

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ОБРАБОТКОЙ СТАЛИ 20X13

И.А. АСТАПОВ, канд. физ.-мат. наук
К.П. ЕРЁМИНА, аспирант
М.А. ТЕСЛИНА, канд. техн. наук
С.Н. ХИМУХИН, доктор техн. наук
В.В. ГОСТИЩЕВ, канд. техн. наук
 (ИМ ХНЦ ДВО РАН, г. Хабаровск)

Поступила 21 октября 2013
 Рецензирование 20 ноября 2013
 Принята к печати 22 ноября 2013

Астапов И.А. – 680042, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 153,
 Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
 Институт материаловедения Хабаровского научного центра
 Дальневосточного отделения Российской академии наук,
 e-mail: immaterial_khv@mail.ru

Получены жаростойкие покрытия из Ni–Al-сплавов различного состава на поверхности стали 20X13 методом электроискровой обработки. Исследован фазовый и элементный состав полученных сплавов и покрытий. Выявлена зависимость показателей жаростойкости от исходного состава и структуры Ni–Al-сплавов. Впервые показано, что функциональные покрытия, полученные при обработке стали 20X13 электродными материалами из сплавов состава 66,9 Ni – 32,9 Al и 79,3 Ni – 20,1 Al, обладают наибольшей сплошностью и толщиной, а также в их структуре образуются фазы NiAl и Ni₃Al. Полученные в работе данные показывают, что методом электроискровой обработки на поверхности конструкционной стали возможно получить жаростойкие и жаропрочные покрытия из Ni–Al-сплавов различного состава с высокими показателями твердости, сохраняющие свои физико-механические свойства после термоциклирования при высоких температурах.

Ключевые слова: микроструктура, функциональные покрытия, электроискровая обработка, жаропрочные сплавы, микротвердость.

Введение

Функциональные покрытия, полученные на конструкционных и инструментальных сталях из никель-алюминиевых сплавов, приобретают все большую значимость в энергетическом машиностроении и авиапромышленности благодаря своим уникальным свойствам – коррозионной стойкости, жаростойкости и жаропрочности [1, 2, 3]. В литературе имеются данные по формированию покрытий из чистых Ni–Al-сплавов, а также из промышленных Ni–Al-сплавов, при этом спектр используемых упрочняющих технологий достаточно широк [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. Однако

практически отсутствуют сведения о применении электроискровой обработки (ЭИО) как метода нанесения коррозионностойких, жаростойких и жаропрочных Ni–Al-покрытий [11, 12, 13]. Данный метод основан на полярном массопереносе материала анода (легирующего электрода) на катод (материал-заготовку) и отличается высокой энергоэффективностью, возможностью использования любых токопроводящих материалов и защитных сред, мобильностью установок и применением их в качестве дополнительных модулей к металлообрабатывающим станкам [14].

За последние десятилетия российскими и зарубежными предприятиями и научными центра-

ми разработано множество марок сложнолегированных Ni–Al-сплавов различного назначения, включающих более 15–20 легирующих и микролегирующих элементов, многие из которых являются дорогостоящими [15, 16, 17]. Применение таких сложных по составу сплавов обусловлено, прежде всего, необходимостью обеспечения высоких прочностных свойств при рабочих температурах, близких к температурам плавления, во всем объеме материала. В настоящее время наблюдается тенденция к снижению количества легирующих элементов [18]. Наибольшее значение в структуре жаропрочных сплавов на основе системы Ni–Al имеет дисперсионно-твердеющая γ' -фаза (Ni_3Al) [19, 20, 21]. Оптимальной для промышленных Ni–Al-сплавов считается объемная доля γ' -фазы в пределах 50...70 %, что обеспечивает наилучшее сочетание физико-механических свойств при рабочих температурах до $T \approx 1000...1200$ °С. Использование Ni–Al-сплавов в качестве функциональных покрытий дает возможность исключить из состава редкоземельные и другие легирующие элементы без существенного падения жаростойких и жаропрочных характеристик [22, 23].

Таким образом, получение функциональных покрытий на основе системы Ni–Al-методом электроискровой обработки конструкционных и инструментальных сталей представляет научно-практический интерес. В данной работе приведены результаты исследований электроискровых покрытий, полученных при использовании синтезированных Ni–Al-сплавов различного состава.

Методика и материалы

Материалом катода выбрана широко применяемая сталь 20Х13 [24]. Сплавы на основе системы Ni–Al для использования в качестве легирующих электродов получали в высокочастотной индукционной печи «Аверон УЛП 2.2» с применением инертного газа и разливкой в предварительно разогретую до $T = 500$ °С графитовую форму. Электроискровую обработку производили на установке «Элитрон-22А» ($F = 110$ Гц, $U = 15...90$ В, $I = 0,5...3,0$ А). Химический состав определяли на рентгенофлуоресцентном волнодисперсионном спектрометре «Спектроскан МАКС-GV». Рентгенофазовый анализ производился на диф-

рактометре «ДРОН-7» ($\text{Cu}_{K\alpha}$). Металлографический анализ выполнялся с помощью оптического микроскопа «Planar Micro-200» и растрового электронного микроскопа «Hitachi SU-70». Микротвердость определяли на микротвердомере «ПМТ-3». Испытания на жаростойкость проводились согласно ГОСТ 6130-71 [25].

Результаты и обсуждение

В связи с многофакторным, сложным по своей физико-химической природе электроискровым процессом получить функциональные покрытия с заданными свойствами, отвечающими свойствам исходным электродных материалов, не всегда представляется возможным. Поэтому состав, структура и свойства покрытий могут различаться от аналогичных характеристик исходных электродных материалов. Исходя из этих соображений в качестве анодных материалов разработаны и получены интерметаллидные сплавы Ni–Al различного состава, в некоторых случаях отличающиеся от оптимального по стехиометрии Ni_3Al -сплава [26] (см. таблицу).

Химический и фазовый состав сплавов системы Ni–Al

Номер сплава	Состав, масс. % (ост. – примеси Fe)		Фазовый состав
	Ni	Al	
1	30,3	69,5	Al, NiAl_3
2	57,2	42,1	NiAl
3	66,9	32,9	(Ni), Ni_3Al NiAl
4	79,3	20,1	(Ni), Ni_3Al NiAl
5	83,5	16,4	(Ni) Ni_3Al

Результаты рентгенофазового анализа показали наличие в двух сплавах (№ 3 и 4) γ -твердого раствора, γ' -фазы (Ni_3Al) с когерентной твердому раствору ГЦК-решеткой и фазы NiAl (рис. 1). Термическая обработка данных сплавов ($T = 700$ °С и $T = 770$ °С, 6 ч, охлаждение с печью) позволила увеличить объемную долю преципитата Ni_3Al

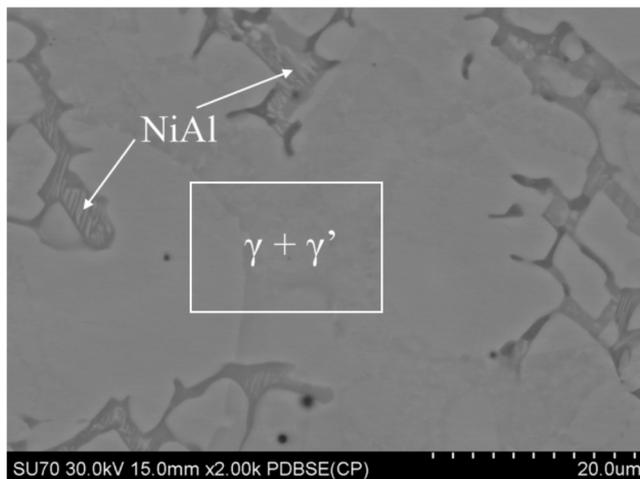


Рис. 1. РЭМ-изображение поверхности сплава № 4 (термообработка $T = 770$ °С, 6 ч)

в этих сплавах. Нагрев выше 800 °С ($T = 840$ °С, 6 ч, охлаждение с печью) приводит к постепенному растворению и, как следствие, уменьшению содержания γ' -фазы в сплавах.

Использование Ni–Al-сплавов для создания жаростойких покрытий накладывает ряд требований к составу, структуре и свойствам получаемых материалов, так как в большинстве случаев теплонагруженные детали ГТД и ГТУ входят в состав наиболее ответственных узлов. Среди таких требований: высокие показатели жаростойкости в условиях циклических температурных нагрузок; минимальная скорость диффузии покрытия к основе для сохранения первоначального химического и фазового состава; высокие значения твердости для обеспечения высокой эрозионной стойкости; достаточные значения толщины и сплошности покрытий и др. В связи с этим в данной работе особое внимание уделялось качеству покрытий (отсутствие пор, трещин и т. п.), образованию в составе слоя фазы NiAl и γ' -фазы, высоким значениям твердости и жаростойкости.

Фазы NiAl и Ni_3Al были идентифицированы в покрытиях, полученных с помощью сплавов № 3 и 4 (рис. 2). На дифрактограмме обнаружены рефлексы сверхструктуры γ' -фазы ((100), (110), (210), (211)), при этом общий характер спектра указывает на отсутствие внутренних дефектов в структуре покрытий и остаточных напряжений. Положение пиков γ' -фазы указывает на игольчатую структуру фазы Ni_3Al , так как несоответствие параметров решетки с твердым раствором составляет $\Delta a \approx 1 \dots 1,5$ % [23].

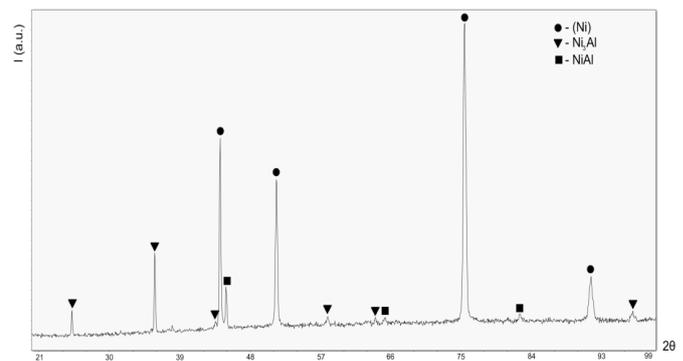


Рис. 2. Дифрактограмма покрытия, полученного при ЭИЛ сплавом № 4 на подложке из стали 20X13

На рис. 3 показана структура покрытий после испытаний на жаростойкость (термоциклирование при температурах 600, 700, 800, 900 °С, выдержка 6 ч, охлаждение с печью). Наиболее качественные покрытия получены при использовании сплавов № 3 и 4 (рис. 3, сплав 3 и 4): толщина покрытий составляет 50...150 мкм, отмечено практически полное отсутствие поперечных трещин и оксидного слоя после термообработки. Покрытие из сплава № 1, содержащее большое количество алюминия, после испытаний на жаростойкость практически наполовину состоит из сплошного равномерного коррозионного слоя (рис. 3, сплав 1). Покрытие из сплава № 2 имеет глубокие продольные и поперечные трещины, из-за чего проникающее действие коррозии отрицательно сказывается на показателях жаростойкости (рис. 3, сплав 2). Относительно тонкое покрытие из сплава № 5 (рис. 3, сплав 5) после испытаний покрыто практически сплошным неравномерным коррозионным слоем, что не позволяет сохранять стойкость при высоких температурах длительное время.

Значения микротвердости полученных покрытий указывают на достаточную однородность их структуры. Исследование микротвердости ($\gamma + \gamma'$)-областей в покрытиях показало, что при температурах термообработки до 700 и 770 °С наблюдается увеличение средней микротвердости при использовании в качестве анодных материалов сплавов № 3 и 4 (рис. 4). Полученные данные свидетельствуют о влиянии объемного содержания γ' -фазы на микротвердость [28]. Однако при $T = 840$ °С значения микротвердости падают, что указывает на частичное растворение фазы Ni_3Al . Эти данные согласуются с результатами рентгенофазового анализа, который

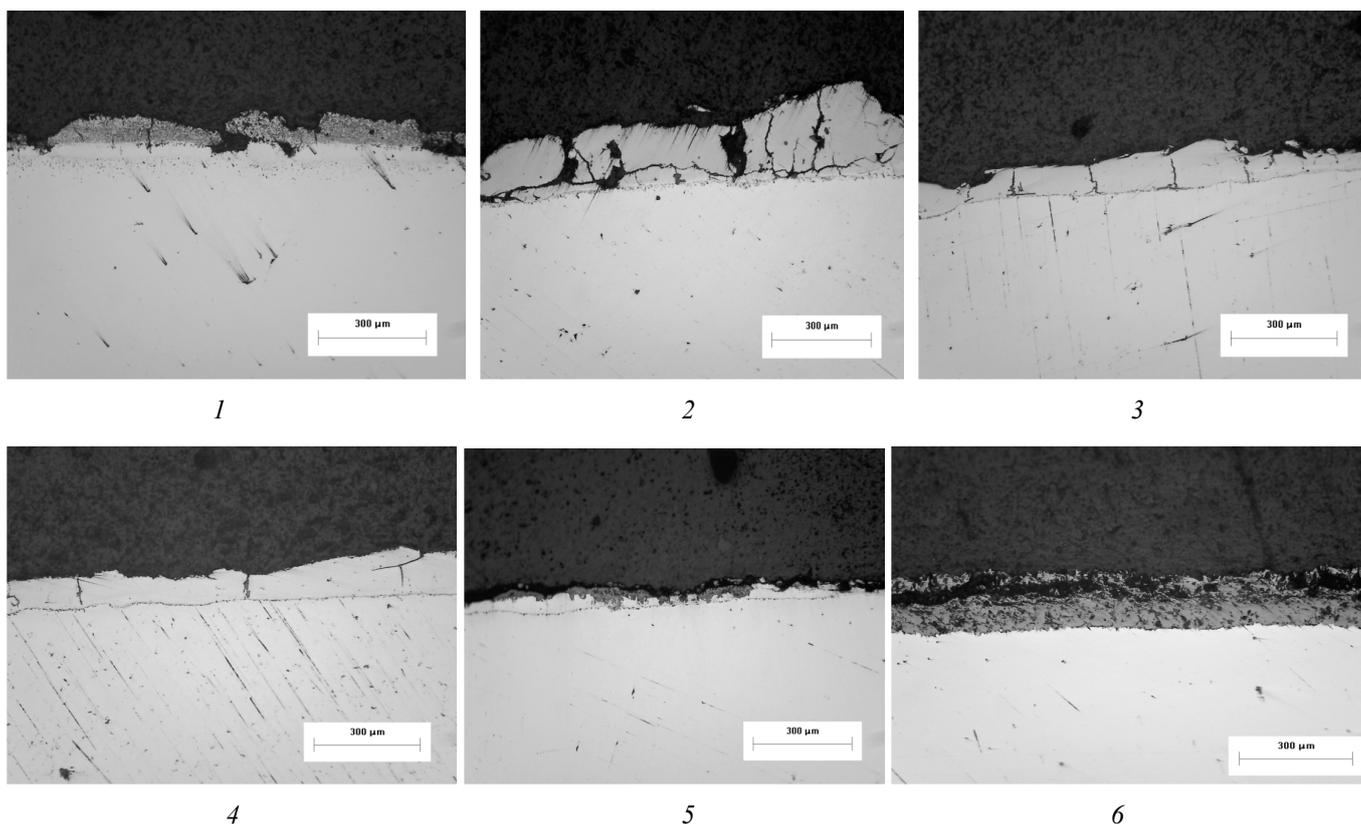


Рис. 3. Поперечное сечение ЭИЛ-покрытий после испытаний на жаростойкость при $T = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$, 6 ч, охлаждение с печью. Основа – сталь 20X13

показал относительное увеличение объемной доли γ' -фазы в покрытиях после испытаний на жаростойкость при $T = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $T = 770\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ее уменьшение при $T = 840\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Дополнительные исследования шероховатости поверхности показали, что использование в качестве электродного материала сплава № 4 приводит к формированию слоя с показателями $R_a = 4,2\text{ мкм}$, $R_{\text{max}} = 35\text{ мкм}$, аналогичные значения для покрытия из сплава № 3 – 10,6 и 70,9 мкм соответственно. Разработанная ранее и успешно

применяемая технология БУФО [29] позволяет улучшить качественные характеристики покрытий из Ni–Al-сплавов. Так, например, предварительные эксперименты по исследованию шероховатости показали, что после финишной обработки БУФО покрытие из сплава № 4 отвечает значениям $R_a = 2,9\text{ мкм}$, из сплава № 3 $R_a = 1,2\text{ мкм}$.

Таким образом, показано, что применение сплавов № 3 и 4 является наиболее перспективным для создания на поверхности стали 20X13 методом электроискровой обработки функциональных покрытий, отвечающих высоким значениям жаростойкости, жаропрочности. Данный способ обработки может успешно применяться в областях энергетического машиностроения и авиапромышленности для создания защитных покрытий на поверхности ответственных узлов и деталей.

Выводы

Применение сплавов состава 66,9 Ni – 32,9 Al и 79,3 Ni – 20,1 Al для формирования на поверхности стали 20X13 защитного покрытия

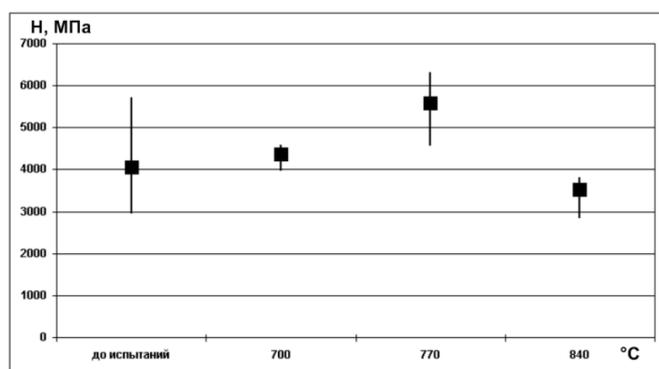


Рис. 4. Микротвердость ($\gamma+\gamma'$)-области в покрытие из сплава № 4 до и после испытаний на жаростойкость при температурах 700, 770 и 840 °C

методом электроискровой обработки приводит к образованию интерметаллидных фаз NiAl и Ni₃Al. Последующая термообработка ($T = 700 \dots 770$ °C) позволяет увеличить значения микротвердости в слое и объемное содержание precipitata γ' -Ni₃Al.

Список литературы

1. *Жаропрочные сплавы* / Ч. Симс, В. Хагелъ; пер. с англ. – М.: Металлургия, 1976. – 568 с.
2. *Intermetallics* / Gerhard Sauthoff // Weinheim; New York; Basel; Cambridge; Tokyo: VCH, 1995. – 165 p.
3. *Reed R.C. The Superalloys: Fundamentals and Applications* / R.C. Reed // Cambridge University Press, 2008. – 392 p.
4. *Durocher, J. Characterization of the Micro-Welding Process for Repair of Nickel Base Superalloys* / J. Durocher, N.L. Richards // *Journal of Materials Engineering and Performance*, Volume 16(6), 2007. – P. 710–719.
5. *Tan X.P. Characterization of topologically close-packed phases in secondary reaction zone in a coated CMSX-4 single crystal Ni-based superalloy* / X.P. Tan, et al. // *Journal of Materials Science*, 2013, Volume 48, Issue 3. – P. 1085–1089.
6. *Paul S. Corrosion Testing of Ni Alloy HVOF Coatings in High Temperature Environments for Biomass Applications* / S. Paul, M.D.F. Harvey // *Journal of Thermal Spray Technology*, 2013, Volume 22, Issue 2-3. – P. 316–327.
7. *Nutzel R. Damage evolution during thermomechanical fatigue of a coated monocrystalline nickel-base superalloy* / R. Nutzel, E. Affeldt, M. Goken // *International Journal of Fatigue*, 30 (2008). – P. 313–317.
8. *Jakubowski J. Diffusion pressure welding of NiAl and Ni₃Al-based alloys with St3S steel* / J. Jakubowski, A. Krajewski, M. Woznicza // *Welding International*, 2005, 19 (12). – P. 950–955.
9. *Технологические основы модифицирования поверхности деталей из жаропрочных никелевых сплавов с жаростойким NiCrAlY покрытием с применением сильноточных импульсных электронных пучков* / А.Г. Пайкин и др. // *Физика и химия обработки материалов*. – 2008. – № 3. – С. 56–60.
10. *Ковтун А.И. Исследование процессов жидкофазного формирования покрытий на основе алюминидов никеля* / А.И. Ковтун, Т.В. Чермашенцева, С.В. Мямин // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2013. – № 4. – С. 24–28.
11. *Sheldon G.L. Characteristics of Ni-Ti surface alloys formed by electrospark deposition* / G.L. Sheldon, R. Wang, R.A. Clark // *Surface and Coating Technology*, 36 (1988). – P. 445–454.
12. *Yu-jiang Xie Microstructural morphology of electrospark deposition layer of a high gamma prime superalloy* / Yu-jiang Xie, Mao-cai Wang // *Surface & Coatings Technology*, 201 (2006). – P. 691–698.
13. *Heard D.W. Development of a nanostructure microstructure in the Al-Ni system using the electrospark deposition process* / D.W. Heard, M. Brochu // *Journal of Materials Processing Technology*, 210 (2010). – P. 892–898.
14. *Верхотуров А.Д. Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании* / А.Д. Верхотуров. – Владивосток: Дальнаука, 1995. – 323 с.
15. *Superalloys: A Technical Guide* / M. Donachie, Jr., S. Donachie // 2nd ed., ASM International, 2002. – 408 p.
16. *Жаропрочные стали и сплавы. Справочное издание* / С.Б. Масленков. – М.: Металлургия, 1983. – 192 с.
17. *Производство газотурбинных двигателей* / В.В. Крымов, Ю.С. Елисеев, К.И. Зудин; под ред. В.В. Крымова. – М.: Машиностроение, 2002. – 376 с.
18. *Каблов Е.Н. Материалы для авиакосмической техники* // *Российская энциклопедия САС. Авиационно-космическое машиностроение* / гл. ред. А.Г. Братухин. М.: ОАО «НИЦ АСК», 2008. – С. 377–388.
19. *Фазовый анализ никелевых сплавов* / Р.Б. Голубцова. – М.: Наука, 1969. – 234 с.
20. *Yu Y. Preparation, microstructure and tribological properties of Ni₃Al intermetallic compound coating by laser cladding* / Y. Yu, J. Zhou, J. Chen, H. Zhou, C. Guo // *Intermetallics*, 18 (2010). – P. 871–876.
21. *Kablov E.N. Intermetallic Ni₃Al-Base Alloy: a Promising Material for Turbine Blades* / E.N. Kablov, B.S. Lomberg, V.P. Buntushkin, E.P. Golubovskii, S.A. Muboyadzhyan // *Metal Science and Heat Treatment*, Vol. 44, Nos. 7-8, 2002. – P. 284–287.
22. *Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме* / Б.А. Мовчан, И.С. Малашенко. – Киев: Наукова думка, 1983. – 232 с.
23. *Суперсплавы II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок* / под ред. Ч.Т. Симса; пер. с англ. / под ред. Р.Е. Шалина – М.: Металлургия, 1995. – 384 с.
24. *Коррозионностойкие, жаростойкие и высокопрочные стали и сплавы: справ. изд.* / А.П. Шлямнев и др. – М.: «Интермет Инжиниринг». 2000. – 232 с.
25. *ГОСТ 6130-71 – Металлы. Методы определения жаростойкости.*
26. *Okamoto H. Al-Ni (Aluminum-Nickel)* / H. Okamoto // *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, Vol. 25, No.4, 2004. – P. 394.

27. *Жаропрочные стали и сплавы* / Ф.Ф. Химушин. – М.: Металлургия, 1969. – 752 с.

28. *Davydov V.M.* Improvement of coating quality obtained by electro spark alloying with nonabrasive ul-

trasonic finishing polishing/ V.M. Davydov, S.N. Khimukhin, E.A. Ledkov, A.V. Gil // 3-rd International conference on Manufacturing engineering. Kallithea of Chalkidiki, Grece, 1-3 October, 2008. – С. 199–204.

Obrabotka metallov

N 4(61), October–December 2013, Pages 12-18

Structure and properties of functional coatings produced by electrospark deposition of a steel 20X13

I.A. Astapov, K.P. Eremina, M.A. Teslina, S.N. Khimukhin, V.V. Gostishchev

Institute for Material Studies Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences,
Tikhookeanskaya st., 153,
Khabarovsk, 680042, Russia

E-mail: immaterial_khv@mail.ru

Received 21 October 2013

Revised 20 November 2013

Accepted 22 November 2013

Abstract

Temperature-resistant coatings obtained from Ni-Al alloys of various compositions on the steel by the method electrospark deposition are obtained. The phase and elemental compositions of the obtained alloys and coatings are investigated. The dependence of the heat resistance on the original composition and structure of the Ni-Al alloys are revealed. It is shown for the first time that the functional coatings formed during steel 20X13 treatment by electrode materials consisting of 66,9 Ni...32,9 Al and 79,3 Ni...20,1 Al have the greatest continuity and thickness, and also phases NiAl and Ni₃Al are formed in its structure. Data obtained in this paper show that the method of electrospark deposition on the surface of structural steel gives opportunity to get heat-resistant coatings of Ni-Al alloys of different composition with high hardness, that retain its mechanical properties after thermal cycling at elevated temperatures.

Keywords: microstructure, functional coating, electrospark deposition, heat-resisting alloy, microhardness

References

1. Sims Ch.T., Hagel W.C. *The superalloys*. New York, Wiley-Interscience, 1972. 614 p. (Russ. ed.: Sims Ch., Hagel V. *Zharoprochnyye splavy*. Moscow, Metallurgija, 1976. 568 p.).
2. Sauthoff G. *Intermetallics*. Weinheim; New York; Basel; Cambridge; Tokyo; VCH, 1995. 165 p.
3. Reed R.C. *The Superalloys: Fundamentals and Applications*. Cambridge University Press, 2008. 392 p.
4. Durocher J. Richards N.L. Characterization of the Micro-Welding Process for Repair of Nickel Base Superalloys. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2007, Vol. 16, no. 6, pp. 710-719.
5. Tan X.P., et al. Characterization of topologically close-packed phases in secondary reaction zone in a coated CMSX-4 single crystal Ni-based superalloy. *Journal of Materials Science*. 2013, Vol. 48, Issue 3, pp. 1085-1089.
6. Paul S. Harvey M.D.F. Corrosion Testing of Ni Alloy HVOF Coatings in High Temperature Environments for Biomass Applications. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2013, Vol. 22, Issue 2-3, pp. 316-327.

7. Nutzel R., Affeldt E., Goken M. Damage evolution during thermomechanical fatigue of a coated monocrystalline nickel-base superalloy. *International Journal of Fatigue*. 2008, Vol. 30, pp. 313–317.
8. Jakubowski J., Krajewski A., Woznicza M. Diffusion pressure welding of NiAl and Ni₃Al-based alloys with St3S steel. *Welding International*. 2005, Vol. 19, no.12, pp. 950–955.
9. Pajkin A.G., Krajnikov A.V., Shulov V.A., Bycenko O.A., Jengel'ko V.I., Tkachenko K.I., Chikirjaka A.V. *Fizika i himija obrabotki materialov*, 2008, no. 3, pp. 56-60.
10. Kovtun A.I., Chermashenceva T.V., Mjamins S.V. *Uprochnjajushhie tehnologii i pokrytija*, 2013, no. 4, pp. 24-28.
11. Sheldon G.L. Wang R., Clark R.A. Characteristics of Ni-Ti surface alloys formed by electrospark deposition. *Surface and Coating Technology*. 1988, Vol. 36, pp. 445-454.
12. Yu-jiang Xie, Mao-cai Wang. Microstructural morphology of electrospark deposition layer of a high gamma prime superalloy. *Surface & Coatings Technology*. 2006, Vol. 201, pp. 691–698.
13. Heard D.W., Brochu M. Development of a nanostructure microstructure in the Al–Ni system using the electrospark deposition process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010, Vol. 210, pp. 892–898.
14. Verhoturov A.D. *Formirovanie poverhnostnogo sloja metallov pri jelektriskrovom legirovanii* [Formation of the surface layer of the metal when electric spark alloying]. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 1995. 323 p.
15. Donachie M., Donachie Jr., S. *Superalloys: A Technical Guide*. 2nd ed., ASM International, 2002. 408 p.
16. Maslenkov S.B. *Zharoprochnye stali i splavy. Spravochnoe izdanie* [Heat-resistant steels and alloys. Reference book]. Moscow, Metallurgija, 1983. 192 p.
17. Krymov V.V., Eliseev Yu.S., Zudin K.I. *Proizvodstvo gazoturbinyh dvigatelej* [Production of gas-turbine engines]. Moscow, Mashinostroenie, 2002. 376 p.
18. Kablov E.N. *Materialy dlja aviakosmicheskoi tehniki. Rossijskaja jenciklopedija CALS. Aviacionno-kosmicheskoe mashinostroenie. Gl. red. A.G. Bratuhin* [Materials for aerospace: Russian encyclopedia CALS. Aerospace engineering. Chap. Ed. Bratuhin A.G.]. Moscow, OAO «NIC ASK», 2008, pp. 377-388
19. Golubcova R.B. *Fazovyj analiz nikelovyh splavov* [Phase analysis of nickel alloys]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 234 p.
20. Yu Y., Zhou J., Chen J., Zhou H., Guo C. Preparation, microstructure and tribological properties of Ni₃Al intermetallic compound coating by laser cladding. *Intermetallics*. 2010, Vol.18, Issue 5, pp. 871–876.
21. Kablov E.N., Lomberg B.S., Buntushkin V.P., Golubovskii E.P., Muboyadzhyan S.A. Intermetallic Ni₃Al-Base Alloy: a Promising Material for Turbine Blades. *Metal Science and Heat Treatment*. 2002, Vol. 44, Issue 7-8, pp. 284-287.
22. Movchan B.A., Malashenko I.S. *Zharostojkie pokrytija, osazhdaemye v vakuume* [Heat-resistant coatings, deposited in vacuum]. Kiev, «Naukova dumka» Publ., 1983. 232 p.
23. Sims C.T., Stoloff N.S., Hagel W.C. *Superalloys II: High-temperature Materials for Aerospace and Industrial Power*. Wiley, 1987. 615 p. (Russ. ed.: Simsa Ch.T. *Supersplavy II: Zharoprochnye materialy dlja ajerokosmicheskikh i promyshlennyh jenergostanovok* . Edited by Shalina R.E. Moscow, Metallurgija, 1995. 384 p.).
24. Shljamnev A.P., et al. *Korrozionnostojkie, zharostojkie i vysokoprochnye stali i splavy: Spravochnoe izdanie* [Corrosion-resistant, heat-resistant and high-strength steels and alloys: Reference Edition]. Moscow, «Intermet Inzhiniring» Publ., 2000. 232 p.
25. *GOST 6130-71. Metally. Metody opredelenija zharostojkosti* [State Standart 6130-71. Metals and method of determining their heat resistance]. Moscow, Standartinform Publ., 1971. 16 p.
26. Okamoto H. Al-Ni (Aluminum-Nickel). *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*. 2004, Vol. 25, no.4, p. 394.
27. Himushin F.F. *Zharoprochnye stali i splavy* [Heat-resistant steels and alloys]. Moscow, Metallurgija, 1969. 752 p.
28. Davydov V.M. Khimukhin S.N., Ledkov E.A., Gil A.V. Improvement of coating quality obtained by electro spark alloying with nonabrasive ultrasonic finishing polishing. 3-rd International conference on Manufacturing engineering. Kallithea of Chalkidiki, Grece, 1-3 October, 2008, pp. 199-204.