

УДК 621.791.927.5

СТРУКТУРА И ТВЕРДОСТЬ НАПЛАВЛЕННЫХ НА НИЗКОУГЛЕРОДИСТУЮ СТАЛЬ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ ПРИ НИЗКОЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИИ ТОКА*

*Сараев Ю.Н., д.т.н., главный научный сотрудник лаборатории композиционных материалов
Безбородов В.П., к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории композиционных
материалов (val@ispms.tsc.ru)*

*Перовская М.В., к.т.н., научный сотрудник лаборатории композиционных материалов
Семенчук В.М., инженер лаборатории композиционных материалов*

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
(634021, Россия, Томск, Академический просп., 2/4)

Аннотация. Исследовано влияние режимов ручной электродуговой наплавки покрытий электродами Т-590 на низколегированную сталь 09Г2С на их структуру и твердость. Показано, что при импульсно-дуговой наплавке покрытий электродами формируется мелкодендритная структура наплавленного металла. Микроструктура зоны термического влияния после наплавки состоит из нескольких участков: зона перегрева с видманштеттовой структурой и зона нормализации с характерной мелкозернистой феррито-перлитной структурой. В исходном состоянии основной металл (сталь 09Г2С) имеет твердость ~2500 МПа. Твердость материала наплавленного покрытия из-за сильного перемешивания с металлом стали равна примерно 2700 – 3000 МПа, а зоны термического влияния составляет 2100 – 2300 МПа. При нанесении покрытия на режиме постоянного тока температура нагрева наплавочной ванны выше, что, как следствие, вызывает рост зерна. При нанесении покрытия на импульсных режимах, путем направленного низкочастотного высокоэнергетического воздействия электрической дуги на формируемый металл, за счет постоянного возвратно-поступательного движения расплава с частотой модуляции тока формируется структура, имеющая меньшие размеры составляющих. Установлено, что применение метода импульсно-дуговой наплавки позволяет сохранить в наплавленных покрытиях сформированные ранее упрочняющие фазы.

Ключевые слова: сталь, структура, свойство, покрытие, наплавка, износостойкость, электрод, дуга, источник, элемент.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-6-469-473

ВВЕДЕНИЕ

Электродуговая наплавка электродами является экономичным и широко применяемым в промышленности методом восстановления деталей машин и механизмов, придания высокой износостойкости их рабочей поверхности [1, 2]. В настоящее время наиболее распространенные износостойкие наплавочные материалы включают сплавы с хромом, вольфрамом, бором, молибденом и др. Износостойкость этих наплавочных материалов сильно зависит от их структуры, типа и количества упрочняющих фаз в сплавах. Процессы наплавки из-за различий величин вложений тепла и свойств электродных материалов оказывают специфическое влияние на свойства покрытий [3 – 13]. Снижение свойств наплавленного металла, как правило, происходит из-за дефектов, которые могут возникнуть в процессе наплавки [13 – 16]. Это может приводить к ускоренному разрушению наплавленных покрытий [17 – 20]. Современные способы наплавки позволяют регламентировать скорость охлаждения материала наносимых покрытий и

управлять процессами их плавления и кристаллизации, формированием структуры и повышением физико-механических свойств [1, 2, 19, 20].

Важной задачей является исследование влияния технологического режима наплавки электродами на характеристики наносимых покрытий за счет применения импульсного процесса, снижающего вложение тепла и структурную неоднородность металла.

Цель работы – повышение твердости наплавленных электродами Т-590 покрытий применением импульсно-дугового метода.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе проведены исследования покрытий, полученных ручной дуговой наплавкой электродами Т-590 диаметром 4 мм. В качестве подложки, на которую производилась наплавка, применялись образцы из стали 09Г2С толщиной 6 мм. Наплавка покрытий осуществлялась с применением источника питания ФЕБ-315 «МАГМА» с пультом «Пульс» для реализации импульсно-дугового процесса. Для наплавки покрытий применялись два способа: на постоянном токе и импульсном режиме с частотой модуляции тока

* Работа выполнена в рамках Программ фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2018 – 2020 гг., проект III.23.2.1

в пределах от 1 до 5 Гц. Регистрация параметров процесса наплавки электродов осуществлялась с помощью цифрового осциллографа АКИП 4122/IV. Микроструктуру образцов исследовали на оптическом микроскопе НЕОРНОТ-21 в сечениях, перпендикулярных продольной оси наплавленного покрытия. Микротвердость наплавленных покрытий, зоны термического влияния и основного металла измеряли на микротвердомере Leika при нагрузке на индентор 0,5 Н. Химический состав используемых электродов Т-590, %: 2,0 – 2,5 Si; 1 – 2 Mn; 25,0 Cr; 2,9 – 3,5 C; 1,0 В.

Параметры режимов наплавки покрытий электродами Т-590 показаны ниже.

На постоянном токе: $I \sim 150$ А; $U \sim 25$ В; скорость наплавки $V_n \sim 6,99$ м/ч; уровень погонной энергии 1642 кДж/м (погонная энергия рассчитывалась по общепринятой методике, учитывающей скорость наплавки, равную 2 – 3 мм/с и затрачиваемую энергию, составляющую 3 – 5 Вт).

В режиме импульсного питания: ток импульса $I_n \sim 180$ А; ток паузы $I_p = 50$ А; время импульса $t_n = 0,3$ с; погонная энергия ~ 1606 кДж/м; скорость наплавки $V_n = 6$ м/ч.

Возможность получения необходимого состава покрытий определяется исходной концентрацией элементов и степенью усвоения этих элементов металлом при формировании капли и ванны расплава.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Характерные осциллограммы тока и напряжения на дуге при наплавке электродами с покрытием приведены на рис. 1.

Исследования микроструктуры проводились в центральных частях первого и второго слоев наплавки электродами, в переходной зоне от покрытия к основному металлу – на участках перегрева и нормализации.

Микроструктура основного металла 09Г2С представляет собой перлит и феррит с величиной зерна $\sim 4,7$ мкм. Объемная доля перлита составляет ~ 20 %.

При импульсно-дуговой наплавке покрытий электродами формируется мелкодендритная структура наплавленного металла. Микроструктура зоны термического влияния (ЗТВ) состоит после наплавки из нескольких участков: зона перегрева с видманштеттовой структурой и зона нормализации с характерной мелкозернистой феррито-перлитной структурой.

В исходном состоянии основной металл – сталь 09Г2С имеет твердость ~ 2500 МПа. Твердость материала покрытия, наплавленного покрытыми электродами, равна примерно 2700 – 3000 МПа. Твердость ЗТВ составляет 2100 – 2300 МПа. В результате применения импульсного режима наплавки размер зерна покрытия и ширина ЗТВ меньше. Это свидетельствует о повышении качества наплавленного покрытия. При нанесении

покрытия на режиме постоянного тока температура нагрева наплавочной ванны выше, что, как следствие, вызывает рост зерна. При нанесении покрытия на импульсных режимах путем направленного низкочастотного высокоэнергетического воздействия электрической дуги на формируемый металл, за счет постоянного возвратно-поступательного движения расплава с частотой модуляции тока формируется более однородная структура, имеющая меньшие размеры структурных составляющих. Такое формирование металла покрытия является следствием активного перемешивания расплава, что способствует выравниванию его тепло содержания за счет управления движением металла в наплавочной ванне, а также регулирует количество расплавленного металла под дугой к началу действия импульса тока, способствуя тем самым уменьшению глубины проплавления. Периодическое движение металла в расплаве способствует также более равномерному распределению легирующих элементов по объему расплавленного металла. Использование технологии

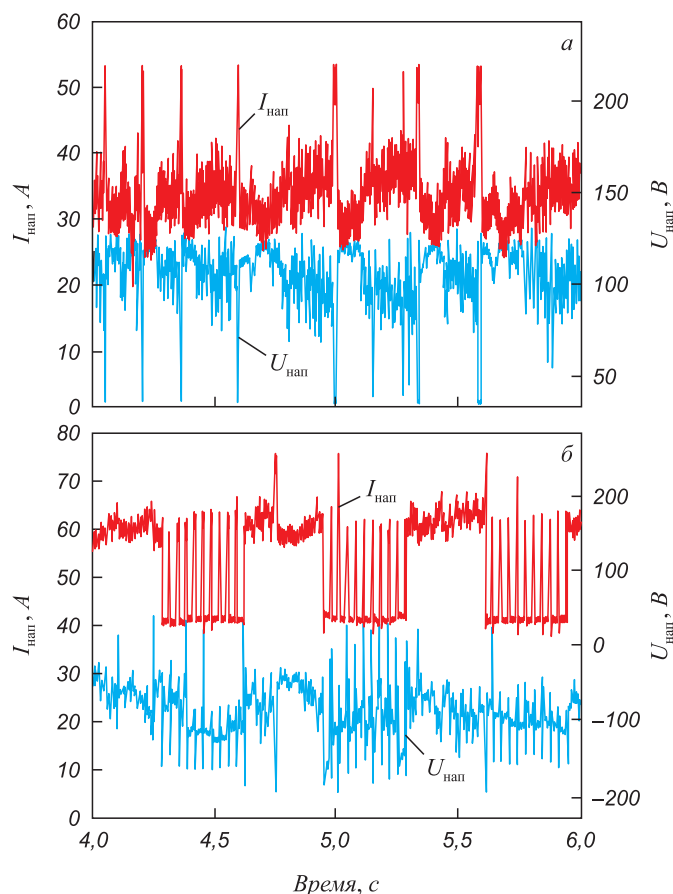


Рис. 1. Характерные осциллограммы тока и напряжения при наплавке электродами с покрытием: а – режим наплавки на постоянном токе, б – режим наплавки с модуляцией тока; $I_{нап}$ – ток наплавки, $U_{нап}$ – напряжение наплавки

Fig. 1. Typical oscillograms of current and voltage when surfacing with coated electrodes: а – mode of surfacing with direct current, б – mode of surfacing with modulated current; $I_{нап}$ – current of surfacing, $U_{нап}$ – voltage of surfacing

импульсно-дуговой наплавки покрытыми электродами позволяет через программируемый ввод тепла в зону покрытия управлять процессами кристаллизации расплавленного металла и, как следствие, измельчать структуру металла покрытия и повышать его свойства. При наплавке углеродистых сталей упрочнение происходит за счет формирования нового поверхностного слоя. Свойства наплавленной поверхности сталей зависят от типа легирующих элементов, определяющих фазовый состав, границы фазовых переходов и механические характеристики. На структуру наплавленного металла и его свойства оказывают влияние технологические параметры процесса наплавки электродами, количество и размер легирующих элементов. На свойства покрытий, наплавленных электродами, оказывает влияние содержание углерода, сохранность в процессе наплавки упрочняющих фаз (карбидов, боридов и т.д.), размеры и их расположение в матричном материале. Наплавленные электродами Т-590 покрытия имеют ледебуритную структуру (рис. 2).

В процессе термомеханического цикла наплавки покрытий электродами может иметь место образование трещин (горячих и холодных), что приводит к снижению свойств, которые тем ниже, чем выше структурная

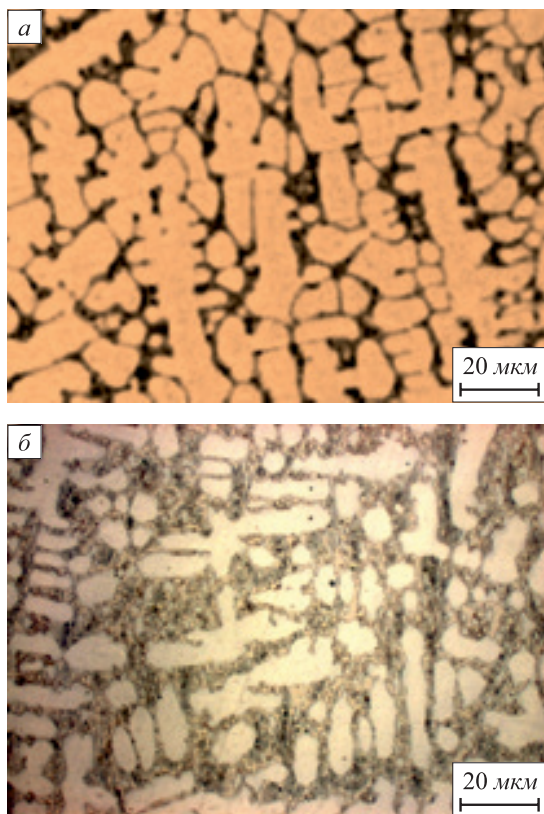


Рис 2. Структура наплавленного покрытия электродами Т-590 на режимах: постоянного тока (а); импульсного изменения энергетических параметров режима (б)

Fig. 2. Structure of the coating deposited with electrodes Т-590 on the modes: of DC (а), of pulse changes in the mode energy parameters (б)

неоднородность в наносимом покрытии. При измельчении структуры и снижении структурной неоднородности наоборот, свойства покрытий повышаются. Измельчение структуры покрытия, полученного с применением импульсного режима, приводит к повышению его свойств: твердости, износостойкости и других показателей [1 – 5].

Это может происходить за счет изменения температуры в зоне действия источника тепла в процессе наплавки, часто превышающей температуру плавления даже тугоплавких соединений при наплавке на постоянном токе. Как следствие, это приводит к их растворению в расплаве ванны. В случае применения импульсного режима наплавки может быть достигнуто формирование металла, независимо от марки применяемого электрода, с более однородной и мелкозернистой структурой. График изменения микротвердости покрытий электродом Т-590, наплавленных на импульсном режиме, зоны термического влияния и основы представлен на рис. 3.

Усредненное значение микротвердости металла покрытия составляет выше 5000 МПа. Аналогичная зависимость наблюдается после наплавки на режиме постоянного тока, только с меньшими значениями микротвердости покрытия.

Выводы

Изучено влияние модифицирования электродуговым воздействием при импульсно-дуговой наплавке электродами Т-590 на структуру и твердость покрытий. Модифицирование материалов наплавляемых покрытий на низкоуглеродистую сталь 09Г2С позволяет повы-

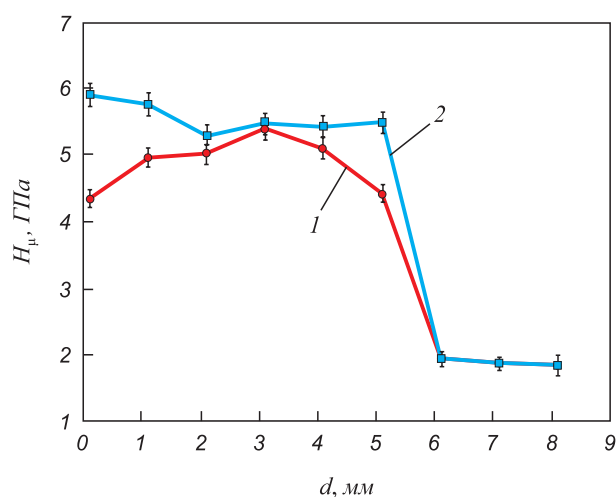


Рис. 3. Изменение микротвердости по глубине стальной основы и наплавленных покрытий:
1 – на постоянном токе; 2 – с импульсным изменением энергетических параметров режима

Fig. 3. Change in microhardness along the depth of the steel base and the deposited coatings:
1 – at DC, 2 – with a pulse change in the mode energy parameters

ситель однородность и дисперсность структуры, а также твердость. Использование метода импульсно-дуговой наплавки покрытий, наплавленных электродами T-590, дает возможность сохранять в них упрочняющие фазы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys // *Materials Science and Engineering: A*. 2004. Vol. 375 – 377. No. 1. P. 213 – 218.
2. Zhou Y.J., Zhang Y., Wang F.J. etc. Effect of Cu addition on the microstructure and mechanical properties of AlCoCrFeNiTi0.5 solid-solution alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. 2008. Vol. 466. No. 1 – 2. P. 201 – 204.
3. Guo Sheng, Chun Ng, Jian Lu, Liu C. T. Effect of valence electron concentration on stability of FCC or BCC phase in high entropy alloys // *Journal of Applied Physics*. 2011. Vol. 109. No. 10. Article 103505.
4. Guo Sheng, Liu C.T. Phase stability in high entropy alloys: Formation of solid-solution phase or amorphous phase // *Progress in Science: Materials International*. 2011. Vol. 21. No. 6. P. 433 – 446.
5. Yeh Jien-Wei, Chang Shou-Yi, Hong Yu-Der etc. Anomalous decrease in X-ray diffraction intensities of Cu–Ni–Al–Co–Cr–Fe–Si alloy systems with multi-principal elements // *Materials Chemistry and Physics*. 2007. Vol. 103. No. 1. P. 41 – 46.
6. Mahlalela S.S., Pistorius P.G.H. Microstructural characterization of laser beam and gas tungsten arc welded zirconium-2.5Nb // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2017. Vol. 117. No. 10. P. 947 – 953.
7. Gao X.-L., Liu J., Zhang L.-J., Zhang J.-X. Effect of the overlapping factor on the microstructure and mechanical properties of pulsed Nd: YAG laser welded Ti6Al4V sheets // *Materials Characterization*. 2014. Vol. 93. P. 136 – 149.
8. Ram V., Kohn G., Stern A. CO₂ laser beam weldability of Zircaloy-2 // *Welding Journal*. 1986. Vol. 65. No. 7. P. 33 – 38.
9. Wan Q., Bai X., Zhang X. Impact of high dose krypton ion irradiation on corrosion behavior of laser beam welded Zircaloy-4 // *Materials Research Bulletin*. 2006. Vol. 41. No. 2. P. 387 – 395.
10. Song K.-N., Kim S.-S., Lee S.-H., Lee S.-B. Laser welding unit for intersection line welding of spacer grid inner straps and its application // *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*. 2009. Vol. 4. No. 1. P. 11 – 17.
11. Song K.-N., Lee S.-H. Effect of weld properties on the crush strength of the PWR spacer grid // *Science and Technology of Nuclear Installations*. 2012. Vol. 2012. Spec. issue. Article 540285.
12. Jeong D.H., Kim J.H. Fatigue characteristics of laser welded Zircaloy thin sheet // *Int. J. Mod. Phys.: Conference Series*. 2012. Vol. 6. P. 367 – 372.
13. Han Q., Kim D., Kim D. etc. Laser pulsed welding in thin sheets of Zircaloy-4 // *J. Mater. Process. Technol.* 2012. Vol. 212. P. 1116 – 1122.
14. Kim S., Lee W., Kim D. One-step distortion simulation of pulsed laser welding with multi-physics information // *Int. Journal of Simulation Modelling. Model.* 2015. Vol. 1. P. 85 – 97.
15. Cai C., Tao W., Li L., Chen Y. Weld bead formation and corrosion behavior of pulsed laser welded zirconium alloy // *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015. Vol. 77. P. 621 – 628.
16. Cai C., Li L., Tao W. etc. Weld bead size, microstructure and corrosion behavior of zirconium alloys joints welded by pulsed laser spot welding // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2016. Vol. 25. P. 3783 – 3792.
17. Saraev Yu.N., Bezborodov V.P., Grigoryeva A.A. etc. Distribution of residual stresses in welded joints in 09G2S steel produced by adaptive pulsed-arc welding // *Welding International*. 2015. Vol. 29. No. 2. P. 131 – 134.
18. Saraev Yu.N., Bezborodov V.P. Effect of the energy parameters of the welding process on the structure and properties of welded joints in low-alloy steels // *Welding International*. 2013. Vol. 27. No. 9. P. 678 – 680.
19. Bezborodov V.P., Saraev Y.N. Use of coatings for protection of welded joints of steels, their structure and properties // *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. Vol. 857. No. 1. Article 012005.
20. Bezborodov V.P., Saraev Yu.N. Microstructure and mechanical properties of eutectic nickel alloy coatings // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Ser. «International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems»*. 2016. Vol. 124. Article 012119.

Поступила в редакцию 16 октября 2019 г.
После доработки 2 декабря 2019 г.
Принята к публикации 24 января 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. VOL. 63. NO. 6, PP. 469–473.

STRUCTURE AND HARDNESS OF WEAR-RESISTANT COATINGS WITH LOW-FREQUENCY CURRENT MODULATION DEPOSITED ON LOW CARBON STEEL

Yu.N. Saraev, V.P. Bezborodov, M.V. Perovskaya, V.M. Semenchuk

Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk, Russia

Abstract. Influence of the modes of manual electric arc surfacing of coatings with T-590 electrodes on low-alloy steel 09G2S on their structure and hardness was investigated. It is shown that the pulsed arc surfacing of coatings by electrodes forms a fine-dendritic structure of the deposited metal. Microstructure of the heat-affected zone after surfacing consists of several sections: the overheating zone with a Widmanstett structure and the normalization zone with a characteristic fine-grained ferrite-perlite structure. In the initial state, the base metal (steel 09G2S) has a hardness of ~2500 MPa. The hardness of the deposited coating material due to strong mixing with the steel metal is ~2700 – 3000 MPa, and of thermal impact zone: 2100 – 2300 MPa. When applying the coating on DC mode, heating temperature of the surfacing bath is higher; this, as a consequence, causes grain growth. When coating on pulse modes, a structure with smaller component

sizes is formed by directed low-frequency high-energy impact of the electric arc on the formed metal and due to the constant reciprocating motion of the melt with the frequency of current modulation. It was established that the application of the pulse-arc surfacing method allows preserving the previously formed hardening phases in the deposited coatings.

Keywords: steel, structure, property, coating, surfacing, wear resistance, electrode, arc, source, element.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-6-469-473

REFERENCES

1. Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2004, vol. 375-377, no. 1, pp. 213-218.
2. Zhou Y.J., Zhang Y., Wang F.J., Wang Y.L., Chen G.L. Effect of Cu addition on the microstructure and mechanical properties of AlCoCrFeNiTi0.5 solid-solution alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2008, vol. 466, no. 1-2, pp. 201–204.

3. Guo Sheng, Chun Ng, Jian Lu, Liu C. T. Effect of valence electron concentration on stability of fcc or bcc phase in high entropy alloys. *Journal of Applied Physics*. 2011, vol. 109, no. 10, article 103505.
 4. Guo Sheng, Liu C. T. Phase stability in high entropy alloys: Formation of solid-solution phase or amorphous phase. *Progress in Science: Materials International*. 2011, vol. 21, no. 6, pp. 433–446.
 5. Yeh Jien-Wei, Chang Shou-Yi, Hong Yu-Der, Chen Swe-Kai, Lin Su-Jien. Anomalous decrease in X-ray diffraction intensities of Cu–Ni–Al–Co–Cr–Fe–Si alloy systems with multi-principal elements. *Materials Chemistry and Physics*. 2007, vol. 103, no. 1, pp. 41–46.
 6. Mahlalela S.S., Pistorius P.G.H. Microstructural characterization of laser beam and gas tungsten arc welded zirconium-2.5Nb. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2017, vol. 117, no. 10, pp. 947–953.
 7. Gao X.-L., Liu J., Zhang L.-J., Zhang J.-X. Effect of the overlapping factor on the microstructure and mechanical properties of pulsed Nd: YAG laser welded Ti6Al4V sheets. *Materials Characterization*. 2014, vol. 93, pp. 136–149.
 8. Ram V., Kohn G., Stern A. CO₂ laser beam weldability of Zircaloy-2. *Welding Journal*. 1986, vol. 65, no. 7, pp. 33–38.
 9. Wan Q., Bai X., Zhang X. Impact of high dose krypton ion irradiation on corrosion behavior of laser beam welded Zircaloy-4. *Materials Research Bulletin*. 2006, vol. 41, no. 2, pp. 387–395.
 10. Song K.-N., Kim S.-S., Lee S.-H., Lee S.-B. Laser welding unit for intersection line welding of spacer grid inner straps and its application. *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*. 2009, vol. 4, no. 1, pp. 11–17.
 11. Song K.-N., Lee S.-H. Effect of weld properties on the crush strength of the PWR spacer grid. *Science and Technology of Nuclear Installations*. 2012, vol. 2012, Spec. issue, article 540285.
 12. Jeong D.H., Kim J.H. Fatigue characteristics of laser welded Zircaloy thin sheet. *Int. J. Mod. Phys.: Conference Series*. 2012, vol. 6, pp. 367–372.
 13. Han Q., Kim D., Kim D., Lee H., Kim N. Laser pulsed welding in thin sheets of Zircaloy-4. *J. Mater. Process. Technol.* 2012, vol. 212, pp. 1116–1122.
 14. Kim S., Lee W., Kim D. One-step distortion simulation of pulsed laser welding with multi-physics information. *Int. Journal of Simulation Modelling*. 2015, vol. 1, pp. 85–97.
 15. Cai C., Tao W., Li L., Chen Y. Weld bead formation and corrosion behavior of pulsed laser welded zirconium alloy. *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015, vol. 77, pp. 621–628.
 16. Cai C., Li L., Tao W., Peng G., Wang X. Weld bead size, microstructure and corrosion behavior of zirconium alloys joints welded by pulsed laser spot welding. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2016, vol. 25, pp. 3783–3792.
 17. Saraev Yu.N., Bezborodov V.P., Grigoryeva A.A., Golikov N.I., Dmitriev V.V., Sannikov I.I. Distribution of residual stresses in welded joints in 09G2S steel produced by adaptive pulsed-arc welding. *Welding International*. 2015, vol. 29, no. 2, pp. 131–134.
 18. Saraev Yu.N., Bezborodov V.P. Effect of the energy parameters of the welding process on the structure and properties of welded joints in low-alloy steels. *Welding International*. 2013, vol. 27, no. 9, pp. 678–680.
 19. Bezborodov V.P., Saraev Y.N. Use of coatings for protection of welded joints of steels, their structure and properties. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017, vol. 857, no. 1, article 012005.
 20. Bezborodov V.P., Saraev Yu.N. Microstructure and mechanical properties of eutectic nickel alloy coatings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Ser. "International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems"*. 2016, vol. 124, article 012119.
- Acknowledgements.** The work was performed as part of the Basic Scientific Research Programs of the State Academies of Sciences for 2018–2020, project III.23.2.1.
- Information about the authors:**
- Yu.N. Saraev**, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher of the Laboratory of Composite Materials
V.P. Bezborodov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Laboratory of Composite Materials (val@ispms.tsc.ru)
M.V. Perovskaya, Cand. Sci. (Eng.), Research Associate of the Laboratory of Composite Materials
V.M. Semenchuk, Engineer of the Laboratory of Composite Materials

Received October 16, 2019
 Revised December 2, 2019
 Accepted January 24, 2020