

DOI: 10.15593/2224-9877/2016.2.01

УДК 621.791

**Ю.Д. Щицын, Д.С. Белинин, С.Д. Неулыбин,
С.А. Терентьев, А.А. Ефимова**

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

СОЗДАНИЕ СЛОИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОНИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛАЗМЕННОЙ ДУГИ НА ТОКЕ 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 наиболее 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. В данной работе представлены результаты исследования по получению слоистого композиционного материала. Основу композиционного материала составляет высоколегированная коррозионноустойчивая сталь 10X18H10T и никелевый сплав 06X15H60M15. 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 дугой прямого действия обратной полярности. Плазменная дуга обратной полярности помогает достичь минимального проплавления или растворения основного металла, что позволяет получить биметалл с уникальными сочетаниями свойств. Представлены исследования структуры полученного слоистого композитного материала с использованием световой микроскопии. Показано, что применение плазменной дуги обратной полярности тока позволяет получать бездефектные слоистые материалы при наплавке сталей и сплавов разных классов. Структура наплавки мелкодисперсная, с равномерным переходом от слоя к слою однородного материала и четкой границей раздела разнородных материалов. Проведенные механические испытания образцов-свидетелей показали, что материал обладает высокими механическими свойствами. Удастся сочетать такие показатели, как высокий предел прочности и сохранение высокого предела текучести, а относительное удлинение полученного слоистого материала составляет 22 %.

Ключевые слова: плазма, многослойная наплавка, обратная полярность, высоколегированные стали, высоконикелевый сплав, металлографические исследования, структура, механические испытания, микротвердость, предел прочности, предел текучести, относительное удлинение.

**Iu.D. Shchitsyn, D.S. Belinin, S.D. Neulybin,
S.A. Terent'ev, A.A. Efimova**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

CREATING COMPOSITE MATERIALS BASED ON HIGH-NICKEL ALLOYS WITH THE USE OF A PLASMA ARC AT CURRENT 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. This paper presents the results of a study on the production of the layered composite material. The basis of the composite material is high-alloy corrosion-resistant steel and nickel alloy 10H18N10T 06H15N60M15. 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 arc of direct action of reverse polarity. Plasma arc reversed polarity allows for a minimum penetration or dissolution of the base metal to provide a bimetal with unique combinations of properties. Researches laminate structure of the composite material obtained by using light microscopy. It is shown that the application of reverse polarity plasma arc current produces defect-free laminates in surfacing of steels and alloys of different classes. surfacing of the fine structure, a uniform transition from one layer to the homogeneous material and a clear interface between dissimilar materials. Mechanical testing specimens witnesses have shown that the material has good mechanical properties. It manages to combine such indicators as high tensile strength and maintaining a high yield strength and elongation of the resultant laminate is 22%.

Keywords: plasma, multi-layered surfacing, reverse polarity, high-alloy steels, high nickel alloys, metallographic examinations, structure, mechanical testing, micro-hardness, tensile strength, yield strength, elongation.

Введение

Основой современной техники являются металлы и металлические сплавы. Разнообразные требования к металлическим материалам возрастают по мере развития новых отраслей техники [1].

Прогрессивно развивающиеся отрасли промышленности – химическая, нефтяная, машиностроение, транспорт и др. – основываются на широком применении высокопрочных железных, никелевых и других сплавов [2].

Применение никеля в современной технике весьма разнообразно. Он используется в чистом виде как химически стойкий ферромагнитный материал в аппаратостроении, как катализатор и как материал для аккумуляторов [3]. Чистый никель применяется в значительных масштабах для защитных поверхностных покрытий: так называемое нике-

лирование имеет большое значение для придания поверхности металлических материалов высокой химической стойкости [4].

Сварка никеля и его сплавов затруднена вследствие высокой чувствительности к примесям, поэтому необходима тщательная зачистка кромок и прилегающих к ним участков, так как на них образуется налет, содержащий примеси, при плавлении которых образуется легкоплавкая эвтектика, которая приводит к появлению кристаллизационных трещин [5]. Никель и его сплавы проявляют большую склонность к образованию пор вследствие хорошей растворимости в расплавленном металле азота, водорода, кислорода и резкого снижения растворимости при затвердевании металла [6].

Нержавеющая сталь используется в электроэнергетике, химической промышленности, машиностроении и многих других областях. Она имеет намного более высокую жаропрочность, чем другие стали [7].

При наплавке нержавеющей аустенитных сталей на малоуглеродистые и низколегированные стали возникает ряд трудностей, обусловленных значительным различием в их химическом и фазовом составех и теплофизических свойствах [8]. В то же время температуры плавления сталей рассматриваемых структурных классов отличаются незначительно, что приводит к обязательному проплавлению основного металла в процессе наплавки. В связи с этим при наплавке аустенитных нержавеющей сталей в наплавленном металле всегда будет находиться какая-то доля элементов основного металла, и зависеть она будет в первую очередь от способа, а также от режима наплавки, определяющих глубину проплавления основного металла, и длительности контактирования твердой и жидкой фаз [9, 10].

Многие изделия из дорогостоящих дефицитных металлов и сплавов изготавливают комбинированными: основа состоит из наиболее дешевых материалов (например, обычной малоуглеродистой стали), а на рабочие поверхности наплавливают сплавы со специальными свойствами [11]. Такие биметаллические конструкции, полученные наплавкой, во много раз дешевле конструкций, изготавливаемых целиком из металла с требуемыми свойствами [12].

При эксплуатации изделий в условиях агрессивных сред и высоких температур часто от изделия требуется сочетание таких свойств, как жаростойкость, жаропрочность, коррозионная стойкость, кислотостойкость, поэтому применение двух и более высоколегированных сплавов

может быть технологически необходимо для обеспечения работоспособности изделия [13].

Для изготовления ответственных биметаллических изделий следует применять такие способы наплавки, которые обеспечивают минимальное проплавление или растворение основного металла, т.е. способы наплавки, при которых источники теплоты позволяют регулировать нагрев и плавление присадочного и основного металла.

Из новых, уже применяемых в промышленности способов наплавки наиболее полно удовлетворяют требованию получения биметаллических изделий с минимальной глубиной проплавления основного металла способы плазменной наплавки.

Плазменная дуга как источник тепла находит всё более широкое применение в металлургии и обработке материалов, в том числе и для наплавки. Энергетические, тепловые и газодинамические параметры низкотемпературной плазмы сравнительно легко регулируются в широких пределах. Это позволяет получать наплавленные слои с заданными физико-химическими и механическими свойствами. Наряду с этим плазменные способы наплавки обеспечивают и высокую производительность процесса; не требуют сложного оборудования и специализированных источников питания [14].

Решить ряд проблем, связанных с уменьшением глубины проплавления и перемешивания наплавляемых материалов, позволяет плазменная наплавка на токе обратной полярности. Нестационарные катодные пятна, блуждающие по поверхности изделия, приводят к резкому нагреву и расплавлению металла в тонком поверхностном слое, повышению смачиваемости наплавляемого изделия, улучшению адгезии, меньшему тепловому воздействию на наплавляемую деталь [15].

Методика проведения работы и результаты исследований

Целью данной работы является создание слоистого композиционного материала, полученного на основе хромоникелевых сплавов и высоколегированных сталей методом многослойной плазменной наплавки при работе плазматрона на токе обратной полярности.

Наплавка выполнялась в следующей последовательности:

1. Наплавка первого слоя проволокой 10X18H10T $d = 1,6$ мм на материал подложки. В качестве подложки использовали пластину из низколегированной стали 09Г2С. Высота слоя 3,5–3,8 мм. Для по-

лучения необходимой высоты слоя наплавка производилась в три прохода.

2. Наплавка второго слоя проволокой 06X15H60M15 $d = 1,6$ мм на слой из высоколегированной стали 10X18H10T. Высота наплавленного слоя за три прохода составила 2,7–3,2 мм.

На рис. 1 представлен слоистый материал после механической обработки. Режим наплавки представлен в табл. 1.

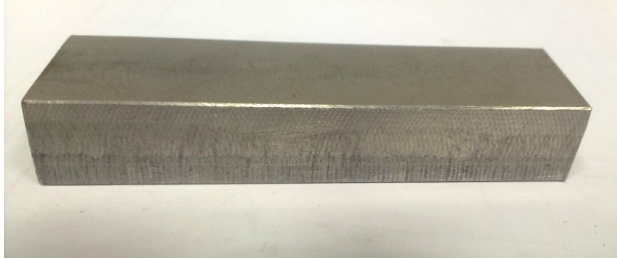


Рис. 1. Вид полученного слоистого материала

Таблица 1

Режимы наплавки

Слой	Q_3 , л/мин	$Q_п$, л/мин	I_d , А	$d_{п.с}$, мм	$h_{с-и}$, мм	$v_{п.п}$, м/мин	$v_{нап}$, м/ч
10X18H10T	6	3	180	4	5	1,8	7
06X15H60M15	6	3	180	4	5	1,8	7

Структурные исследования наплавленного материала (09Г2С + 10X18H10T + 06X15H60M15), зон сплавления между слоями с применением световой микроскопии представлены на рис. 2, 3.

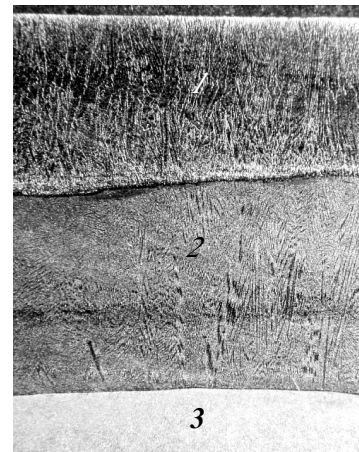


Рис. 2. Панорамный вид полученного материала (X10): 1 – 2-й слой шва наплавки; 2 – 1-й слой шва наплавки; 3 – материал подложки

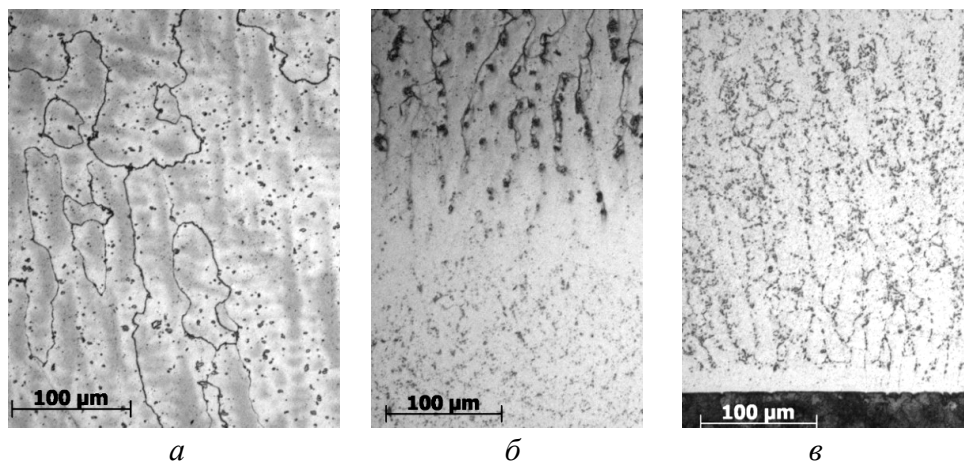


Рис. 3. Микроструктура слоистого материала: *а* – слой 06X15H60M15; *б* – переходная зона 10X18H10T + 06X15H60M15; *в* – структура 10X18H10T над линией сплавления с подложкой

В ходе исследования было установлено:

– на образцах оба слоя наплавки плотные, без трещин, пор, рыхлот, несплавлений и окисных плёнок;

– в первом слое наплавки структура дендритного характера, оси дендритов первого и второго порядков тонкие, в междендритном пространстве имеются множественные выделения мелкодисперсных частиц, характерные для никелевых сплавов второй γ' -фазы в виде строчек (см. рис. 3);

– на границе первого и второго слоев наплавки трещин, несплавлений, пор и других дефектов сварки нет. На границе сплавления между слоями наблюдается прослойка шириной 50–80 мкм однородного твердого раствора (см. рис. 3). Во втором слое наплавки (высота 2,7–3,2 мм) структура дендритного характера, с образованием первичных границ зерен, выделения частиц второй γ' -фазы равномерно распределены в междендритном пространстве, у границы сплавления выделения частиц второй фазы группируются в строчки (см. рис. 3).

Результаты замеров микротвердости приведены в табл. 2 и на рис. 4, ниже представлены механические свойства. Результаты замера микротвердости показали равномерное уменьшение твердости по глубине исследуемого материала от поверхности никелевого сплава к материалу подложки. При проведении механических испытаний слой подложки был удален.

Таблица 2

Микротвердость

Номер образца	Результаты замеров микротвердости $H_{\mu 50}$, кгс/мм ²			
	2-й слой шва наплавки	1-й слой шва наплавки	Зона термовлияния	Основной материал
1	224–261	193–208	151–162	150–155

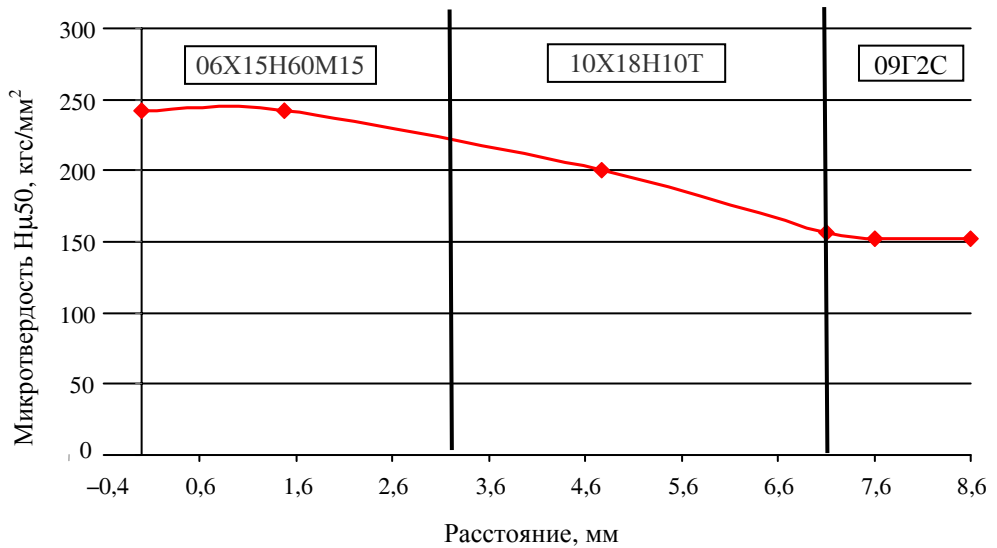


Рис. 4. Распределение микротвердости по сечению полученного материала

Механические свойства слоистого материала:

КСУ, Дж/см ²	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
60,06	540,4	395,8	22,2

Значения предела прочности полученного материала соответствуют среднему значению предела прочности входящих в его состав материалов (рис. 5).

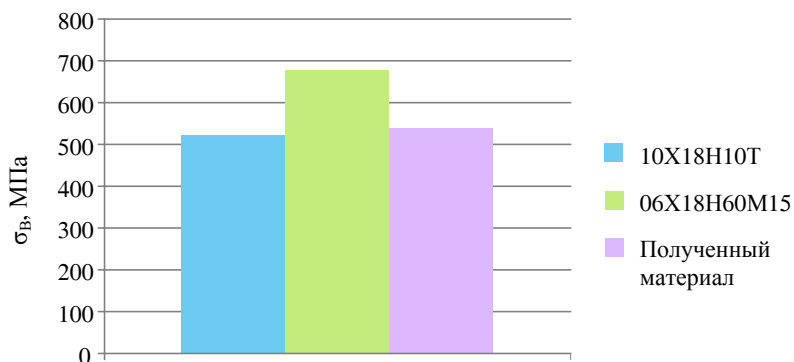


Рис. 5. Предел прочности

При высоком показателе предела прочности сохраняется высокое значение предела текучести (рис. 6). На рис. 7 приведена съемка поверхности разлома.

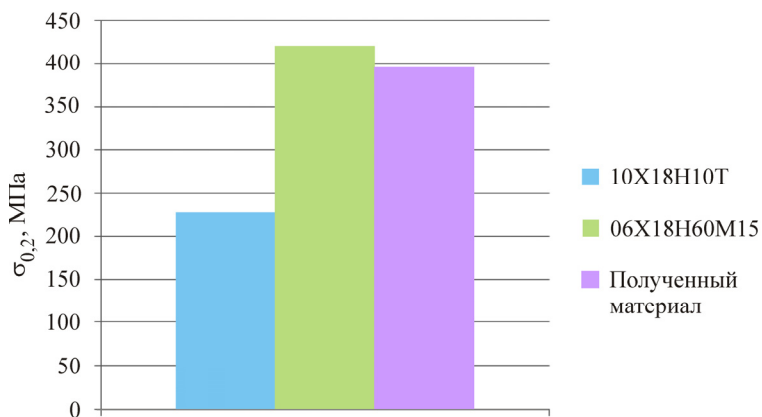


Рис. 6. Предел текучести



Рис. 7. Поверхность после разрыва образца

Понижение значения ударной вязкости относительно высоконикелевого сплава, возможно, объясняется плоскостью разрушения и направлением удара (рис. 8). На рис. 9 представлена поверхность разлома после испытаний на ударную вязкость.

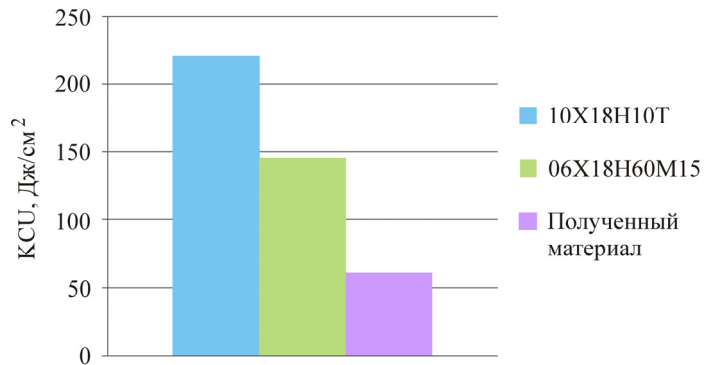


Рис. 8. Ударная вязкость

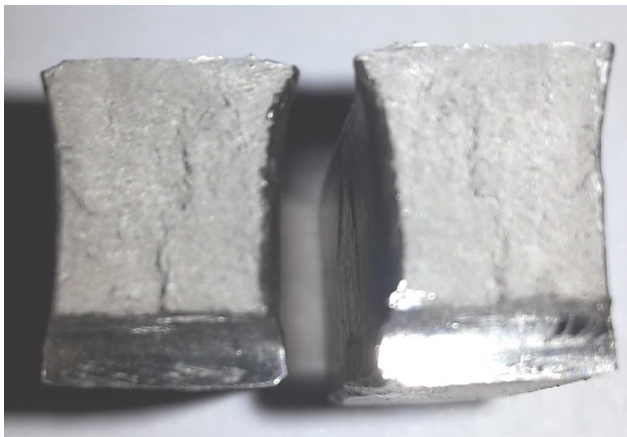


Рис. 9. Поверхность разлома после испытания на КСУ

Заключение

На основании проделанной работы можно сформулировать следующие выводы:

1. Проведены исследования по созданию слоистого материала, выполненного многослойной плазменной наплавкой током обратной полярности.

2. Микроструктурные исследования показали, что оба слоя наплавки плотные, внутренние дефекты отсутствуют.

3. Установлено, что структура полученного слоистого материала мелкодисперсная, с равномерными выделениями характерной второй γ' -фазы.

4. Показано, что полученный слоистый материал обладает высоким пределом прочности (540 МПа), при этом сохраняется высокий предел текучести (395 МПа) с относительным удлинением 22,2 %.

Работа выполнена в рамках проектной части государственного задания № 11.1196.2014/К при поддержке Министерства образования и науки РФ.

Список литературы

1. Плазменная наплавка металлов / А.Е. Вайнерман [и др.]. – М.: Машиностроение, 1969. – 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. Никелевые жаропрочные сплавы нового поколения / Е.Н. Каблов, Н.В. Петрушин, И.Л. Светлов, И.М. Демонис // Авиационные материалы и технологии: юбилейн. науч.-техн. сб. / под общ. ред. акад. РАН, проф. Е.Н. Каблова; Всерос. ин-т авиац. машиностроения. – М., 2012. – С. 36–52.

5. Zuchowski R.S., Garrabrant E. New developments in plasma arc surfacing // *Welding J.* – 1964. – № 1. – P. 13–26.

6. Банных О.А., Блинов В.М. Новые конструкционные высокопрочные экономнолегированные стали // *Сталь.* – 1988. – № 10. – С. 50–54.

7. Плазменная наплавка высоколегированной стали 10X18H8T на низколегированную сталь 09Г2С / Ю.Д. Щицын, С.Д. Неулыбин, П.С. Кучев, И.А. Гилев // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение.* – 2014. – Т. 16, № 3. – С. 5–14.

8. Shitsyn Yu.D., Belinin D.S., Neulybin S.D. Plasma surfacing steel 40ch13 on the straight and reverse current polarity // Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST). – 2015. – February. – Vol. 2, iss. 2. – P. 102–114.

9. Стрoение и свойства биметаллических материалов: монография / А.И. Тананов, Катихин В.Д., И.С. Гузь [и др.]. – М.: Наука, 1975. – 124 с.

10. 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.

11. Shubhavardhan R.N., Surendran S. Friction welding to join dissimilar metals // Int. J. of Emer. Tech. and Adv. Eng. – 2012. – Vol. 4, № 10. – P. 231–240.

12. Восстановление деталей из жаропрочных сплавов методом лазерной наплавки / А.И. Мисюров, А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов [и др.] // Сварка на рубеже веков. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – С. 81.

13. Щицын Ю.Д. Плазменные технологии в сварочном производстве / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2004. – Ч. 1. – 73 с.

14. Щицын Ю.Д., Косолапов О.А., Щицын В.Ю. Возможности плазменной обработки металлов током обратной полярности // Сварка. Диагностика. – 2009. – № 2. – С. 42–45.

15. Shitsyn Yu.D., Belinin D.S., Neulybin S.D. Plasma surfacing of high-alloy steel 10Cr18Ni8Ti on low-alloy steel 09Mg2Si // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10, № 20. – P. 41103–41109.

References

1. Vainerman A.E. [et al.]. Plazmennaiia naplavka metallov [Plasma naplavka of metals]. Moscow: Mashinostroenie, 1969. 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: Metallurgiiia, 1974. 488 p.

4. Kablov E.N., Petrushin N.V., Svetlov I.L., Demonis I.M. Ni-kelevye zharoprochnye splavy novogo pokoleniia [Nickel heat resisting alloys of new generation]. *Iubileinyi nauchno-tehnicheskii sbornik "Aviatsionnye materialy i tekhnologii"*. Moscow: Rossiiskaia akademiia nauk, Vserossiiskii institut aviatsionnogo mashinostroeniia, 2012, pp. 36-52.

5. Zuchowski R.S., Garrabrant E. New developments in plasma arc surfacing. *Welding Journal*, 1964, no. 1, pp. 13-26.

6. Bannykh O.A., Blinov V.M. Novye konstruktsionnye vysokoprochnye ekonomnolegirovannye stali [New constructional high-strength ekonomnolegirovanny became]. *Stal'*, 1988, no. 10, pp. 50-54.

7. Shchitsyn Iu.D., Neulybin S.D., Kuchev P.S., Gilev I.A. Plazmen-naia naplavka vysokolegirovannoi stali 10Kh18N8T na nizkolegirovannuiu stal' 09G2S [A plasma naplavka of the high-alloyed steel 10X18H8T on a bottom-kolegirovannuyu steel 09G2S]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2014, vol. 16, no. 3, pp. 5-14.

8. Shitsyn Yu.D., Belinin D.S., Neulybin S.D. Plasma surfacing steel 40ch13 on the straight and reverse current polarity. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST)*, 2015, February, vol. 2, iss. 2, pp. 102-114.

9. Tananov A.I., Katikhin V.D, Guz' I.S. [et al.]. Stroenie i svoistva bimetallicheskih materialov [Structure and properties of bimetallic materials]. Moscow: Nauka, 1975. 124 p.

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

11. Shubhavardhan R.N., Surendran S. Friction welding to join dissimilar metals. *International Journal of Emer. Technology and Advanced Engineering*, 2012, vol. 4, no. 10, pp. 231-240.

12. Misiurov A.I., Grigor'iants A.G., Shiganov I.N. Vosstanovlenie detalei iz zharoprochnykh splavov metodom lazernoi naplavki [Restoration of details from heat resisting alloys by method of a laser naplavka]. *Svarka na rubezhe vekov*. Moskovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni N.E. Baumana, 2002, p. 81.

13. Shchitsyn Iu.D. Plazmennye tekhnologii v svarochnom proizvodstve [Plasma technologies in welding production]. Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2004. Part 1. 73 p.

14. Shchitsyn Iu.D., Kosolapov O.A., Shchitsyn V.Iu. Vozmozhnosti plazmennoi obrabotki metallov tokom obratnoi poliarnosti [Possibilities of plasma processing of metals current of the return polarity]. *Svarka. Diagnostika*, 2009, no. 2. pp. 42-45.

15. Shitsyn Yu.D., Belinin D.S., Neulybin S.D. Plasma surfacing of high-alloy steel 10Cr18Ni8Ti on low-alloy steel 09Mg2Si. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2015, vol. 10, no. 20, pp. 41103-41109.

Получено 22.03.2016

Об авторах

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

Белинин Дмитрий Сергеевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: 51y87@mail.ru.

Неулыбин Сергей Дмитриевич (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: sn-1991@mail.ru.

Терентьев Сергей Александрович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: svarka@pstu.ru.

Ефимова Анна Анатольевна (Пермь, Россия) – магистрант кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: svarka@pstu.ru.

About the authors

Iurii D. Shchitsyn (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.

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

Sergei 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.

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

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