

DOI: 10.15593/2224-9877/2016.4.12

УДК 621.791

Ю.Д. Щицын, Д.С. Белинин, С.Д. Неулыбин, С.А. ТерентьевПермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОРРОЗИОННО-
И ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ БИМЕТАЛЛА
СТАЛЬ – МЕДЬ, ВЫПОЛНЕННЫХ ПЛАЗМЕННОЙ НАПЛАВКОЙ
НА ТОКАХ ПРЯМОЙ И ОБРАТНОЙ ПОЛЯРНОСТИ**

Развитие современной промышленности направлено на снижение материалоемкости, повышение технологических свойств изделий. Изделия из дорогостоящих дефицитных металлов и сплавов целесообразно изготавливать комбинированными: основа состоит из более дешевых материалов, а на рабочие поверхности наплавляют сплавы со специальными свойствами. Такие биметаллические конструкции во много раз дешевле конструкций, изготавливаемых целиком из металла с требуемыми свойствами. Перспективный метод изготовления таких конструкций – использование многослойной наплавки.

Применение высококонцентрированных источников нагрева позволяет упростить изготовление таких конструкций. Проведено исследование технологической возможности изготовления слоистых материалов плазменной наплавкой током прямой и обратной полярности. В данной работе представлены результаты исследования коррозионной стойкости и износостойкости поверхностного слоя биметаллов, полученных плазменной наплавкой. Плазменной наплавкой меди на сталь на различных режимах работы плазматрона получили биметалл с различными структурами и свойствами наплавленного слоя. Представлены результаты исследования структуры полученного слоистого композитного материала с использованием световой микроскопии. Установлено влияние полярности тока на коррозионную стойкость и износостойкость поверхностного слоя биметалла. Показана возможность формирования композитной структуры поверхностного слоя с улучшенными характеристиками при использовании наплавки тонкого промежуточного слоя высоколегированного сплава на никелевой основе. В работе установлено, что применение технологии плазменной наплавки обеспечивает создание биметаллических композиций сталь – медь без внутренних дефектов, а варьирование режимов наплавки позволяет регулировать структурный и химический состав материала, что благоприятно сказывается на его эксплуатационных свойствах.

Ключевые слова: плазма, плазменная дуга, плазменная наплавка, прямая полярность, обратная полярность, медь, высоколегированная сталь, металлографические исследования, структура, коррозионностойкость, износостойкость.

Yu.D. Schitsyn, D.S. Belinin, S.D. Neulybin, S.A. Terentyev

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**COMPARATIVE ANALYSIS OF CORROSION-
AND WEAR RESISTANT PRODUCTS FROM COMPOSITE METAL
STEEL–COPPER MADE BY PLASMA SURFACING
AT CURRENTS DIRECT AND REVERSE POLARITY**

The development of modern industry, aimed at reducing the consumption of materials, improving the technological properties of products. Products made of expensive metals and alloys scarce it is advisable to make combined, the base consists of the cheapest materials, and on the working surface of fusing alloys with special properties. Such bimetallic structure is many times cheaper than structures made entirely of metal with the desired properties. A promising method of manufacture of such structures – the use of a multi-layer deposition.

The use of highly concentrated heat sources to simplify the manufacture of such structures. A study of the technological possibilities of manufacturing laminates plasma welding current direct and reverse polarity. This paper presents the results of a study of corrosion resistance and wear resistance of the surface layer of composite metals received plasma welding. Plasma welding copper to steel in various modes of operation of the plasma torch got bimetal with different structures and properties of the deposited layer. The results of studies of the structure of the layered composite material obtained by using light microscopy. The effect of the polarity of the current on the corrosion resistance and wear resistance of the surface layer of the bimetal. The possibility of forming the surface layer of a composite structure with improved characteristics using a thin intermediate layer overlaying high alloy nickel-base. The paper found that the use of plasma deposition technology provides a bimetallic compositions steel–copper without internal defects and variation in deposition mode allows you to adjust the structure and chemical composition of the material that is beneficial to the performance properties of the material.

Keywords: plasma, plasma arc, plasma surfacing, straight polarity, reverse polarity, copper, high-alloy steel, metallographic examinations, structure, corrosion resistance, wear resistance.

Введение

Одним из путей развития современного машиностроения, направленных на повышение надежности и долговечности выпускаемой продукции, является создание и применение новых энерго- и ресурсосберегающих технологий обработки материалов и изготовления деталей при производстве технологического оборудования [1, 2].

Особенно это актуально для нефтегазоперерабатывающей и нефтехимической отраслей промышленности, где проблема преждевременного выхода из строя оборудования, подвергающегося в процессе эксплуатации значительным механическим нагрузкам и работающего в непосредственном контакте с агрессивными средами, является чрезвычайно важной [3, 4].

Медь обладает такими уникальными свойствами, как электро- и теплопроводность, коррозионная стойкость, пластичность, она сохраняет прочность и пластичность при температуре до $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ [5, 6]. Всё это позволяет использовать медь при изготовлении изделий военной промышленности, химической аппаратуры, кристаллизаторов, испарителей, фурм доменных печей, уплотнителей запорной арматуры нефтяной промышленности и в других областях техники [7].

Во многих изделиях применение меди во всем объеме изделия экономически нецелесообразно. Замена монолитных деталей, полученных из отливок цветных металлов, биметаллическими – актуальная задача, позволяющая снизить расход дорогостоящих компонентов и себестоимость изготовления [8].

Целью проведенной работы являлось исследование влияния технологии плазменной наплавки меди на сталь на структуру, коррозионную стойкость и износостойкость наплавленного слоя.

Методика проведения исследования

Наплавка меди марки М1 производилась на низколегированную малоуглеродистую сталь 09Г2С: дугой прямого действия прямой полярности тока; дугой прямого действия обратной полярности тока; дугой прямого действия обратной полярности тока с плазменной наплавкой тонкого промежуточного слоя высоколегированного сплава на никелевой основе. При наплавке медного слоя обеспечивалось перемешивание с металлом промежуточного слоя, благодаря чему достигается легирование меди компонентами высоколегированного сплава.

Наплавка на прямой (образец № 1 – рис. 1, 2) и обратной полярности тока (образец № 2 – рис. 3, 4) проводилась на режимах, обеспечивающих минимальную долю участия основного материала в наплавленном слое.



Рис. 1. Макрошлиф наплавленного образца на токе прямой полярности

При наплавке на прямой полярности тока за один проход формировался валик шириной 13 мм и высотой 2,2 мм с плавным переходом к основному металлу без подрезов (см. рис. 1).

Глубина проплавления в основу – до 2,1 мм; наплавленный металл плотный. Пор, трещин не имеется; у линии сплавления сформирована переходная зона из стали и меди шириной 0,06–0,25 мм. В переходной зоне медь располагается по границам кристаллитов оплавленной стали. Диффузии меди от границы раздела в основной материал не наблюдается; в медной матрице наплавленного металла по всему объему имеются включения стали различных размеров (см. рис. 2).

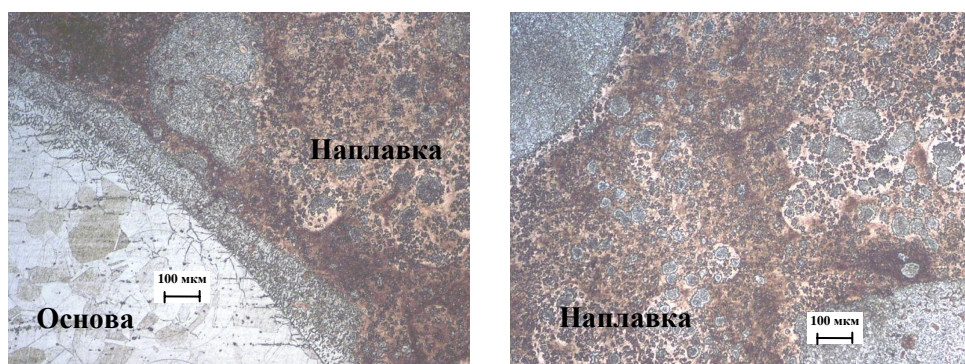


Рис. 2. Микрошлиф наплавленного образца на токе прямой полярности (×100)

При наплавке на обратной полярности тока за один проход формировался валик шириной 18 мм и высотой 2,0 мм с плавным переходом к основному металлу без подрезов (см. рис. 3).

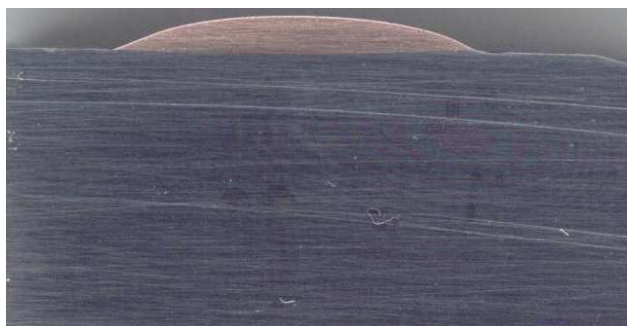


Рис. 3. Макрошлиф наплавленного образца на токе обратной полярности

Наплавленный металл плотный, без пор и трещин; у линии сплавления стальной наплавки с медью имеется типичная переходная зона шириной 0,191 мм из стали с включениями меди; наплавленный металл М1 имеет мелкокристаллическое строение, включения стали в меди отсутствуют (см. рис. 4).

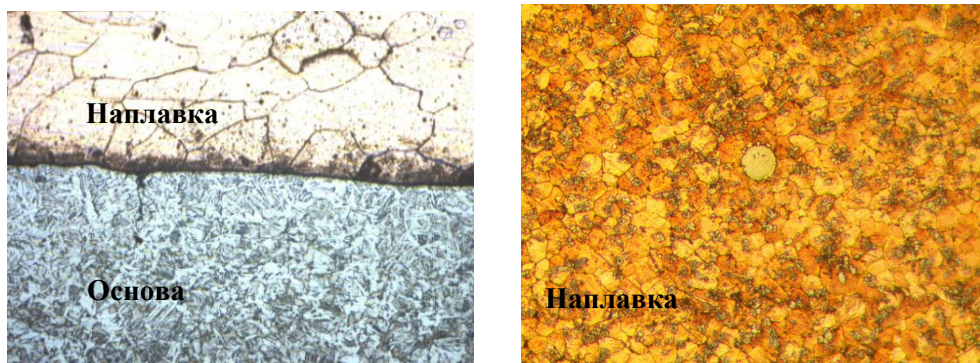


Рис. 4. Микршлиф наплавленного образца на токе обратной полярности (×100)

Существует принципиально другой подход к формированию рабочих слоев деталей. Возможно управление химическим составом, структурой и свойствами поверхностного слоя за счет регулирования степени перемешивания наплавляемого металла (медь) с металлом тонкого промежуточного слоя высоколегированного сплава на никелевой основе, полученного плазменной наплавкой, так же на токе обратной полярности.

Выполнение наплавки по такой технологии позволяет получить биметалл с поверхностным слоем, имеющим сложную структуру и, предположительно, улучшенные эксплуатационные характеристики.

Металлографический анализ показал, что в процессе наплавки происходило интенсивное взаимодействие наплавляемой меди с высоколегированным сплавом на никелевой основе в жидком состоянии, с образованием общего слоя однородно перемешанных двух систем (рис. 5). В процессе затвердевания наплавленный слой приобрел композитную структуру: основа (матрица) – сплав на основе меди с практически равномерным распределением по толщине зерен (включений) Fe–Ni-сплава.

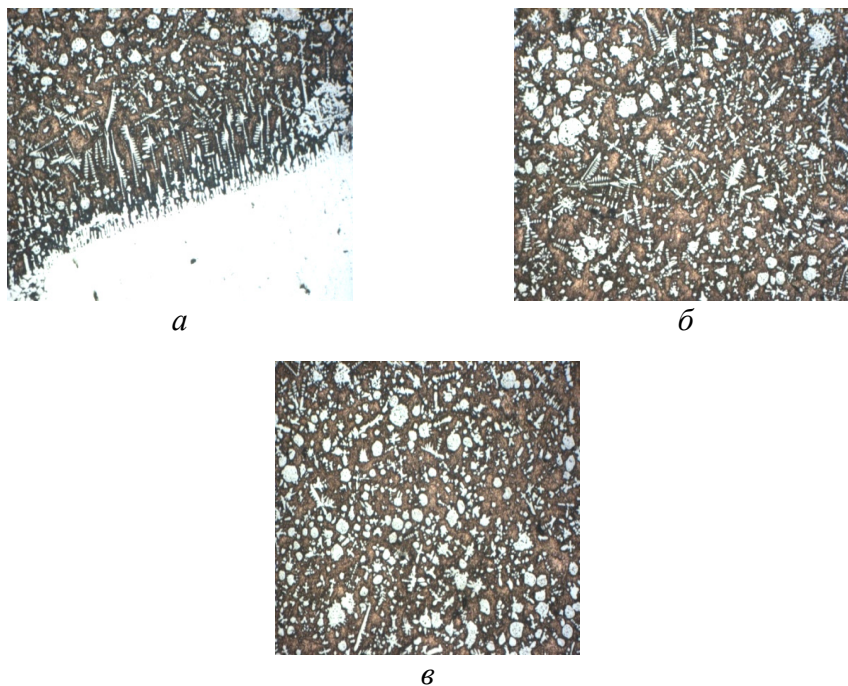


Рис. 5. Микроструктура наплавленного слоя: *а* – переходная зона; *б, в* – различные участки по высоте наплавки ($\times 200$)

Вследствие более высокой температуры кристаллизации Fe–Ni-сплава, по сравнению с температурой сплава на основе Cu, его кристаллизация происходила в первую очередь. Кристаллизация включений Fe–Ni-сплава имела дендритный характер, что видно по их дендритной и каплевидной с дендритнообразными отростками форме.

Проведенные испытания коррозионной стойкости и износостойкости поверхностных слоев показали значительное различие свойств для описанных вариантов наплавки.

При изучении кинетики процесса найдено, что в 4–8 М растворах HNO_3 наблюдается период индукции, в течение которого растворения меди не происходит: в 4 М HNO_3 – около 100 с, в 6 М HNO_3 – около 15 с, в 8 М HNO_3 – 5 с. При перемешивании растворов 6 и 12 М HNO_3 при помощи магнитной мешалки выявлено снижение скорости процесса от 0,015 до 0,010 моль/ $\text{м}^2 \cdot \text{с}$ в 6 М кислоте и от 0,089 до 0,083 моль/ $\text{м}^2 \cdot \text{с}$ в 12 М HNO_3 [9, 10].

В табл. 1 приведены результаты исследования на коррозионную стойкость [11–13]. На рис. 6 представлена графическая зависимость.

Таблица 1

Коррозионные испытания

Время выдержки и тип раствора	Номер образца	Размеры образца, мм			Площадь образца, мм ²	Вес образца, г		Потеря веса, г	Скорость общей коррозии, г/м ² ч
		a	b	c		до испытаний	после испытаний		
4 ч в 100%-ном р-ре HNO ₃ при T = 60 °C	Наплавка меди (обратная полярность)	9,56	11,27	8,83	583,3402	7,536	6,402	1,134	0,00048599
	Наплавка меди (прямая полярность)	8,88	9,72	8,94	505,1952	6,228	4,8	1,428	0,00070666
	Наплавка меди с перемешиванием	13,33	9,05	9,51	666,9406	9,187	7,925	1,262	0,00047306

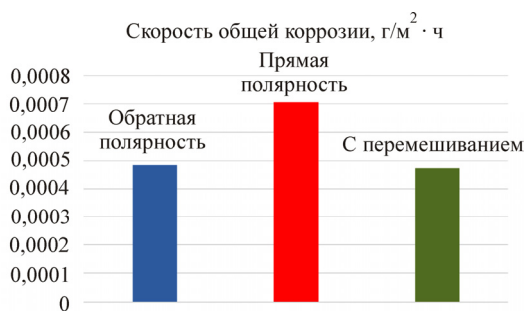


Рис. 6. Графическая зависимость скорости общей коррозии от варианта наплавки

Далее были проведены испытания на износостойкость полученных слоев¹ [13]. Результаты представлены в табл. 2 и на рис. 7.

Таблица 2

Результаты испытания на износостойкость

Образец	Вес до испытания, г	Вес после испытания, г	Потеря веса, г · 10000
Наплавка на прямой полярности тока	8,3601	8,3536	7,775026615
Наплавка на обратной полярности тока	4,6666	4,6651	3,214331633
Наплавка с перемешиванием на обратной полярности тока	8,7718	8,7709	1,026015185

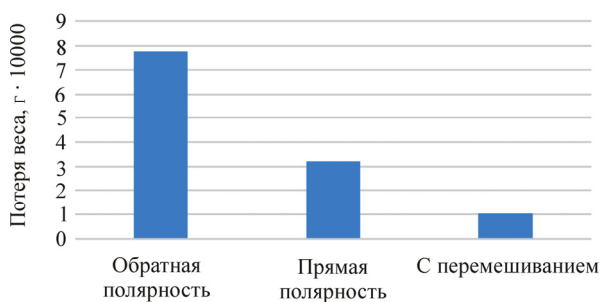


Рис. 7. Износостойкость наплавленных слоев

¹ ГОСТ 6032–2003 (ИСО 3651-1:1998, ИСО 3651-2:1998). Стали и сплавы коррозионно-стойкие. Методы испытаний на стойкость к межкристаллитной коррозии; ГОСТ 23.208–79. Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытаний материалов на износостойкость при трении о жестко закрепленные абразивные частицы.

Заключение

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Показана возможность получения биметаллов медь – сталь плазменной наплавкой на токе прямой и обратной полярности.

2. Плазменная наплавка меди на сталь на токе обратной полярности позволяет в широких пределах регулировать химический состав, структуру и свойства наплавленного слоя.

3. Установлено, что использование тока обратной полярности позволяет снизить скорость общей коррозии и повысить износостойкость медного слоя относительно прямой полярности.

4. Композиционный материал поверхностного слоя с мелкодисперсными включениями, полученный плазменной наплавкой меди на токе обратной полярности с использованием промежуточного слоя из высоколегированного сплава на никелевой основе, обладает лучшими показателями коррозионной стойкости и износостойкости.

Список литературы

1. Сидоров А.И. Восстановление деталей машин напылением и наплавкой. – М.: Машиностроение, 1987. – 192 с.

2. Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров. – СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2008. – 406 с.

3. Смирягин А.П., Смирягина Н.А., Белова А.В. Промышленные цветные металлы и сплавы. – М.: Металлургия, 1974. – 488 с.

4. Плазменная наплавка меди на сталь на токе обратной полярности / С.Д. Неулыбин, Ю.Д. Щицын, П.С. Кучев, И.А. Гилев // Известия Самар. науч. центра РАН. – 2014. – Т. 16, № 1. – С. 468–471.

5. Земзин В.Н. Сварные соединения разнородных металлов. – М.; Л.: Машиностроение, 1969. – 156 с.

6. Абрамович В.Р., Демянцевич В.П., Ефимов Л.А. Сварка плавлением меди и сплавов на их основе. – Л.: Машиностроение, 1988. – 215 с.

7. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение. – М.: Машиностроение, 1990. – 352 с.

8. Сварка разнородных металлов и сплавов / В.Р. Рябов, Д.М. Рабкин, Р.С. Курочко, Л.Г. Стрижевская. – М.: Машиностроение, 1984. – 239 с.

9. Александров А.Г. Коррозионная стойкость сварных швов аустенитно-ферритных сталей в щелочных средах // Сварочное производство. – 1990. – № 8. – С. 15–16.

10. Сараев Ю.Н., Селиванов Ю.В. Оценка производительности и качества выполнения ремонтно-восстановительных работ оборудования из стали типа 12Х18Н10Т // Сварочное производство. – 2011. – № 1. – С. 17–22.

11. Тормашов Н.Д., Чернова Г.П. Теория коррозии и коррозионно-стойкие конструкционные сплавы. – М.: Metallurgy, 1986. – 359 с.

12. Александров А.Г. Коррозионная стойкость сварных соединений хромоникелевых сталей в щелочных средах (обзор) // Сварочное производство. – 1990. – № 5. – С. 12–13.

13. Хрущев М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. – М.: Наука, 1970. – 252 с.

References

1. Sidorov A.I. Vosstanovlenie detalei mashin napyleniem i naplavkoi [Restoration of details of cars dusting and naplavka]. Moscow: Mashinostroenie, 1987. 192 p.

2. Sosnin N.A., Ermakov S.A., Topolianskii P.A. Plazmennye tekhnologii. Rukovodstvo dlia inzhenerov [Plasma technologies. The management for engineers.]. Saint Petersburg: Politekhnikheskii universitet, 2008. 406 p.

3. Smiriagin A.P., Smiriagina N.A., Belova A.V. Promyshlennye tsvetnye metally i splavy [Industrial non-ferrous metals and alloys]. Moscow: Metallurgii, 1974. 488 p.

4. Neulybin S.D., Shchitsyn Iu.D., Kuchev P.S., Gilev I.A. Plazmen-naia naplavka medi na stal' na toke obratnoi poliarnosti [Plasma naplavka of copper on steel on current of the return polarity]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2014, vol. 16, no. 1, pp. 468-471.

5. Zemzin V.N. Svarnye soedineniia raznorodnykh metallov [Welded joints of dissimilar metals]. Moscow, Leningrad: Mashinostroenie, 1969. 156 p.

6. Abramovich V.R., Demiantsevich V.P., Efimov L.A. Svarka plavleniem medi i splavov na ikh osnove [Welding by melting of copper and alloys on their basis]. Leningrad: Mashinostroenie, 1988. 215 p.

7. Lakhtin Iu.M., Leont'eva V.P. Materialovedenie [Materials science]. Moscow: Mashinostroenie, 1990. 352 p.

8. Riabov V.R., Rabkin D.M., Kurochko R.S., Strizhevskaya L.G. Svarka raznorodnykh metallov i splavov [Welding of diverse metals and alloys]. Moscow: Mashinostroenie, 1984. 239 p.

9. Aleksandrov A.G. Korroziionnaya stoikost' svarykh shvov avstenitno-ferritnykh stali v shchelochnykh sredakh [Corrosion resistance of welded seams austenitic ferritic steels in alkaline environments]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1990, no. 8, pp. 15-16.

10. Saraev Iu.N., Selivanov Iu.V. Otsenka proizvoditel'nosti i kachestva vypolneniya remontno-vosstanovitel'nykh rabot oborudovaniya iz stali tipa 12Kh18N10T [Assessment of productivity and quality of performance of rescue and recovery operations of the equipment from steel of type 12X18H10T]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2011, no. 1, pp. 17-22.

11. Tormashov N.D., Chernova G.P. Teoriya korrozii i korroziionnostoikiye konstruksionnye splavy [Theory of corrosion and corrosion-resistant constructional alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1986. 359 p.

12. Aleksandrov A.G. Korroziionnaya stoikost' svarykh soedinenii khromonikelevykh stali v shchelochnykh sredakh (obzor) [Corrosion resistance of welded connections chromonickel staly in alkaline environments (review)]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1990, no. 5, pp. 12-13.

13. Khrushchev M.M., Babichev M.A. Abrazivnoye iznashivanie [Abrasive wear]. Moscow: Nauka, 1970. 252 p.

Получено 02.11.2016

Об авторах

Щицын Юрий Дмитриевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сварочного производства и технологии конструкционных материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: svarka@pstu.ru.

Белинин Дмитрий Сергеевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры сварочного производства и технологии

конструкционных материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: 5ly87@mail.ru.

Неулыбин Сергей Дмитриевич (Пермь, Россия) – аспирант кафедры сварочного производства и технологии конструкционных материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: sn-1991@mail.ru.

Терентьев Сергей Александрович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры сварочного производства и технологии конструкционных материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: svarka@pstu.ru.

About the authors

Yuri D. Schitsyn (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Welding Production and Structural Materials Technology, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: svarka@pstu.ru.

Dmitry S. Belinin (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Department of Welding Production and Structural Materials Technology, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: 5ly87@mail.ru.

Sergey D. Neulybin (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Welding Production and Structural Materials Technology, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: sn-1991@mail.ru.

Sergey A. Terentyev (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Welding Production and Structural Materials Technology, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: svarka@pstu.ru.