

DOI: 10.15593/2224-9877/2016.4.09

УДК 621.791.75

Г.Е. Трекин, О.И. Шевченко

Нижнетагильский технологический институт (филиал) Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Нижний Тагил, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРЕВА

В статье рассмотрено влияние высокотемпературного нагрева на структуру электроискровых покрытий из алюминия и титана, нанесенных в воздушной среде на низкоуглеродистую сталь вращающимся электродом на типовых режимах. Высокотемпературный нагрев осуществляли на разработанной и изготовленной установке на базе сварочного трансформатора ТСД-1000-3, оснащенной аналого-цифровым преобразователем для фиксации температуры, тока и напряжения. Использовались режимы, на которых скорость нагрева максимально приближена к наблюдаемой при сварке. Установлено, что после электроискрового легирования обоими электродами формируется твердый слой с трещинами и зоной термического влияния под ним. Для алюминиевого покрытия после высокотемпературного нагрева и охлаждения образуется более толстый белый слой, с микротвердостью на уровне основного металла, а на некотором удалении от него образуется тонкий слой со структурой частичного обезуглероживания. На месте титанового покрытия выявляются участки плавления, более твердые по сравнению с основным металлом и имеющие дендритную структуру, за которой следует тонкая зона полного обезуглероживания и протяженная зона частичного обезуглероживания. На основе данных измерения термического цикла электротермического нагрева выявлено локальное плавление обоих электроискровых покрытий в интервале 500–650 °С, в результате которого и происходит изменение структуры поверхностного слоя. Анализ равновесных диаграмм состояния показал, что в системах железо – алюминий и железо – титан имеются эвтектики с температурами 652 и 590 °С соответственно, что объясняет подобную реакцию покрытия на нагрев.

Ключевые слова: электроискровое легирование, электроискровое легирование алюминием и титаном, микроструктура, исследование микроструктуры, микроструктура покрытий, металлографическое исследование, высокотемпературный нагрев, микротвердость, исследование микротвердости покрытий, структура низкоуглеродистой стали, микроструктура поверхностного слоя металла.

G.E. Trekin, O.I. Shevchenko

Nizhny Tagil's Technology Institute (Department) of Ural Federal University
Named after the First President of Russia B.N. Yeltsin,
Nizhny Tagil, Russian Federation

INVESTIGATION LOW-CARBON STEEL AFTER ELECTRO-SPARK ALLOYING AND HIGH-TEMPERATURE HEATING

In this article the influence high-temperature heating on microstructure aluminum and titanium electro-spark deposits was considered. Electro-spark procedure was carried on conventional parameters by means of rotating electrode atop surfaces sheet – samples of low carbon steel in air environment. High-temperature Joule-heating was realized with use new device, based on welding transformer TSD-1000-3, with attachment analog-to-digital converter for voltage-, current- and temperature monitoring. Heating speed was maximum close to real welding heating speed. Was fixed, that after electro-spark alloying by means of both electrodes formed hard deposits contained cracks and heat affected zone below. For aluminum deposit, high-temperature heating perform it to whit more thick layer with low micro-hardness. In heat affected zone was appeared more rich ferrite partially decarburization zone. In place former titanium deposit was appeared local small volumes of melting with dendrite structure and middle micro-hardness. Below it located thin completely decarburization zone and large (about 1 mm) partially decarburization zone. Monitored temperature data was shown local melting for both deposits in range 500-650 °C, that was reason for observed structure changes. Equilibrium structural diagrams iron-aluminum and iron-titanium shows eutectic in same temperature range.

Keywords: electro-spark alloying, aluminium and titanium electro-spark deposit, microstructure, microstructure investigation, coatings microstructure, metallographic investigation, high-temperature heating, micro-hardness, coatings micro-hardness investigation, microstructure low-carbon steels, surfaces microstructure.

Повышение комплекса свойств сварных соединений за счет нанесения технологического подслоя на разделку свариваемых заготовок рассмотрено в работе [1]. Также показана высокая стойкость технологического электроискрового подслоя при нагреве в газовой атмосфере [2]. При сварке под флюсом влияние технологического подслоя негативно, хотя положительное влияние алюминия и титана установлено [3–5], поэтому необходимо исследовать вопрос о способности электроискрового подслоя сохраняться при нагреве в расплаве флюса, перед тем как попадет в сварной шов.

Нанесение электроискрового технологического подслоя производилось в среде воздуха с помощью установки, разработанной на кафедре металлургической технологии НТИ (ф) УрФУ, на режимах, обеспечивающих хорошее формирование технологического подслоя.

В качестве основного металла использовались пластины из стали 20 [6] сечением 3×25 мм, длиной 250 мм. Технологический подслоя располагали на всех плоскостях по всей длине рабочей части образца.

Металлографическое исследование было произведено под микроскопом Zeiss Observer D1m с программным комплексом Thixomet при увеличении от 200 до 1000 крат. Травление осуществлялось реактивом (6%-ный раствор HNO_3) в спирте в течение 20 с при комнатной температуре [7, 8].

Измерение микротвердости производилось на приборе Future Tech FM-300 пирамидой Виккерса при нагрузке 50 г и выдержке под нагрузкой 50 с, по трассе перпендикулярно толщине образца. Результаты обрабатывались в программах Excel и MathCAD [9–13].

Температуру фиксировали с помощью хромель-алюмелевой термопары. Фиксацию термического цикла нагрева производили подключением термопары к усилителю Zet 410 и аналого-цифрового преобразователя Zet 210, компенсацию холодного спая производили при обработке по показаниям компенсирующей термопары. Запись тока и напряжения выполняли на этой же аппаратуре, оснащенной трансформаторами тока и схемами выпрямления и сглаживания сигнала (рис. 1).

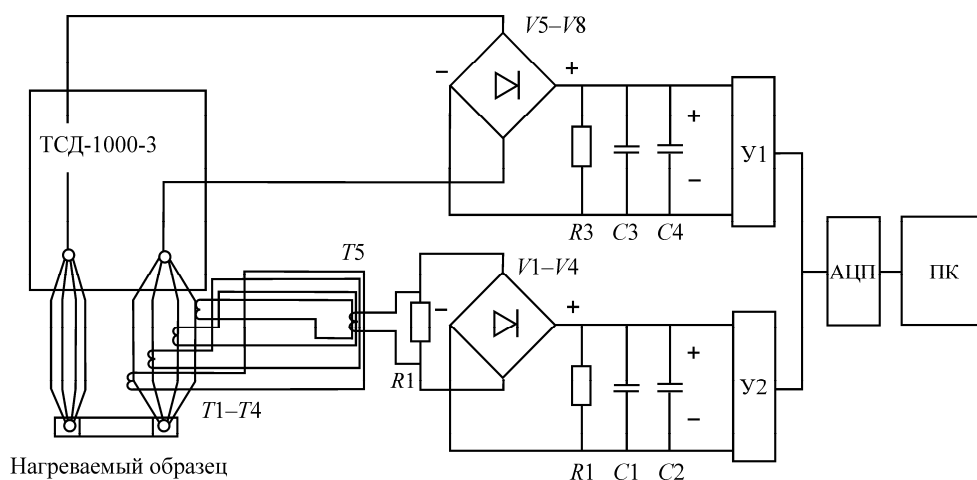


Рис. 1. Схема измерения тока и напряжения при электротермическом нагреве: $R1$ – сопротивление 200 Ом; $R2, R3$ – сопротивление 2 кОм; $C1, C3$ – конденсатор 2 мкф; $C2, C4$ – конденсатор 2200 мкф; $V1-V8$ – диоды 1N5818; $T1-T4$ трансформаторы тока – Т-066 300/5; $T5$ – трансформатор тока ТАЛЕМА 1100; $Y1, Y2$ – ZET 410; АЦП – ZET 210; ПК – персональный компьютер

Образец разогревали проходящим током под распространенными флюсами АН 348-А и ФСА ЧТ А-650-20/80 с помощью трансформатора ТСД-1000-3 на режимах, обеспечивающих расплавление флюса и разогрев заготовки выше температуры плавления флюса, и затем охлаждали в воде (рис. 2).

Микроструктура поверхностного нанесенного слоя после электроискрового легирования представляет белый слой высокой твердости с большим количеством прямолинейных трещин. Для алюминиевого слоя поверхность неровная, титановый слой более ровный (рис. 3, а; 4, а; 5 а, б). Толщина нанесенного слоя составляет для алюминиевого электрода 40–80 мкм, а для титанового около 30 мкм. За нанесенным слоем располагается зона термического влияния с ферритной структурой, толщина которой одинакова для обоих электродов – примерно 100 мкм (см. рис. 3, а; 4, а).

После электротермического нагрева и охлаждения обнаруживается, что нанесенный слой полностью исчезает и на его месте появляется белый слой с низкой твердостью. Для покрытия, нанесенного алюминиевым электродом под обоими флюсами, это плотный слой с относительно гладкими границами и небольшим количеством пор и включений. На некотором удалении от белого слоя наблюдаются тонкий слой частичного обезуглероживания, выражающийся в более толстой ферритной оторочке вокруг участков с закаленной структурой (рис. 3, б, в; 5, в). Для титанового покрытия это слой неравномерной толщины с участками плавления, имеющими дендритную структуру. За участками плавления образуются зоны полного и частичного обезуглероживания: первая узкая – около 200 мкм, вторая простирается на глубину около 1 мм (рис. 4, б, в; 5, г).

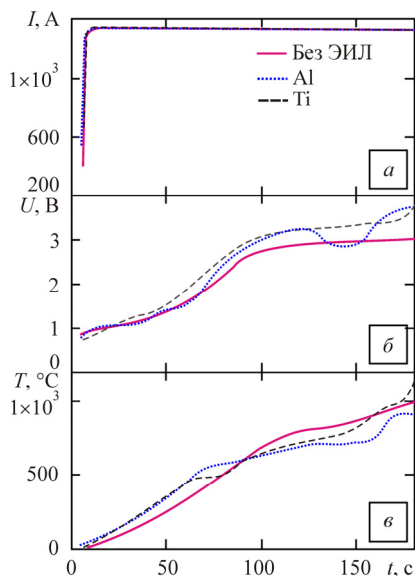


Рис. 2. Изменение тока (а), напряжения (б) и температуры (в) в процессе электротермического нагрева под флюсом АН 348-А (символы химических элементов показывают материал электрода при ЭИЛ)

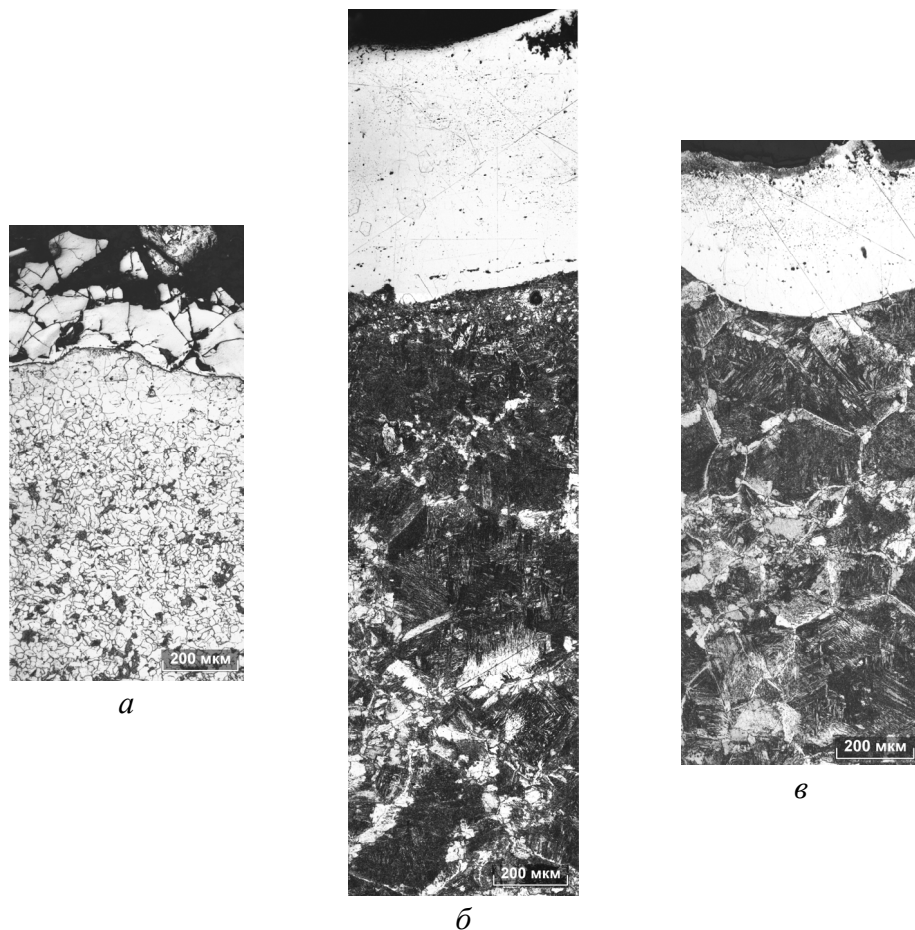


Рис. 3. Микроструктура поверхностного слоя стали 20 после ЭИЛ алюминиевым электродом: *а* – ЭИЛ; *б* – ЭИЛ и электротермический нагрев под флюсом ФСА ЧТ А-650-20/80; *в* – ЭИЛ и электротермический нагрев под флюсом АН 348-А

Анализ диаграмм состояния железо – алюминий и железо – титан [14] показывает, что в электроискровом нанесенном слое вероятно формирование интерметаллидов, поскольку они обнаружены при нанесении других материалов [15], это подтверждается высокой твердостью покрытия и наличием трещин. Также нельзя исключить формирование нитридов и оксидов [16], поскольку нанесение покрытия производилось в воздушной среде. Весьма вероятны небольшие объемы чистого материала электрода. При нагревании взаимодействие со стороны основного металла развивается по пути диффузионного проникновения: со стороны железа для обоих наносимых электродов это

α -твердый раствор с γ -областью выше 900 °С, со стороны алюминия – эвтектика при 652 °С, со стороны титана также эвтектика при 590 °С. Исходя из этого при нагревании обоих электроискровых слоев должна образоваться жидкая фаза, что мы и наблюдаем; алюминиевое покрытие становится ровным, а в титановом образуются локальные участки плавления с дендритной структурой. Данное положение подтверждается рис. 2, в, где наблюдаются перегибы кривых нагрева в интервале 500–650 °С для образцов с электроискровым слоем.

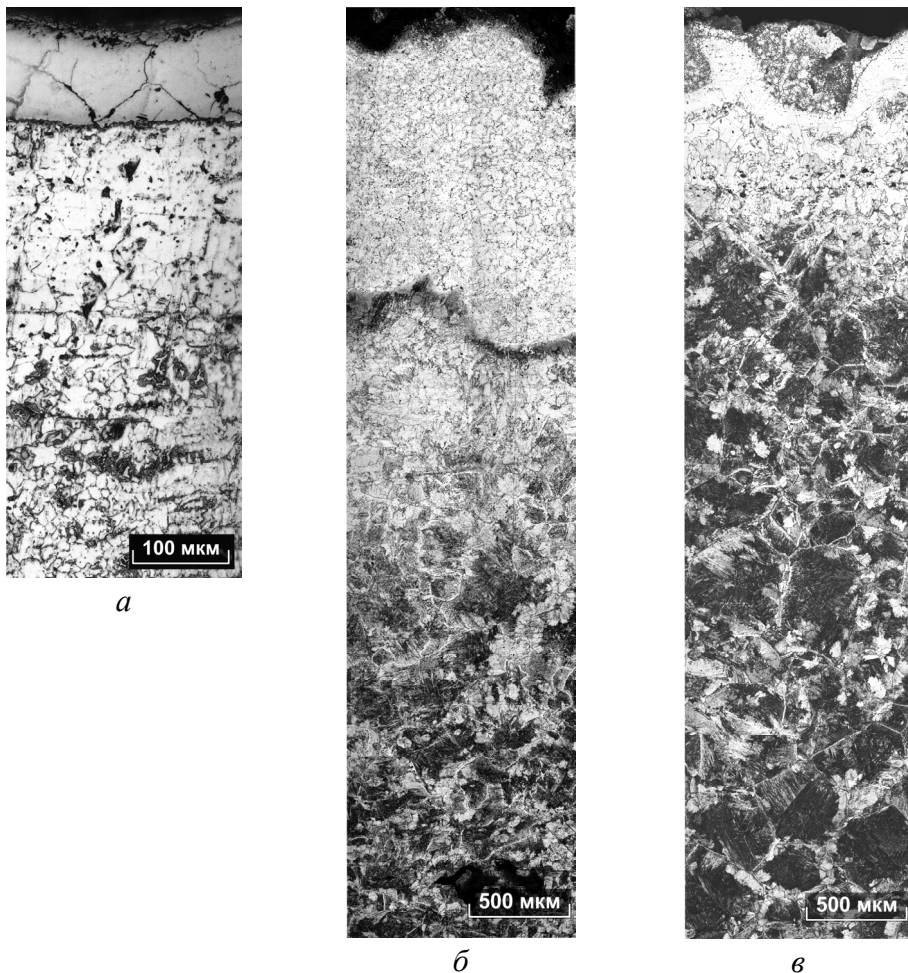


Рис. 4. Микроструктура поверхностного слоя стали 20 после ЭИЛ титановым электродом: *а* – ЭИЛ; *б* – ЭИЛ и электротермический нагрев под флюсом ФСА ЧТ А-650-20/80; *в* – ЭИЛ и электротермический нагрев под флюсом АН 348-А

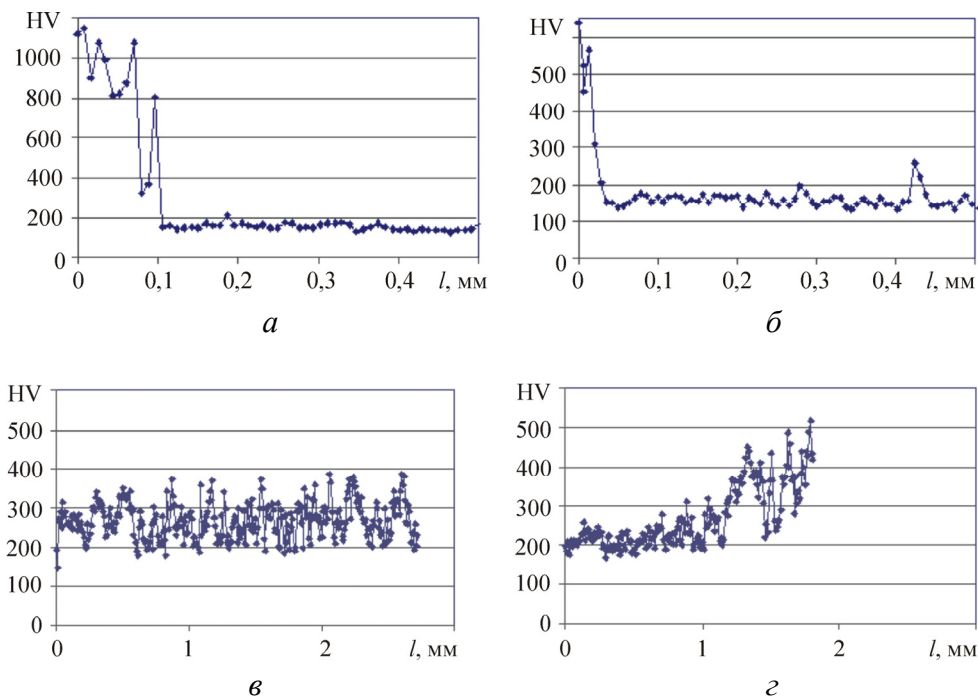


Рис. 5. Распределение микротвердости HV по глубине измененного слоя l :
 а, в – алюминиевый электрод; б, г – титановый электрод; а, б – после ЭИЛ;
 в, г – после ЭИЛ и нагрева под флюсом ФСА ЧТ А-650-20/80

При последующем повышении температуры для алюминиевого электроискрового слоя взаимодействие развивается по диффузионному пути, на данный момент непонятно, в какую сторону больше: в шлак или в основной металл, но за время нагрева измененный слой сохраняется и может легировать сварной шов. В титановом покрытии повышение температуры приводит, вероятнее всего, к связыванию углерода титаном и образованию полностью или частично обезуглероженных слоев, т.е. титан остается в покрытии в виде карбида и интерметаллида в междендритном пространстве участков плавления.

Поскольку основные структурные изменения происходят до температуры плавления флюсов, их влияние в целом незначительно, поэтому результаты различаются мало.

Таким образом, при высокотемпературном нагреве электроискровых слоев, нанесенных алюминиевым и титановым электродами, происходит плавление поверхностного слоя с последующим диффузионным перераспределением элементов. На месте алюминиевого электро-

искрового покрытия формируется белый легированный слой с тонкой прослойкой частичного обезуглероживания. На месте титанового электроискрового покрытия образуются участки локального плавления, за которыми следует тонкая зона полного обезуглероживания и зона частичного обезуглероживания протяженностью около 1 мм.

Библиографический список

1. Трекин Г.Е., Шевченко О.И. Влияние алюминиевого электроискрового технологического подслоя и температуры отпуска на структуру и свойства низкоуглеродистого, низколегированного сварного шва // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2015. – Т. 17, № 1. – С. 112–118.

2. Трекин Г.Е., Шевченко О.И. Влияние электроискрового легирования алюминием на окисление и обезуглероживание при термической обработке. Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов: материалы XXII Урал. шк. металловедов-термистов / отв. ред. В.И. Грызунов. – Орск: Изд-во Орск. гум.-технол. ин-та (филиала) Оренбург. гос. ун-та, 2014. – С. 168–169.

3. Научные и технологические основы микролегирования стали / В.Л. Пилющенко, В.А. Вихлевщук, С.В. Лепорский, А.М. Поживанов. – М.: Металлургия, 1994. – 384 с.

4. Bhadeshia H.K.D.H., Svenson L.E. Modelling the evolution of microstructure in steel weld metal // Mathematical Modelling of Weld Phenomena / eds. H. Cerjak, K.E. Easterling; Institute of Materials. – London, 1993. – P. 109–182.

5. Гольдштейн Я.Е., Мизин В.Г. Инокулирование железоуглеродистых сплавов. – М.: Металлургия, 1993. – 416 с.

6. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин [и др.]; под общ. ред. В.Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.

7. Коваленко В.С. Металлографические реактивы: справ. изд. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1981. – 120 с.

8. Способы металлографического травления: справ. изд. / пер. с нем. М. Беккерт, Х. Клемм. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1988. – 400 с.

9. Макаров Е.Г. Инженерные расчеты в Mathcad. Учебный курс. – СПб.: Питер, 2004. – 448 с.

10. Очков В.Ф. Mathcad 14 для студентов, инженеров и конструкторов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 368 с.

11. Васильев А.Н. Mathcad 13 на примерах. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 528 с.

12. Бараз В.Р., Пегашкин В.Ф. Использование MS Excel для анализа статистических данных: учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. / М-во образования и науки РФ; Урал. федер. ун-т им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Нижнетагил. техн. ин-т (филиал). – Н. Тагил, 2014. – 181 с.

13. Саймон Д. Анализ данных с помощью Excel. – М.: Диалектика, 2004. – 535 с.

14. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа: справ. изд. / О.А. Банных, П.Б. Будберг, С.П. Алисова [и др.]. – М.: Metallurgia, 1986. – 440 с.

15. Доронин О.Н. Разработка электроискровой технологии упрочнения прокатных валков из белого чугуна: автореф. ... канд. техн. наук. – М., 2013. – 24 с.

16. Мулин Ю.Н. Технологические и методологические основы формирования функциональных покрытий методом электроискрового легирования с применением электродных материалов из минеральных концентратов Дальнего Востока: автореф. ... д-ра техн. наук. – Комсомольск-на-Амуре, 2007. – 47 с.

References

1. Trekin G.E., Shevchenko O.I. Vliianie aliuminieвого elektroiskrovogo tekhnologicheskogo podsloia i temperatury otpuska na strukturu i svoistva nizkouglerodistogo, nizkolegированного svarnого shva [Influence of an aluminum electrospark technological underlayer and temperature of a holiday on structure and properties of the low-carbon, low-alloyed welded seam]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2015, vol. 17, no. 1, pp. 112-118.

2. Trekin G.E., Shevchenko O.I. Vliianie elektroiskrovogo legirovaniia aliuminiem na okislenie i obezuglerozhivanie pri termicheskoi obrabotke [Influence of an electrospark alloying aluminum on oxidation and

an obezuglerozhivaniye in case of heat treatment]. *Materialy XXII Ural'skoi shkoly metalloedov-termistov "Aktual'nye problemy fizicheskogo metallovedeniia staley i splavov"*. Orskii gumanitarno-tekhnologicheskogo institut (filial) Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta, 2014, pp. 168-169.

3. Piliushchenko V.L., Vikhlevshchuk V.A., Leporskii S.V., Pozhivanov A.M. Nauchnye i tekhnologicheskie osnovy mikrolegirovaniia stali [Scientific and technological bases of a microalloying became]. Moscow: Metallurgii, 1994. 384 p.

4. Bhadeshia H.K.D.H., Svenson L.E. Modelling the evolution of microstructure in steel weld metal. *Mathematical Modelling of Weld Phenomena*. London: Institute of Materials, 1993, pp. 109-182.

5. Gol'dshtein Ia.E., Mizin V.G. Inokulirovanie zhelezouglerodistykh splavov [Inokulirovaniye zhelezouglerodistykh of alloys]. Moscow: Metallurgii, 1993. 416 p.

6. Sorokin V.G., Volosnikova A.V., Viatkin S.A. [et al.]. Marochnik staley i splavov [Marochnik staly and alloys]. Moscow: Mashinostroenie, 1989. 640 p.

7. Kovalenko V.S. Metallograficheskie reaktivy: spravochnoe izdanie [Metalgraphic reactants: reference media]. Moscow: Metallurgii, 1981. 120 p.

8. Sposoby metallograficheskogo travleniia: spravochnoe izdanie [Ways of metalgraphic etching: reference media]. Moscow: Metallurgii, 1988. 400 p.

9. Makarov E.G. Inzhenernye raschety v Mathcad. Uchebnyi kurs [Engineering calculations in Mathcad. Training course]. Saint Petersburg: Piter, 2004. 448 p.

10. Ochkov V.F. Mathcad 14 dlia studentov, inzhenerov i konstruktorov [Mathcad 14 for students, engineers and designers]. Saint Petersburg: BKhV Peterburg, 2007. 368 p.

11. Vasil'ev A.N. Mathcad 13 na primerakh [Mathcad 13 on examples]. Saint Petersburg: BKhV Peterburg, 2006. 528 p.

12. Baraz V.R., Pegashkin V.F. Ispol'zovanie MS Excel dlia analiza statisticheskikh dannykh: uchebnoe posobie [Use of MS Excel for the analysis of statistical data: education guidance.]. Nizhnii Tagil: Ministerstvo obrazovaniia i nauki Rossiiskoi Federatsii, Ural'skii federal'nyi universitet imeni pervogo Prezidenta Rossii B.N. El'tsina, Nizhnetagil'skii tekhnicheskii institut (filial), 2014. 181 p.

13. Saimon D. Analiz dannykh s pomoshch'iu Excel [The analysis given by means of Excel]. Moscow: Dialektika, 2004. 535 p.

14. Bannykh O.A., Budberg P.B., Alisova S.P. [et al.]. Diagrammy sostoianiia dvoinykh i mnogokomponentnykh sistem na osnove zheleza: spravochnoe izdanie [Charts of a condition of double and multicomponent systems on the basis of iron: reference media]. Moscow: Metallurgiya, 1986. 440 p.

15. Doronin O.N. Razrabotka elektroiskrovoi tekhnologii uprochneniia prokatnykh valkov iz belogo chuguna [Development of electrospark technology of hardening of rolling rolls from white cast iron]. Abstract of the Ph. D. thesis. Moscow, 2013. 24 p.

16. Mulin Iu.N. Tekhnologicheskie i metodologicheskie osnovy formirovaniia funktsional'nykh pokrytii metodom elektroiskrovogo legirovaniia s primeneniem elektrodnykh materialov iz mineral'nykh kontsentratov Dal'nego Vostoka [Technological and methodological bases of formation of functional coverings by method of an electrospark alloying with use of electrode materials from mineral concentrates of the Far East]. Abstract of the Doctor's degree. Komsomol'sk-na-Amure, 2007. 47 p.

Получено 5.09.2016

Об авторах

Трекин Григорий Евгеньевич (Нижний Тагил, Россия) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры общего машиностроения Нижнетагильского технологического института (филиала) Уральского университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина; e-mail: trekin1963@yandex.ru.

Шевченко Олег Игоревич (Нижний Тагил, Россия) – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой металлургической технологии Нижнетагильского технологического института (филиала) Уральского университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина; e-mail: shevchenko_oleg@mail.ru.

About the authors

Grigoriy E. Trekin (Nizhny Tagil, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of General Machine Building, Nizhny Tagil's Technology Institute (Department) of Ural Federal

University Named after the First President of Russia B.N. Yeltsin; e-mail: trekin1963@yandex.ru.

Oleg I. Shevchenko (Nizhny Tagil, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Head of Department of Metallurgical Technologies, Nizhny Tagil’s Technology Institute (Department) of Ural Federal University Named after the First President of Russia B.N. Yeltsin; e-mail: shevchenko_oleg@mail.ru.