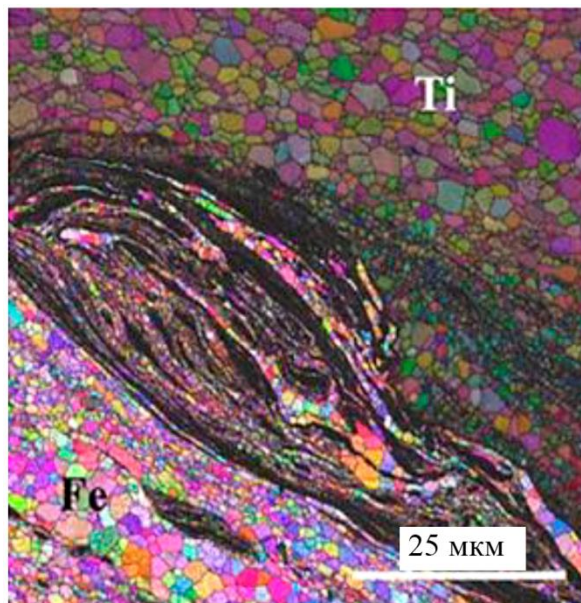


Рис. 5. Карта разориентировок зоны макросмешивания на границе стыка (СТП выполнялась в атмосфере аргона с использованием сварочного инструмента из твердого сплава WC–Co, скорость вращения – 300 об/мин, линейная скорость сварки – 75 мм/мин) [7]

Метод СТП используется в основном для соединения мягких и пластичных материалов, таких как алюминиевые и магниевые сплавы, поскольку при соединении более твердых материалов, таких как титановые сплавы и хромоникелевые стали, инструмент быстро будет выходить из строя вследствие интенсивного износа, поэтому его изготавливают из дорогостоящих твердых сплавов. Кроме того, данный метод применим только к массивным изделиям, и он не может быть использован при стыковой сварке тонкостенных конструкций.

Сварка взрывом (СВ) заключается в косом высокоскоростном соударении пластин [16]. Необходимая для достижения высокой скорости энергия передается соединяемым телам газообразными продуктами реакции, образующимися в процессе детонации взрывчатых веществ. Для разгона заготовок используются магнитно-импульсные и другие устройства. В НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей» разработаны принципиальная технология и технические условия изготовления крупногабаритных биметаллических плит «сталь – титан» сваркой взрывом в среде защитных газов для производства крупногабаритных биметаллических полуфабрикатов площадью не менее 20 м² [17]. Применяется эта технология преимущественно для получения биметаллических листовых материалов из титана марок ВТ1-0, ВТ1-00 и стали марок 09Г2С, 20К, 22К, 10ХСНД, а также 08Х18Н10Т, 08Х17Н13М2Т, 12Х18Н10Т. Толщина титана, как правило, составляет 5–15 мм. Эта конкурентоспособная, экспортоориентированная технология мирового технического уровня обеспечивает получение максимальной сплошности соединения слоев разнородных материалов с допустимым дефектом площадью не более 1 см², при этом предел прочности биметаллического соединения на отрыв составляет не менее 200 МПа.

Таким образом, получить бездефектное неразъемное соединение стали и титанового сплава удастся такими методами, как диффузионная сварка, сварка трением с перемешиванием и сварка взрывом. Однако зачастую прочность таких соединений невелика ($\sigma_b \leq 200$ МПа). Кроме того, использование этих методов требует определенных размеров и формы заготовок, они применимы только к массивным изделиям. Стыковая сварка листовых заготовок этими методами невозможна для тонкостенных конструкций, поскольку будет приводить к их деформации и формоизменению.

3. Сварка хромоникелевой стали с титановыми сплавами с использованием промежуточных вставок

Многочисленные исследования показали [7, 14], что использование промежуточной вставки в качестве третьего материала может существенно улучшить качество сварного соединения титанового сплава и хромоникелевой стали за счет создания новых, менее хрупких фаз (рис. 6). Без использования промежуточного слоя максимальные значения прочности достигали всего 290 МПа, а с промежуточной вставкой эти значения увеличились до 400 МПа. К первому виду вставок относятся металлы или их сплавы, имеющие хорошую кристаллографическую и теплофизическую совместимость с обоими соединяемыми материалами, близкую температуру плавления, что прежде всего относится к меди [9].

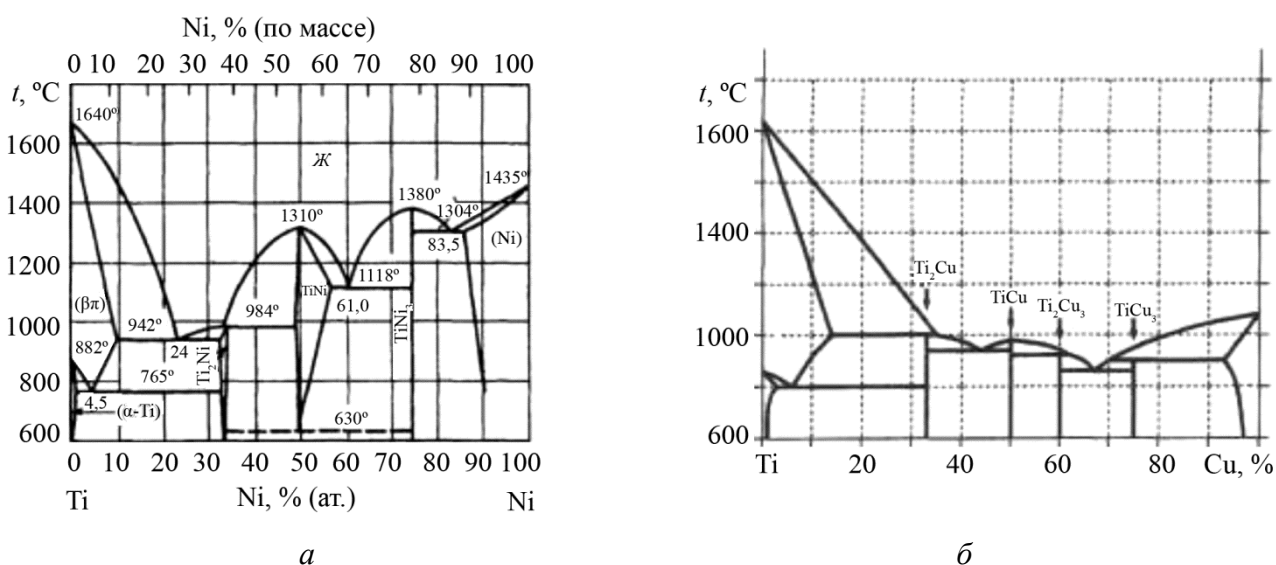


Рис. 6. Диаграммы состояния систем Ti–Ni (а) и Ti–Cu (б) [13]

Второй вид вставок – использование металла с высокой температурой плавления для предотвращения прямого взаимодействия между соединяемыми материалами. В случае пары «титан – сталь» список металлов, которые не образуют хрупких интерметаллических фаз с титаном, довольно короткий и содержит в основном дорогостоящие материалы с высокой температурой плавления: V, Nb, Ta, W, Zr, Mo, Hf (рис. 7).

Большинство из них не обладает такой же кристаллической решеткой, как у хромоникелевых сталей, что также побудило некоторых исследователей изготавливать слоистые промежуточные вставки путем простой сборки фольг или путем создания градиентов состава с первым слоем, совместимым с титаном, и последним слоем, совместимым со сталью [18, 19]. Из-за высокой стоимости металлов, совместимых с титаном, многими исследователями предпочтение отдается промежуточным вставкам первого типа – из металлов, образующих интерметаллидные фазы с титаном, а именно Cu, Ni, Al, Ag и их комбинации [7]. Полученные в этом случае интерметаллидные фазы менее хрупкие, чем Лавес-фаза Fe_2Ti . Поскольку титановые сплавы и стали имеют довольно высокую прочность на разрыв, достичь прочности соединения, близкого хотя бы к одному из них, довольно сложно. Наибольшее количество работ посвящено сварке с применением промежуточной медной вставки. Это обусловлено несколькими факторами. Во-первых, медь имеет гранецентрированную кубическую (ГЦК) кристаллическую решетку, которая хорошо сопрягается с ГЦК-решеткой аустенита стали, а также с ОЦК-решеткой $\beta\text{-Ti}$, являющегося основной структурной составляющей всех титановых сплавов при температурах выше 882 °С. Во-вторых, медь плавится при более низкой температуре, что позволит ограничить тепловложение и, соответственно, степень расплавления

ния соединяемых материалов в сварочной ванне. В-третьих, коэффициент поглощения лазерного излучения имеет промежуточное значение между сталью и титановым сплавом [20]. Сравнительный анализ использования промежуточных вставок при соединении титановых сплавов со сталями разными способами термической сварки приведен в таблице.

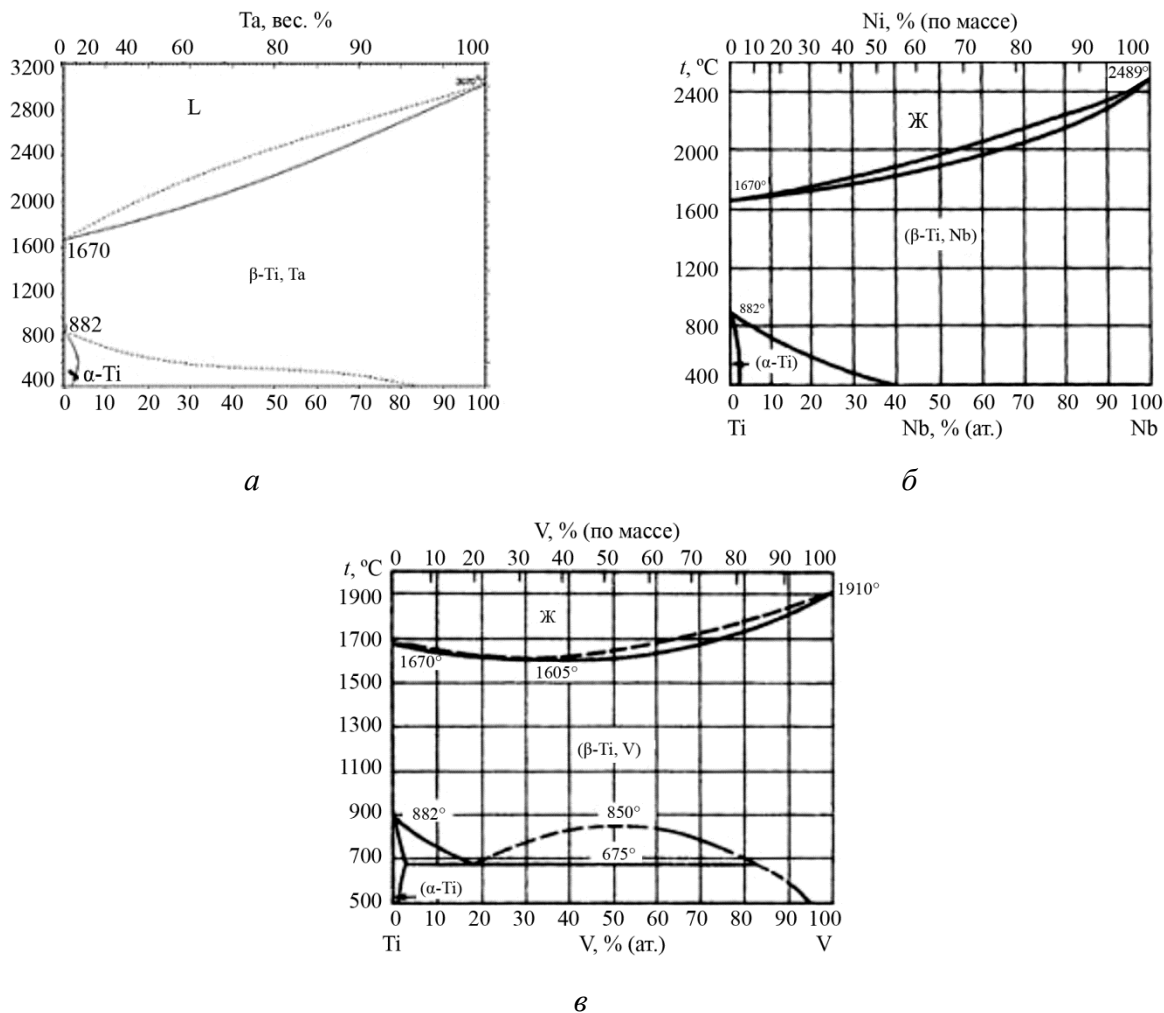


Рис. 7. Диаграммы состояния систем Ti-Ta (а), Ti-Nb (б) и Ti-V (в) [13]

В работе [26] показано, что при использовании вставки Ni кристаллизация СШ происходит по дендритному механизму, поэтому прочность соединения оказывается невысокой ($\sigma_B \leq 160$ МПа). Наиболее перспективной с точки зрения прочности соединения хромоникелевых сталей и титановых сплавов представляется медная вставка. Наиболее детально структура и прочность таких соединений исследованы в работах [24, 27, 28]. Так, в работе [27] представлены результаты сравнительного анализа влияния режимов лазерной и электроннолучевой сварки на структуру, фазовый состав и прочность полученных соединений пластин толщиной 2 мм из аустенитной нержавеющей стали AISI 316L (69 ат. % Fe, 20 ат. % Cr и 7,2 ат. % Ni) и α - β -титанового сплава Ti6Al4V (87,6 ат. % Ti, 8,8 ат. % Al и 3,6 ат. % V) через промежуточные пластины толщиной 0,5 мм из меди чистой 99,9 ат. %. Условия сварки были выбраны таким образом, чтобы обеспечить минимальное плавление сплава Ti6Al4V, а также обеспечить обоими методами сварки близкие энергетические затраты. Электроннолучевая сварка выполнялась с использованием сварочного аппарата с максимальной мощностью 6 кВт и диаметром пятна 0,4 мм. Параметры сварки: ток электронного пучка составил 40 мА, мощность – 1 кВт, ускоряющее напряжение – 25 кВ, скорость сварки – 1,8 м/мин. Электронный луч был сфокусирован на поверхности стыко-

вого соединения и расположен на границе «медь – сталь». Для импульсной лазерной сварки использовался твердотельный лазер Nd:YAG при следующих параметрах сварки: мощность излучения 1,5 кВт, длительность импульса 14 мс, частота лазера 12 Гц, скорость сварки 0,32 м/мин. Лазерный луч был расположен на границе «медь – сталь». В качестве защитного газа использовали аргон с общим расходом 15 л/мин. Морфология полученных сварных соединений существенно отличается (рис. 8). Авторы исследования [27] считают, что для электронно-лучевой сварки высокие градиенты охлаждения, связанные с относительно медленной конвекцией расплава, приводят к образованию четко различимых областей, богатых медью и сталью (рис. 8 а), тогда как для импульсной лазерной сварки наблюдается более интенсивное перемешивание в результате колебательного ввода энергии (рис. 8 б).

Таблица

Обзор литературных данных по структурному состоянию сварных соединений хромоникелевых сталей с титановыми сплавами с промежуточными вставками

№	Тип соединения	Тип вставки	Способ сварки	Тип интерметаллидов	Результаты	Ссылка
1	AISI 316 с NiTi	Ta	Волоконный лазер	TiCr ₂ , NiFe, Ni ₃ Ti, TiFe ₄ , CrFe, TaCr ₂ , Ni ₃ Ta, Ti ₄ Cr, TiFe	Добавление тантала способствует уменьшению хрупких межфазных границ в соединении. Увеличение толщины тантала приводит к снижению прочности соединения.	[21]
2	AISI 304 с NiTi	Ni	Импульсный лазер	Ti-Fe, Ni ₃ Ti, Ni ₄ Ti ₃ , Ni ₃ Ti ₂ , Ni ₃ Ti	Интерметаллиды никеля помогают контролировать холодное растрескивание и обеспечивают стабильность сварных швов.	[22]
3	NiTi с AISI 304 (стыковое)	Ni	Сварка вольфрамовым электродом в инертном газе	Ni ₃ Ti ₂ , Ni ₄ Ti ₃ , Ni ₃ Ti	Промежуточная вставка в виде никеля способствует предотвращению холодного растрескивания. Сварка неплавящимся электродом в среде защитных газов помогает достичь более глубокого проникновения за 1 проход, но наблюдается большая ЗТВ.	[23]
4	AISI 316L с Ti (стыковое)	Cu	Электронно-лучевая сварка	TiFe ₂ , TiFe, CuTi, CuTi ₂	Смещение положения луча в сторону титана обеспечивает лучшую свариваемость по сравнению с положением на центральной линии или смещением в направлении нержавеющей стали.	[24]
5	NiTi с AISI 316L (стыковое с двойным проходом)	Cu	Твердотельный лазер	TiFe ₂ , TiFe, TiNi ₃ , TiNi, Ti ₂ Ni, TiCu, Ti ₃ Cu ₄ , Ti ₂ Cu ₃ , TiCu ₄ , Ti ₂ Cu	Образуется широкий сварной шов с малой долей хрупких составляющих и высокими значениями остаточных напряжений.	[25]

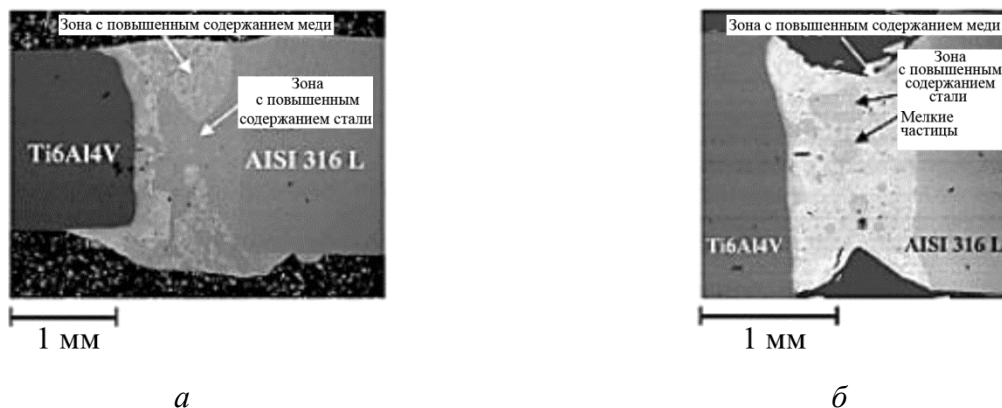


Рис. 8. Макроструктура СШ, полученных электронным лучом (а) и лазером (б) [27]

Вставка медной прослойки толщиной 0,5 мм позволяет уменьшать образование хрупких фаз Лавеса Ti_2Fe и Ti_2Cr , но не подавляет его. В центральной части СШ области меди перемешаны с областями α -Fe (рис. 9 а). Те же фазы составляют зону на границе «сталь – медь», но с преобладанием областей α -Fe (рис. 9 б). При лазерной сварке расплавленная медь глубоко проникает в зону на границе Cu/Ti, которая имеет слоистую морфологию и содержит частицы $CuTi_2$ и $FeTi$, расположенные между прослойками α -Ti (рис. 9 в). Авторы работы [27] считают, что в материале сварного шва происходит полиморфное превращение γ -Fe $\rightarrow$ α -Fe.

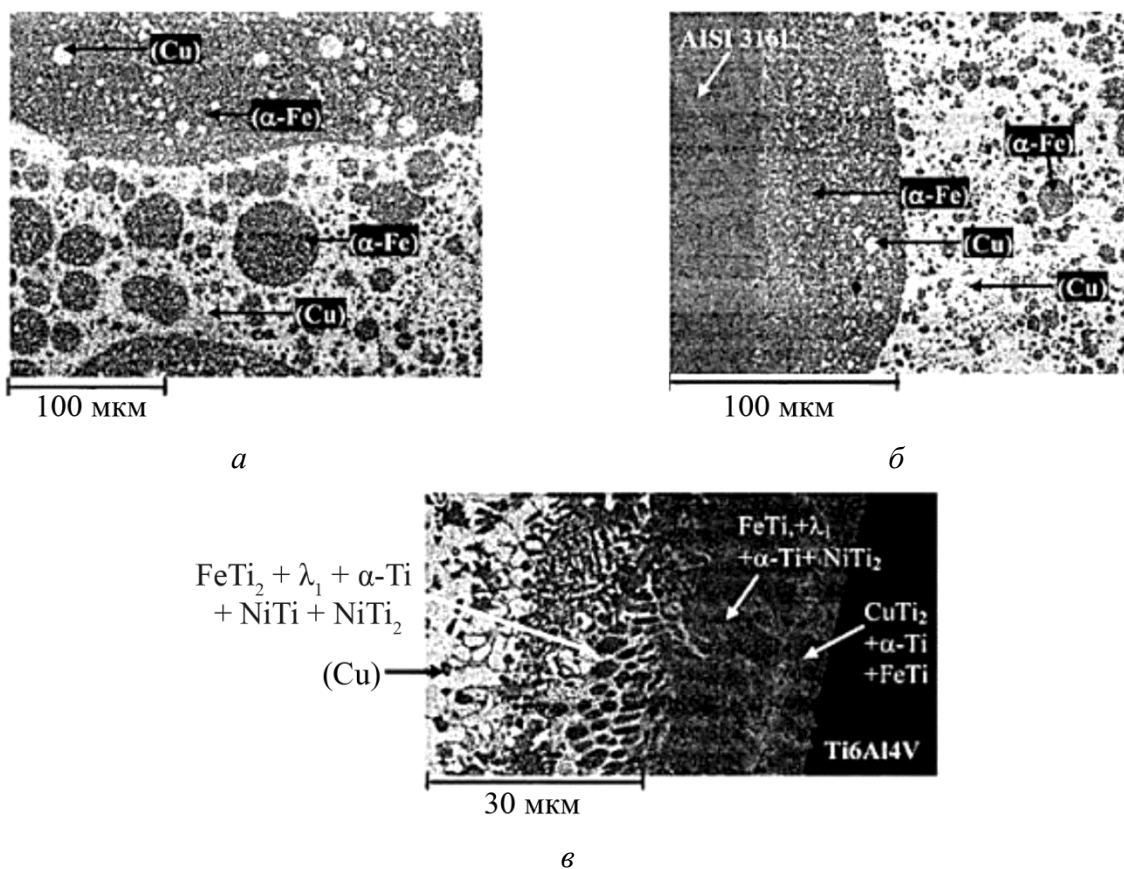


Рис. 9. Микроструктура зон СШ, полученного импульсным лазером: центральная зона переплава (а); граница «сталь – медь» (б); граница Ti/Cu (в) [27]

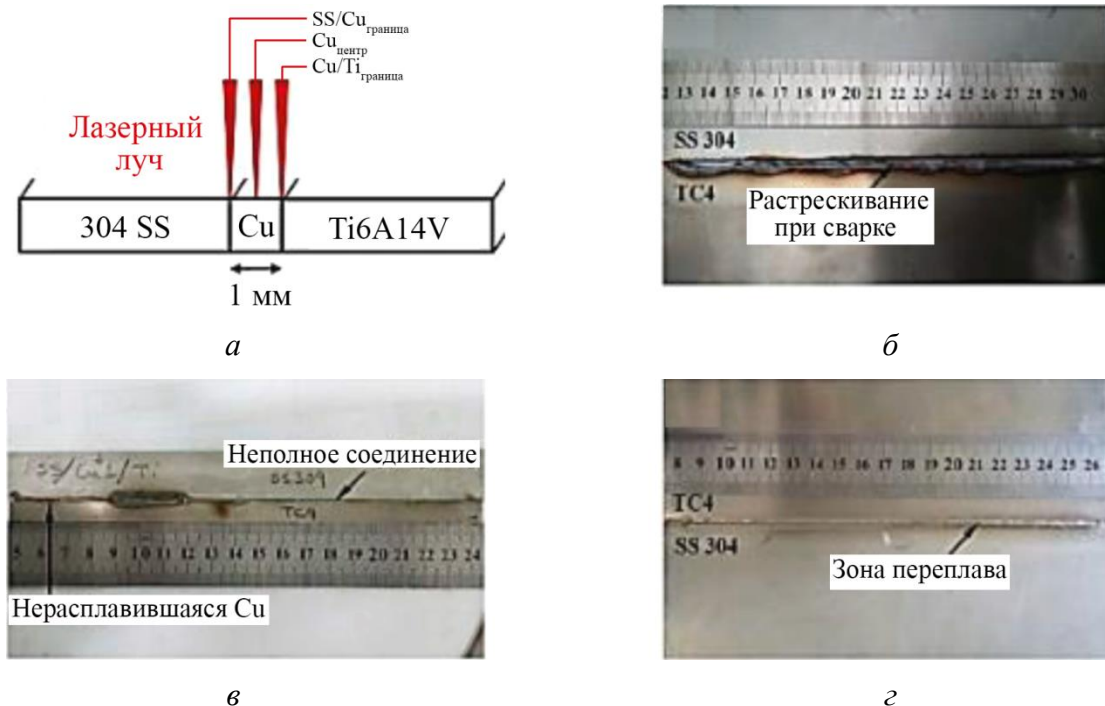


Рис. 10. Схема расположения фокального пятна относительно медной пластины (а) и внешний вид СШ, полученных при мощности источника лазерного излучения 3 кВт: фокальное пятно расположено на границе Cu/Ti (б); пятно расположено в центре пластины Cu (в); пятно расположено на границе «медь – сталь» (г) [28]

В работе [28] исследовано влияние смещения фокального пятна относительно медной вставки толщиной 1 мм на прочность сварных соединений листов толщиной 2 мм титанового сплава Ti6Al4V и стали 304 (рис. 10 а). Сварку проводили волоконным лазером с максимальной мощностью 10 кВт. При расположении фокального пятна диаметром 0,6 мм на границе Cu/Ti после охлаждения сразу же образуется трещина (рис. 10 б).

Атомы Fe и Cr во всех образцах интенсивно диффундировали со стороны стали в СШ (рис. 11). Причем с увеличением мощности источника наблюдали лучшее перемешивание расплава и увеличение растворения в нем титана, поступившего из титанового сплава.

По мере увеличения мощности лазера до 4 кВт прочность исследованных соединений увеличилась (рис. 12). Однако, когда мощность лазера превышает 4 кВт, предел прочности начинает уменьшаться. Авторы работы [28] объясняют это отсутствием частиц интерметаллидов FeTi и Fe₂Ti вблизи границы Ti/Cu, там обнаружены только интерметаллиды системы Ti-Cu (куприды), которые считают менее хрупкими. Максимальная прочность соединения «сталь – медь – титан» составила 300 МПа.

Выполненные в 2019–2022 годах в ИМАШ УрО РАН исследования показали, что кроме изменения мощности источника лазерного излучения, скорости сварки и местоположения фокального пятна относительно медной вставки огромную роль играет заглубление фокуса относительно верхней поверхности соединяемых стали и титанового сплава. Первоначально влияние заглубления фокуса было определено по результатам моделирования термического процесса сварки листов стали 12X18H10T и сплава BT1-0 через медную вставку, выполненного В. И. Исаевым, А. Н. Черепановым и В. П. Шапеевым [14, 29]. Полученные расчетные изотермы плавления соединяемых материалов при различных заглублениях фокуса и местоположениях фокального пятна относительно медной пластины показали, что при заглублении фокуса до нижней поверхности пластины при расположении фокального пятна на границе «сталь – медь» не происходит расплавление титана. Следовательно, соединение

титановой пластины с медной вставкой осуществляется за счет пайки, а значит, в СШ не могут образоваться интерметаллиды FeTi и Fe_2Ti . Сравнительный анализ химического состава СШ, полученных при различном расположении фокуса относительно верхней поверхности соединяемых листов, показал, что, действительно, при заглублении фокуса на 3 мм и расположении фокального пятна на границе «сталь – медь» удается достичь минимального содержания Ti в материале СШ (менее 1,5 масс. %) [30–32]. Это обеспечивает минимальное образование интерметаллических соединений FeTi и Fe_2Ti в СШ. Анализ структуры зон полученного сварного соединения методом просвечивающей электронной микроскопии показал, что наноразмерные частицы Fe_2Ti гомогенно выделились в пересыщенном твердом растворе на основе меди при охлаждении СШ (рис. 13 а, б). В областях существования пересыщенного твердого раствора на основе $\gamma\text{-Fe}$ образовались наноразмерные частицы Cu_4Ti (рис. 13 в), а также кристаллы мартенсита (рис. 13 г).

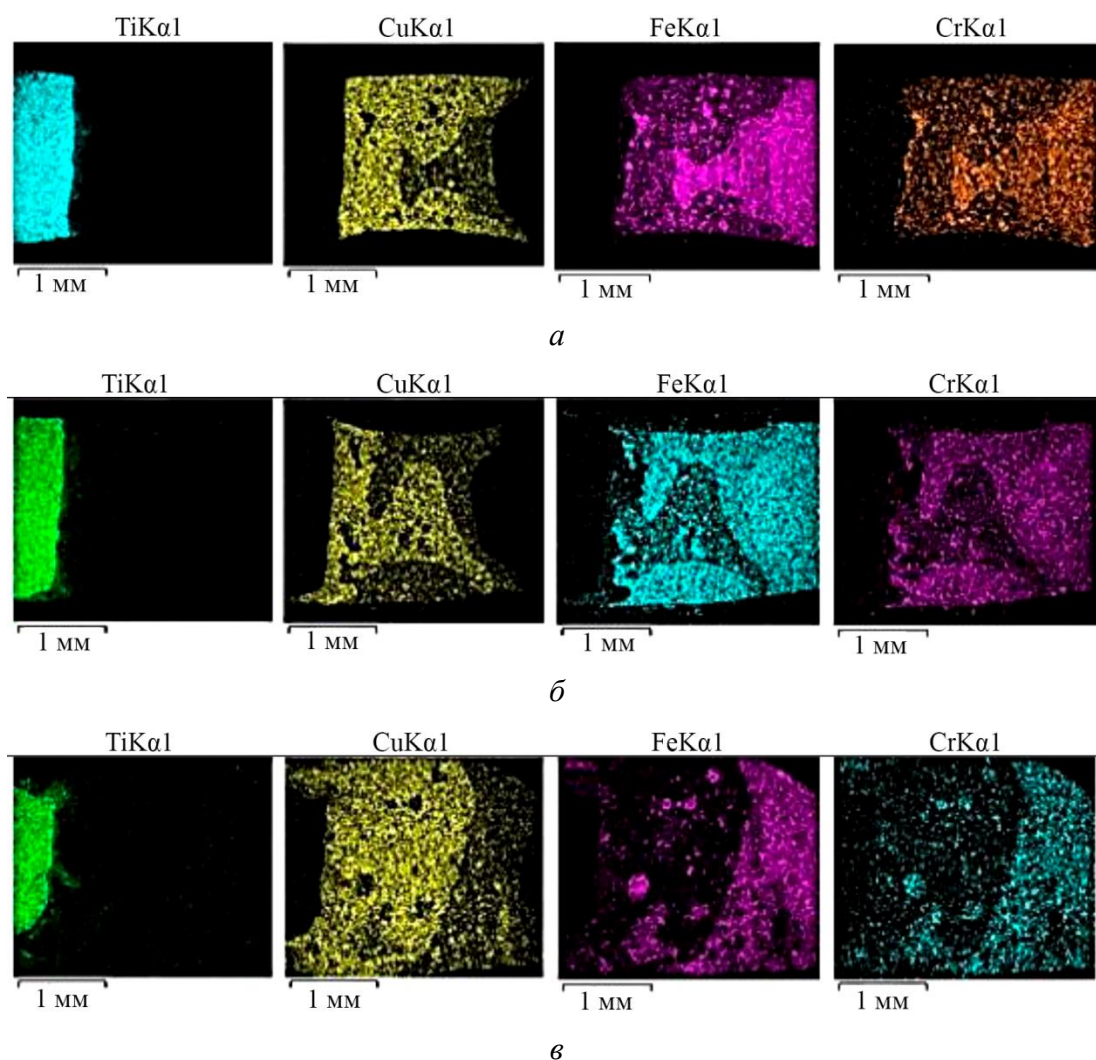


Рис. 11. Распределение элементов в сварных швах, полученных при разной мощности источника: 3 кВт (а); 4 кВт (б); 6 кВт (в) [28]

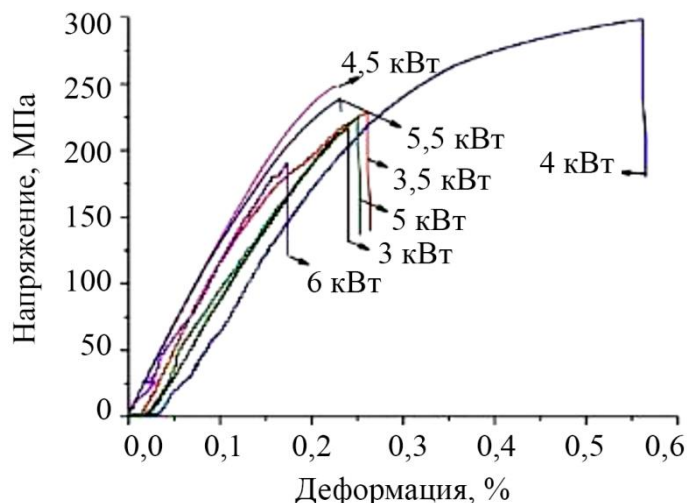


Рис. 12. Диаграммы растяжения образцов со сварными швами, полученными с разной мощностью источника [28]

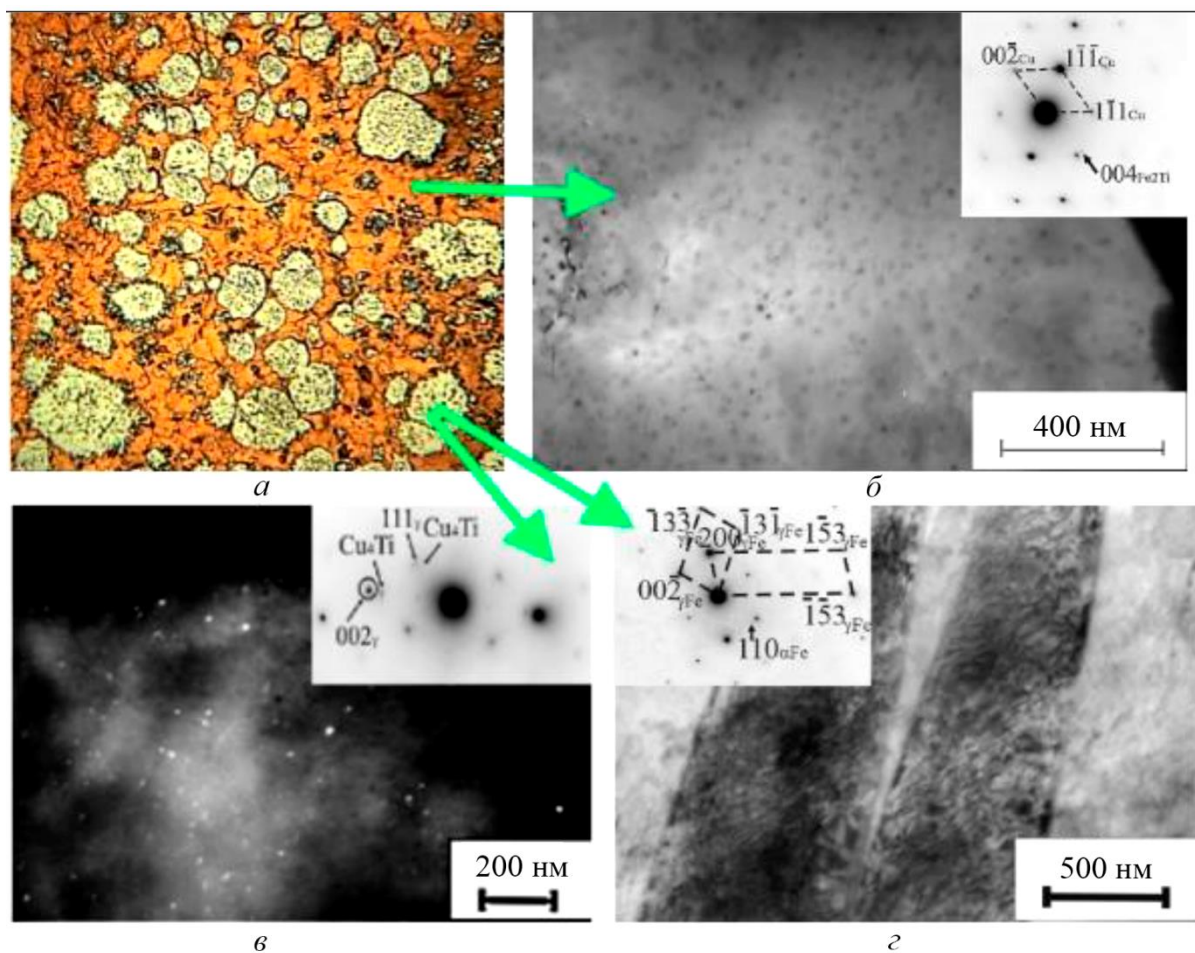


Рис. 13. Микроструктура центральной зоны СШ, полученного при заглублинии фокуса на 3 мм: изображение в оптическом микроскопе (а); наноразмерные частицы в твердом растворе меди (б); темнопольное изображение в рефлексе частиц Cu_4Ti в $\gamma\text{-Fe}$ (в); кристаллы мартенсита в $\gamma\text{-Fe}$ (г) [30]

Прочность такого соединения $\sigma_b = 515$ МПа, а разрушение образцов произошло по центральной части СШ. Испытания прочности сварного соединения на растяжение проводятся в соответствии с ГОСТ 6996-66, при этом сварное соединение расположено в центральной части образца, прочность каждого из соединенных материалов определяется на отдельных однородных и монолитных образцах без сварных соединений в соответствии с требованиями ГОСТ 1497-84. Таким образом, для формирования сварного соединения листов стали 12Х18Н10Т и титанового сплава ВТ1-0 с промежуточной медной вставкой с прочностью на уровне титанового сплава следует обеспечить условия для формирования нанодисперсных интерметаллидов в твердых растворах. Это достигается интенсивным конвективным перемешиванием расплава в сварочной ванне, что обеспечивает заглубление фокуса на 3 мм. Было также показано, что следует избегать дендритной кристаллизации материала СШ [31]. При использовании CO_2 -лазера постоянного действия требуемую структуру позволяет получить следующий режим сварки: мощность источника 2,2–2,4 кВт, скорость сварки 1 м/мин, фокальное пятно расположено на границе «сталь – медь», фокус заглублен на 3 мм.

4. Использование композиционных вставок при сварке хромоникелевых сталей с титановыми сплавами

Как уже отмечалось, некоторые исследователи использовали слоистые промежуточные вставки путем простой сборки фольг или путем создания слоистых композитов, в которых первый слой совместим с титаном, а последний – со сталью, промежуточные слои обеспечивали совместимый переход [18, 19]. Например, авторы работы [33] исследовали соединение листов стали 12Х18Н10Т и сплава ВТ1-0 с помощью композиционной вставки, изготовленной сваркой взрывом четырех пластин из разных металлов: Ti + Nb + Cu + сталь. Толщины пластин: титан – 4 мм, Nb – 0,2 мм, Cu – 0,1 мм, сталь – 4 мм. Размер пластин 110×58 мм. После сварки взрывом осуществлялась обрезка и зачистка пластин. Вставка представляла собой вырезанную в поперечном направлении композитной пластины полосу шириной 3 мм и длиной 50 мм (обозначена А на рис. 14 а). Поверхности соединяемых материалов зачищали и обезжиривали, затем вставку помещали между соединяемыми пластинами титана и стали и производили сварку стальной пластины со стальной частью вставки, а титановой пластины – с титановой частью вставки. В результате были получены соединения, макроструктура которых представлена на рис. 14.

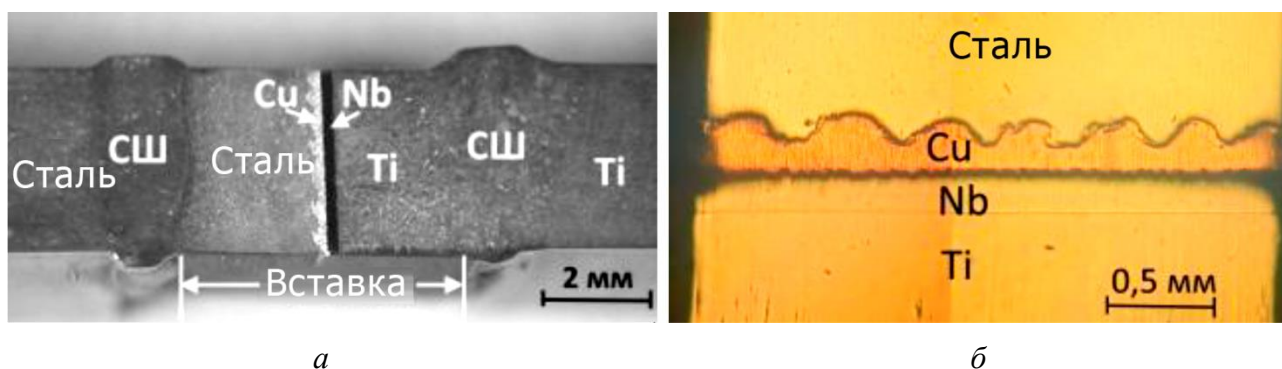


Рис. 14. Макроструктура соединения с композитной вставкой [33]

На границе «сталь – медь» сформировалась диффузионная зона толщиной 40 мкм, на границе Nb/Cu толщина диффузионной зоны составила 25 мкм, а на границе Nb/Ti – около 30 мкм. При испытаниях образцов с такими соединениями на растяжение разрушение происходило по волнистой границе «сталь – медь» (рис. 15 а–в) или по границе Nb/Ti (рис. 15 г, д). Максимальная прочность соединения $\sigma_b = 510$ МПа соответствовала 100-процентному вяз-

кому разрушению образцов по границе «сталь – медь». Когда большая часть поверхности излома образцов разрушилась по механизму хрупкого скола, как показано на рис. 15 *з, д*, временное сопротивление σ_B составило 456 МПа.

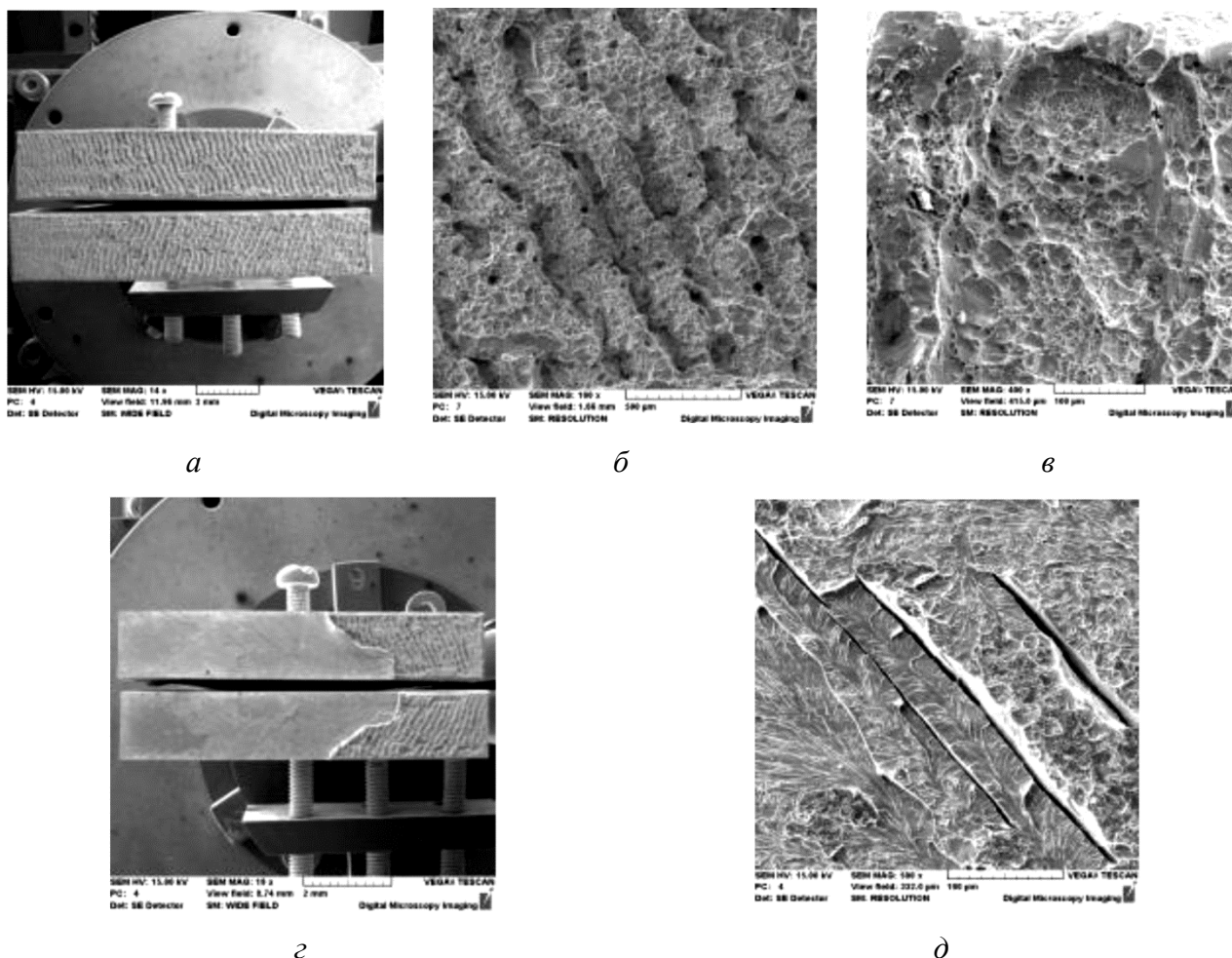


Рис. 15. Макро- (*а, з*) и микрорельеф (*б, в, д*) поверхности разрушения образцов сварного соединения с композитной вставкой; разрушение по границе с медной пластиной (*а, б, в*); хрупкое разрушение по границе Nb/Ti (*з, д*) [33]

Интересную композицию в качестве промежуточной вставки предложили авторы работы [18]. Они исследовали структуру и прочность сварных соединений листов стали AISI 304 и титанового сплава марки TC4 толщиной 2 мм через промежуточную композиционную вставку CuCrZr/V. Пластина медного сплава CuCrZr имела размеры $60 \times 5 \times 2$ мм, а прослойки V были нанесены методом прямого лазерного наращивания (LMD) на торцевые поверхности пластин титанового сплава. При использовании данного метода изделие формируется из порошка, подаваемого сжатой газопорошковой струей в зону наращивания. Перед напылением V поверхность листов сплава TC4 была тщательно очищена спиртом для удаления жира, а затем отполирована для удаления оксидной пленки. Сравнивали СШ с разной толщиной слоев V, нанесенных в несколько приемов: 0,4, 0,8 и 1,2 мм. Затем проводили лазерную сварку пластин стали и медного сплава CuCrZr, а также сплава CuCrZr с напыленным на торец титанового сплава слоем ванадия, нанесенного на подложку из сплава TC4 с использованием импульсного лазера TruDisk с максимальной мощностью 1 кВт. Для фокусировки луча на поверхности образца использовалась линза с фокусным расстоянием 200 мм. Диаметр лазерного луча в точке фокусировки составлял 0,4 мм, а скорость сварки составляла 1,0 м/мин.

В качестве защитной атмосферы использовали аргон. В результате получили соединения, макроструктура которых показана на рис. 16. Максимально прочное соединение ($\sigma_b = 418$ МПа) было получено при трехслойном напылении порошка ванадия общей толщиной 1,2 мм. Разрушение в этом случае произошло по середине пластины CuCrZr. При меньшей толщине напыленных слоев ванадия разрушение происходило по диффузионной зоне между пластиной CuCrZr и слоем V.

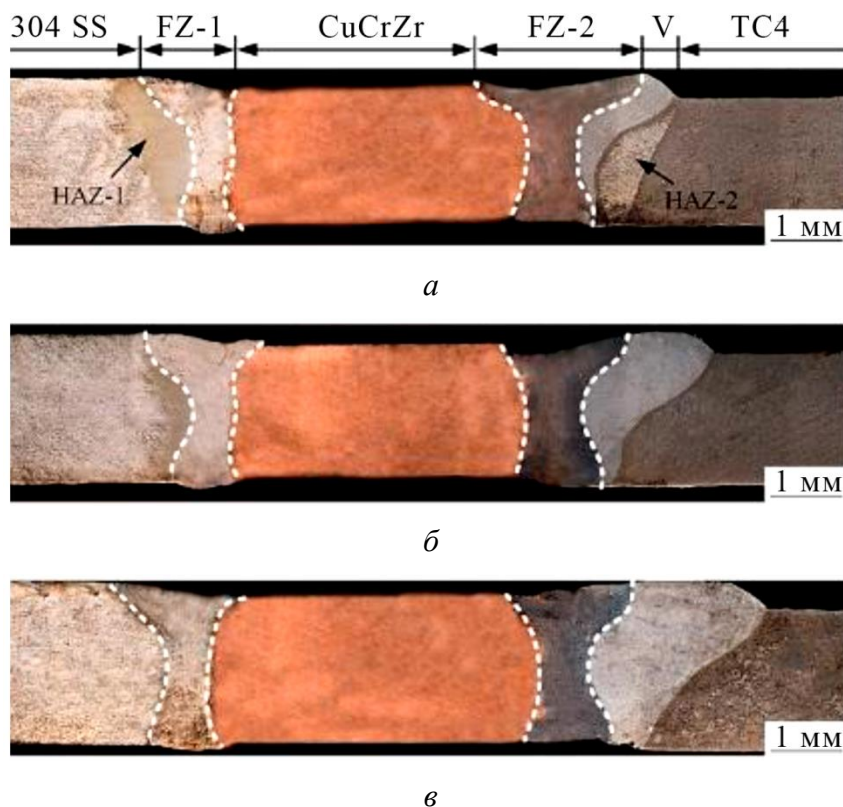


Рис. 16. Поперечные сечения сварных соединений 304 SS/TC4 с композиционной вставкой CuCrZr-V: толщина вставки V – 0,4 мм (а); 0,8 мм (б); 1,2 мм (в)

5. Заключение

Для соединения хромоникелевых сталей с техническими титановыми сплавами применяются диффузионная, лазерная, электронно-лучевая сварки, а также сварка трением, трением с перемешиванием и сварка взрывом. Сварки трением, трением с перемешиванием и взрывом имеют серьезные ограничения по размерам и геометрии соединяемых материалов. Наиболее универсальной представляется сварка лучом лазера.

Анализ литературных данных показал, что проблеме образования хрупкой зоны на границе соединяемых материалов удастся решить применением промежуточных вставок, таких как Cu, Zr, Ag, Ni, Zn, V, Nb, Mo, Ta, Hf. При этом формирование только твердых растворов в сварных швах не позволяет получить прочность соединений выше 200 МПа, что существенно ниже прочности технического титана ($\sigma_b = 375\text{--}420$ МПа). Образование интерметаллидных частиц размерами 50–100 мкм, хаотично распределенных в объеме сварного шва, оказывает упрочняющее действие.

Максимально высоких значений прочности соединений хромоникелевой стали и технического титана удастся получить двумя способами: 1) формированием при лазерной сварке с использованием медной промежуточной вставки наноразмерных частиц интерметаллидов в сварном шве; 2) использованием композитных вставок Cu/Nb, первоначально получен-

ных сваркой взрывом и соединенных лазером с основными материалами. В обоих случаях прочность сварных соединений достигает 510–515 МПа.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМАШ УрО РАН по теме № 124020700063-3.

Литература

1. Справочник по лазерной сварке / под ред. С. Катаяма ; пер с англ. под ред. Н. Л. Истоминой. – М. : – Техносфера, 2015. – 704 с.
2. Li Y. J, Wang I., Liu P. Weld of dissimilar metals and their applications in industries. – Beijing : Chemical Industry Press, 2004. – 208 p.
3. A review on dissimilar metals' welding methods and mechanisms with interlayer / Y. Fang, X. Jiang, D. Mo, D. Zhu, Z. Luo // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2019. – Vol. 102. – P. 2845–2863. – DOI: 10.1007/s00170-019-03353-6.
4. Звездин В. В., Рахимов Р. Р. Исследование процесса лазерной сварки разнородных металлов // Социально-экономические и технические системы исследование, проектирование, оптимизация. – 2017. – № 2 (75). – С. 16–23.
5. Опыт производства крупногабаритного биметалла титан-сталь для трубных досок конденсаторов АЭС / Л. Б. Первухин, И. В. Денисов, Т. А. Шишкин, О. Л. Первухина // Известия ВолгГТУ. – 2020. – № 11 (246). – С. 37–40. – DOI: 10.35211/1990-5297-2020-11-246-37-40.
6. Kah P., Shrestha M., Martikainen J. Trends in joining dissimilar metals by welding // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 440. – P. 269–276. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.440.269.
7. Tomaschuk I., Sallamand P. Metallurgical strategies for the joining of titanium alloys with steels // Advanced Engineering Materials. – 2018. – Vol. 20 (6). – P. 1700764. – DOI: 10.1002/adem.201700764.
8. A review on diffusion bonding between titanium alloys and stainless steels / D-f. Mo, D-f. Song, Y-j. Fang, X-s. Jiang, C. Q. Luo, M. D. Simpson, Z-p. Luo // Advances in Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 2018. – 8701890. – P. 1–15. – DOI: 10.1155/2018/8701890.
9. Сварка разнородных металлов и сплавов / В. Р. Рябов, Д. М. Рабкин, Р. С. Курочки, Л. Г. Стрижевская. – М. : Машиностроение, 1984. – 239 с.
10. Структурные исследования сварных швов, полученных методом стыковой контактной сварки заготовок из разнородных сталей / А. А. Никулина, А. А. Батаев, А. И. Смирнов, В. Г. Буров // Обработка металлов (Технология. Оборудование. Инструменты). – 2010. – № 2 (47). – С. 24–28.
11. СТО 00220368–022–2–7.
12. Зиновьев В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. – М. : Металлургия, 1989. – 384 с.
13. Диаграммы состояния двойных металлических систем : справочник : в 3 т. / под общ. ред. Н. П. Лякишева. – М. : Машиностроение, 1996–2000.
14. Наномодифицирование сварных соединений при лазерной сварке металлов и сплавов / А. М. Оришич, А. Н. Черепанов, В. П. Шапеев, Н. Б. Пугачева. – Новосибирск : СО РАН, 2014. – 252 с.
15. Теслюк М. Ю. Металлургические соединения со структурами фаз Лавеса. – М. : Наука, 1969. – 136 с.
16. Седых В. С., Казак Н. Н. Сварка взрывом и свойства сварных соединений. – М. : Машиностроение, 1971. – 71 с.

17. Патент № 2560472 Рос. Федерация. Способ получения многослойного материала : № 2013137303/02 : заявл. 08.08.2013 : . опубл. 20.08.2015 / Геращенко Д. А., Геращенко Е. Ю., Фармаковский Б. Ф., Васильев А. Ф., Леонов В. П., Счастливая И. А., Одерышев Д. Е., Фокичев А. И. – 7 с.
18. Enhanced strength of laser welded steel/titanium butt joints with vanadium multi-layers and a copper plate as a composite intermediate / Z. Shi, L. Cui, D. He, Z. Huang, H. Li, Q. Gao, F. Bu, Y. Pan // Optics and Laser Technology. – 2025. – Vol. 180. – P. 111478. – DOI: 10.1016/j.optlastec.2024.111478.
19. Nd:YAG pulsed laser welding of TC4 Ti alloy to 301L stainless steel using Ta/V/Fe composite interlayer / Y. Zhang, D. Q. Sun, X. Y. Gu, Z. Z. Duan, H. M. Li // Materials Letters. – 2018. – Vol. 212 (1). – P. 54–57. – DOI: 10.1016/j.matlet.2017.10.057.
20. Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н. Лазерная техника и технология : в 7 кн. Кн. 5. Лазерная сварка металлов : учебник для вузов. – М. : Высшая школа, 1988. – 207 с.
21. Ng C. H., Mok E. S. H., Man H. C. Effect of Ta interlayer on laser welding of NiTi to AISI 316L stainless steel // Journal of Materials Processing Technology. – 2015. – Vol. 226. – P. 69–77. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.06.039.
22. Hahnlen R., Fox G., Dapino M. J. Fusion welding of nickel–titanium and 304 stainless steel tubes. Part I. Laser welding // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. – 2013. – Vol. 24 (8). – P. 945–961. – DOI: 10.1177/1045389X12461075.
23. Fox G., Hahnlen R., Dapino M. J. Fusion welding of nickel–titanium and 304 stainless steel tubes. Part II. Tungsten inert gas welding // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. – 2013. – Vol. 24 (8). – P. 962–972. – DOI: 10.1177/1045389X12461076.
24. Evolution of microstructures and mechanical properties during dissimilar electron beam welding of titanium alloy to stainless steel via copper interlayer / I. Tomashchuk, P. Sallamand, N. Belyavina, M. Pilloz // Materials Science and Engineering: A. – 2015. – Vol. 585. – P. 114–122. – DOI: 10.1016/j.msea.2013.07.050.
25. Zoeram A. S., Rahmani A., Akbari Mousavi S. A. A. Microstructure and properties analysis of laser-welded Ni-Ti and 316 sheets using copper interlayer // Journal of Manufacturing Processes. – 2017. – Vol. 26. – P. 355–363. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2017.02.005.
26. Прочность и структура неразъемного соединения сплава ВТ1-0 и стали 12Х18Н10Т при разных режимах лазерной сварки / Н. Б. Пугачева, С. В. Смирнов, Д. И. Вичужанин, Ю. В. Афонин, А. М. Оришич, С. М. Задворкин, Л. С. Горулева // Деформация и разрушение металлов. – 2012. – № 7. – С. 26–32.
27. The formation of intermetallics in dissimilar Ti6Al4V/copper/AISI 316L electron beam and Nd:YAG laser joints / I. Tomashchuk, P. Sallamand, H. Andrzejewski, D. Grevey // Intermetallics. – 2011. – Vol. 19 (10). – P. 1466–1473. – DOI: 10.1016/j.intermet.2011.05.016.
28. Fracture surface characterization of laser welding processed Ti alloy to stainless steel joints / S. R. E. Hosseini, K. Feng, P. Nie, K. Zhang, J. Huang, Y. Chen, D. Shu, Z. Li, B. Guo, S. Xue // Welding in the World. – 2018. – Vol. 62. – P. 947–960. – DOI: 10.1007/s40194-018-0586-6.
29. Isaev V. I., Cherepanov A. N., Shapeev V. P. Numerical study of Heat Modes of laser welding of dissimilar metals with an intermediate insert // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2016. – Vol. 99. – P. 711–720. – DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.04.019.
30. Role of ultra-fine intermetallic particles and martensite in strengthening of AISI 321/Cu/Ti laser welded joint / N. B. Pugacheva, A. M. Orishich, E. G. Volkova, A. V. Makarov, E. I. Senaeva, A. G. Malikov // Materials Characterization. – 2022. – Vol. 185. – P. 111702. – DOI: 10.1016/j.matchar.2021.111702.
31. Crystallization of dissimilar Ti/Cu/steel laser welds / N. B. Pugacheva, A. V. Makarov, E. I. Senaeva, E. G. Volkova // Journal of Crystal Growth. – 2019. – Vol. 526. – P. 125212. – DOI: 10.1016/j.jcrysgr.2019.125212.

32. Pugacheva N. B., Senaeva E. I., Makarov A. V. Effect of the laser welding conditions on the chemical composition of the AISI 321/Cu/Ti Material // AIP Conference Proceedings. – 2020. – Vol. 2315. – P. 030015. – DOI: 10.1063/5.0036864.
33. Investigation of the structure and properties of a composite insert applied at laser welding of steel with titanium / N. B. Pugacheva, A. N. Cherepanov, A. M. Orishich, A. G. Malikov, V. O. Drozdov, V. I. Mali, E. I. Senaeva // AIP Conference Proceedings. – 2017. – Vol. 1893. – P. 030107. – DOI: 10.1063/1.5007565.