

УДК 621.793.09

DOI: 10.30987/1999-8775-2020-11-36-43

С.Н. Химухин, К.П. Ерёмина, Г.С. Дзюба

ОБРАБОТКА ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Приведены результаты исследований по установлению закономерностей изменения параметров шероховатости поверхности электроискровых покрытий в зависимости от различного количества (0, 1, 3, 6, 12, 24, 50) выглаживающих проходов с использованием установки безабразивной ультразвуковой финишной обработки (БУФО), в

основе которой реализован метод ультразвукового пластического деформирования.

Ключевые слова: электроискровое легирование, обработка, деформирование, интерметаллидный сплав, шероховатость, поверхность, ионное травление, кристаллиты.

S.N. Khimukhin, K.P. Yeryomina, G.S. Dzyuba

ELECTROSPARK COATING PROCESSING WITH METHOD OF ULTRASONIC PLASTIC DEFORMATION

In the paper there are shown results on roughness parameter decrease on the electrospark coatings of 20H13 and 30 steel surfaces by means of smoothing with the use of the plant for non-abrasive ultrasonic finishing (*NUF*).

For the coating formation there were used Ni, Cu and an intermetallic alloy based on Ni_3Al phase. At the *NUF* increase of coatings formed with the use of Cu there is a roughness growth caused with material "pickup" upon an indenter. It is determined that for smoothing the surfaces with electrospark coating with the assurance of roughness considerable decrease a six-fold *NUF* processing is required. A microstructure of the coating obtained with the use of anode material based on the Ni_3Al alloy consists of columnar crystal

grains the cross-section dimensions of which change from some μm to several tens of nm. Crystal grains are directed mainly normally regarding a cathode surface. By means of micro-X-ray spectrum analysis there is defined an elementary composition of columnar crystal grains corresponding to the alloy of the $Ni_x-Al_y-Fe_z$ system which is alloyed with Cr and contains admixtures of Si and Mn. By means of the microstructure investigation of the coating smoothed surface in a number of areas there are revealed crystal grains with the signs of plastic deformation.

Key words: electrospark alloying, processing, deformation, intermetallic alloy, roughness, surface, ion etching, crystal grains.

Введение

Одним из направлений развития современного материаловедения является разработка методов по получению функциональных покрытий на деталях машин и механизмов с использованием источников концентрированных потоков энергии (КПЭ), к которым относится лазерное излучение, плазма, искра и др. Использование КПЭ способствует формированию покрытий с уникальным комплексом свойств, получение которых традиционными методами затруднительно или невозможно [1]. К таким методам относится метод создания покрытий с использованием электрического разряда между электродами. Указанный метод подразделяется на две разновидности, отличающиеся вели-

чиной используемого в установках напряжения (U) между электродами. Метод с использованием $U > 100$, обычно более 1000 вольт, обозначается как высоковольтный, а при $U < 100$ вольт - низковольтный. Обработка материалов при использовании установок, в которых используется низковольтный процесс, в литературе традиционно обозначают как электроискровое легирование (ЭИЛ). Метод ЭИЛ основан на полярном переносе материала обрабатываемого электрода (анод) на обрабатываемый электрод - деталь (катод) при электроэрозионном процессе [1-4].

В результате многократных электроискровых процессов между электродами происходит образование покрытия. Ос-

новными преимуществами покрытий, получаемых методом ЭИЛ являются: простота технологического процесса их формирования с использованием любых электропроводящих анодных материалов; несущественный нагрев обрабатываемой детали, что позволяет получать покрытия на готовых деталях; высокие адгезионные свойства покрытия к материалу катода. Однако метод ЭИЛ имеет ряд недостатков, таких как повышенная шероховатость и наличие остаточных растягивающих напряжений в покрытии, что увеличивает риск формирования трещин [5]. В качестве методов, позволяющих устранять недостатки покрытий, полученных методом ЭИЛ, наибольшее распространение получил лазерный переплав (ЛП), заключающийся в локальном расплавлении участка покрытия и катода. В результате ЛП происходит перемешивание материала в покрытии, что увеличивает его структурную однородность и снижает риск формирования трещин [6]. После ЛП толщина покрытий, как правило, увеличивается в несколько раз. При этом шероховатость поверхности покрытия несколько снижается, хотя для использования в перспективе для деталей, работающих в парах трения, этого недостаточно.

Методика и материалы

Покрытия получали с использованием серийно произведенной электроискровой установки «Элитрон 22А» на образцах стали 30, 20Х13 и бронзы марки БрАЖ-9-4. Электроискровую обработку проводили в инертной среде (аргон), которую создавали посредством обдува поверхности катода 6 л/мин. В качестве анодных материалов применяли катодный никель марки Н-1У, медь марки М00 и полученный с использованием литейной технологии интерметаллидный сплав, преимущественно состоящий из Ni_3Al фазы [10].

Режимы электроискровой обработки определяли исходя из оптимального сочетания параметров - отсутствие залипания электродов при обработке, максимальное приращение массы (коэффициент массопереноса), отсутствие признаков хрупкого

Еще одним методом обработки электроискровых покрытий является поверхностное пластическое деформирование (ППД), основанное на обкатывании подпружиненного шарика по обрабатываемой поверхности [5, 7, 8]. В результате использования ППД шероховатость поверхности снижается, однако метод не получил распространения по ряду причин, связанных с высокой твердостью и хрупкостью электроискровых покрытий.

В последнее время большее распространение получил метод, являющийся разновидностью ППД – ультразвуковое пластическое деформирование (УЗПД). Метод УЗПД основан на ударном воздействии индентора, изготовленного из алмаза или твердого сплава, на обрабатываемую поверхность [9]. Высокая скорость деформирования обрабатываемого материала методом УЗПД обуславливает реализацию особого механизма деформации, что позволяет проводить обработку хрупких материалов.

Целью настоящей работы является установление закономерностей изменения структуры поверхности электроискровых покрытий, полученных на сталях (20Х13 и 30) различными анодными материалами (Cu , Ni , Ni_3Al) и выглаженных методом УЗПД.

разрушения покрытий и минимальное количество оксидов. Коэффициент массопереноса (K) определялся как отношение изменения массы катода к изменению массы анода в конце электроискровой обработки. Масса электродов измерялась гравиметрическим методом через каждую минуту ЭИЛ, с помощью аналитических весов «AW 220».

Металлографические исследования проводили с использованием оптических микроскопов «МБС 10» и «Planar Micro-200», растрового электронного микроскопа Hitachi «SU-70» с приставками (EDX и WDX). Структуру поверхности исследовали после ионного травления с использованием установки Hitachi «Ion Milling 4000».

Для выглаживания электроискровых покрытий использовали установку БУФО

серийного производства, которая состоит из ультразвукового генератора «ИЛ10-2.0» и обрабатывающего инструмента (излучатель с твердосплавным индентором). Принцип работы установки основан на воздействии колеблющегося с ультразвуковой частотой твердосплавного наконечника на обрабатываемую поверхность. Обрабатывающий инструмент установки БУФО закрепляется в резцедержателе токарного станка. Электроискровые покрытия получали на поверхности образцов, закрепленных в кулачковом патроне то-

Полученные результаты и обсуждение

Работа проводилась в несколько этапов. На начальном этапе работы были проведены эксперименты по установлению оптимальных параметров обработки БУФО, где в качестве объекта исследования использовали образцы стали 30 и 20Х13 после токарной обработки.

В качестве основных параметров были исследованы: n - скорость вращения шпинделя станка (50, 100, 200 об/мин), в кулачковый патрон которого закреплялся обрабатываемый образец; S_b - скорость подачи (линейного перемещения) резцедержателя (0,0625; 0,0375; 0,01 мм/об), в котором закреплялся поочередно резец для токарной обработки и обрабатывающий инструмент БУФО. Исходная (после токарной обработки) шероховатость (Ra) в этих экспериментах составляла 0,83 и 1,23 мкм, а после БУФО минимальная шероховатость составляла 0,19 мкм (при $n = 50$ об/мин) и 0,16 мкм (при $n = 100$ об/мин). Однако, исходя из анализа результатов визуально-оптического метода исследования, установлено, что только при скорости вращения 50 об/мин. на исследуемой поверхности отсутствуют не обработанные микроучастки. Поэтому для дальнейших экспериментов использовали скорость вращения равную 50 об/мин, для которой оптимальная скорость перемещения резцедержателя составила 0,0375 мм/об. Одновременно было установлено, что однократный проход индентора БУФО по обрабатываемой поверхности не позволяет полностью выгладить поверхность и удалить риски, оставшиеся от токарной обра-

ботки. Поэтому были проведены эксперименты с различным количеством проходов индентора по одному месту. С целью уменьшения количества экспериментов, обработку проводили по одной линии.

Исследование параметров шероховатости поверхности производили на профилографе «Surfcom1800D» японской фирмы Accretech. Принцип действия прибора основан на ощупывании неровностей исследуемой поверхности при его автоматическом перемещении. В качестве индентора используется игла, представляющая собой конус с углом 60° и радиусом при вершине $2 \pm 0,5$ мкм [11].

Поэтому были проведены эксперименты с различным количеством проходов индентора по одному месту. С целью уменьшения количества экспериментов, обработку проводили по одной линии.

Визуально-оптический метод позволил установить, что обработка до 6 проходов полностью не удаляет риски, оставшиеся от резца. Наиболее высокое качество поверхности обеспечивается только 12 проходами, большее количество проходов (24 и 50) способствует формированию на поверхности выбоин и чешуйчатости. При этом измеренная на профилометре шероховатость даже после одного прохода снижается до 10 раз. Дальнейшее увеличение проходов снижает Ra еще в 2 раза. При 12 проходах шероховатость продолжает снижаться до 4 раз по сравнению с 1 проходом.

Для экспериментов дополнительно использовали образцы бронзы (БрАЖ-9-4). Обработка бронзы до 3 проходов также не позволяет качественно выгладить поверхность, увеличение количества проходов по линии до 6 заметно снижает количество риска, хотя некоторое их количество остается. После 24 проходов существенно увеличивается количество участков с признаками высокой пластической деформации – нахлестов, что указывает на избыточное количество проходов.

Исходя из анализа полученных результатов, для образцов сталей и бронзы после токарной обработки наиболее оптимальное качество поверхности наблюдается при проходах БУФО от 6 до 12 раз. При

этом учитывая экономическую целесообразность, следует отдавать предпочтение меньшему числу проходов при условии получения заданного качества поверхности.

На следующем этапе проводились эксперименты с обработкой покрытий, сформированных модельными анодными материалами *Cu* и *Ni*, в качестве катодов применяли бронзу.

В экспериментах изучали влияние количества проходов БУФО на структуру и свойства покрытий, включая шероховатость поверхности.

В соответствии с методикой проведения эксперимента, удельное время электроискровой обработки с использованием *Cu* анода составило 246 с/см^2 , при этом коэффициент массопереноса равен 0,31. Полученное покрытие характеризуется сплошностью, средняя толщина покрытия, определенная по результатам измерения в поперечных шлифах – 57 мкм.

Оптимальное удельное время формирования покрытий с *Ni* анодом составляет 389 с/см^2 . Для этого покрытия характерна меньшая толщина (в среднем 44 мкм) и наличие на поверхности небольшого количества поверхностных оксидов в виде пленок. Необходимо отметить несколько меньшую сплошность данного покрытия, в сравнении со сплошностью покрытия, сформированного анодным материалом *Cu*.

На рис. 1 приведена зависимость изменения величины шероховатости (*Ra*) от

числа проходов при выглаживании покрытий, сформированных анодами *Cu* и *Ni*. Шероховатость поверхности образцов бронзы до нанесения покрытий составляет 0,67 мкм. За исходное принято значение шероховатости нанесенного электроискрового покрытия, еще не подвергнутое выглаживанию (0 проходов).

Как следует из полученных результатов, значение *Ra* покрытия, сформированного анодом *Cu* в результате ЭИЛ выше, чем у покрытия с *Ni*. После однократной обработки БУФО параметр шероховатости *Ra* у образца с медным покрытием резко снижается, а затем немонотонно изменяется, превосходя параметр с *Ni* покрытием. Исследованием микроструктуры поверхности покрытий, сформированных *Cu*, установлено, что увеличение параметра *Ra* вызвано «налипанием» материала анода на индентор БУФО вследствие высокой пластичности данного материала. Таким образом определить оптимальное количество проходов для выглаживания *Cu* покрытия является затруднительным. Исходя из минимальной шероховатости покрытия, сформированного с использованием *Ni*, количество проходов должно составлять от 12 до 24, но по результатам исследования микроструктуры на поверхности заметно существенное увеличение микротрещин, нахлестов и оксидов, что указывает на избыточное количество проходов. Поэтому наиболее оптимальное количество проходов можно принять равным 6.

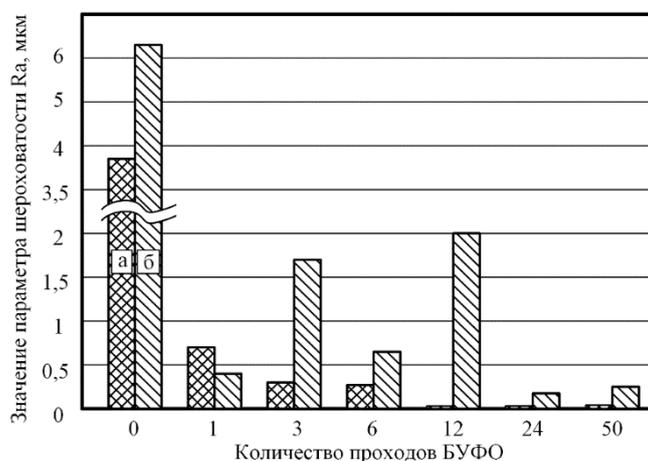


Рис. 1. Изменение параметра *Ra* в зависимости от количества проходов БУФО, а – покрытие анодом *Ni*, б – покрытие анодом *Cu*

Покрытие, сформированное интерметаллидным сплавом, получено при удельном времени обработки 600 с/см². В качестве катода использовали сталь марки 20Х13, коэффициент массопереноса составлял 0,67, усредненная толщина покрытия составляет 54 мкм. Полученное электроискровое покрытие имеет несколько меньшую сплошность, чем у покрытия,

сформированного *Ni*. Металлографическим анализом поверхности покрытия обнаружено небольшое количество микротрещин, оксидных пленок не выявлено.

В табл. 1 приведены параметры шероховатости поверхности покрытий после различного прохода индентора по поверхности электроискрового покрытия, полученного сплавом на основе *Ni₃Al* фазы.

Таблица 1

Параметры шероховатости покрытия после различного количества
выглаживающих проходов

Количество проходов	Параметры шероховатости покрытия, мкм							
	<i>Ra</i>	<i>Rq</i>	<i>Rz</i> JIS 94	<i>Sm</i>	<i>Rk</i>	<i>Rpk</i>	<i>Rvk</i>	<i>Rpk + Rk</i>
Анодный материал <i>Ni₃Al</i>								
0	3,50± 0,70	4,25± 0,87	13,43± 0,32	259,81± 49,92	10,02± 2,47	4,86± 1,58	3,21± 0,15	15,05
3	0,36± 0,03	0,54± 0,12	3,88± 0,30	392,89± 57,10	0,72± 0,19	0,89± 0,25	1,21± 0,11	1,57
6	0,18± 0,07	0,25± 0,14	0,88± 0,38	183,71± 65,3	0,50± 0,18	0,20± 0,07	0,41± 0,31	0,70
12	0,28± 0,09	0,40± 0,14	1,84± 1,07	269,99± 88,17	0,66± 0,32	0,67± 0,49	1,16± 1,04	1,44
24	0,16± 0,08	0,21± 0,10	0,89± 0,51	95,08± 50,55	0,47± 0,22	0,33± 0,26	0,16± 0,09	0,76

Как следует из анализа представленных результатов высотные параметры (*Ra*, *Rq*, *Rz*) после 6 проходов БУФО поверхности с покрытием анодом из сплава *Ni₃Al* ниже, чем у образцов с другим количеством проходов, поэтому оптимальной является шестикратная обработка.

В зарубежной практике для поверхностей тел трения дополнительно рассматривают параметры *Rpk*, *Rk*, *Rvk* (международный стандарт *ISO 13565-2:1996* [12]). Исходя из этого стандарта, более износостойкой является поверхность с минимальной суммой *Rpk + Rk* [13–15]. Перечисленные параметры геометрически связаны с кривой опорной поверхности (опорной кривой, опорной линией или кривой Аббота-Файрстоуна), которая строится по полученным профилограммам по известной методике [16–18].

Микроструктуру поверхности покрытия после выглаживания (6 проходов) и ионного травления изучали с использованием РЭМ, в комплект которого входят

микрорентгеноспектральные приставки. Выглаженная поверхность после ионного травления (рис. 2а) представлена столбчатыми кристаллитами, которые преимущественно нормально ориентированы к поверхности катода (рис. 2б). Размеры кристаллитов изменяются в широком интервале от нескольких мкм до десятков нм, что является следствием высокой скорости охлаждения расплава и соответствует процессу закалки из жидкого состояния. На ряде участков обнаружены кристаллиты с признаками пластической деформации (рис. 2в, г).

Результаты микрорентгеноспектрального анализа свидетельствуют, что кристаллиты состоят из сплава *Ni-Al-Fe*, который легирован *Cr* и может содержать примеси *Si* и *Mn* (табл. 2). Как следует из литературных данных, сплавы системы *Ni-Al-Fe* имеют достаточно высокую пластичность, что подтверждается результатами данных исследований.

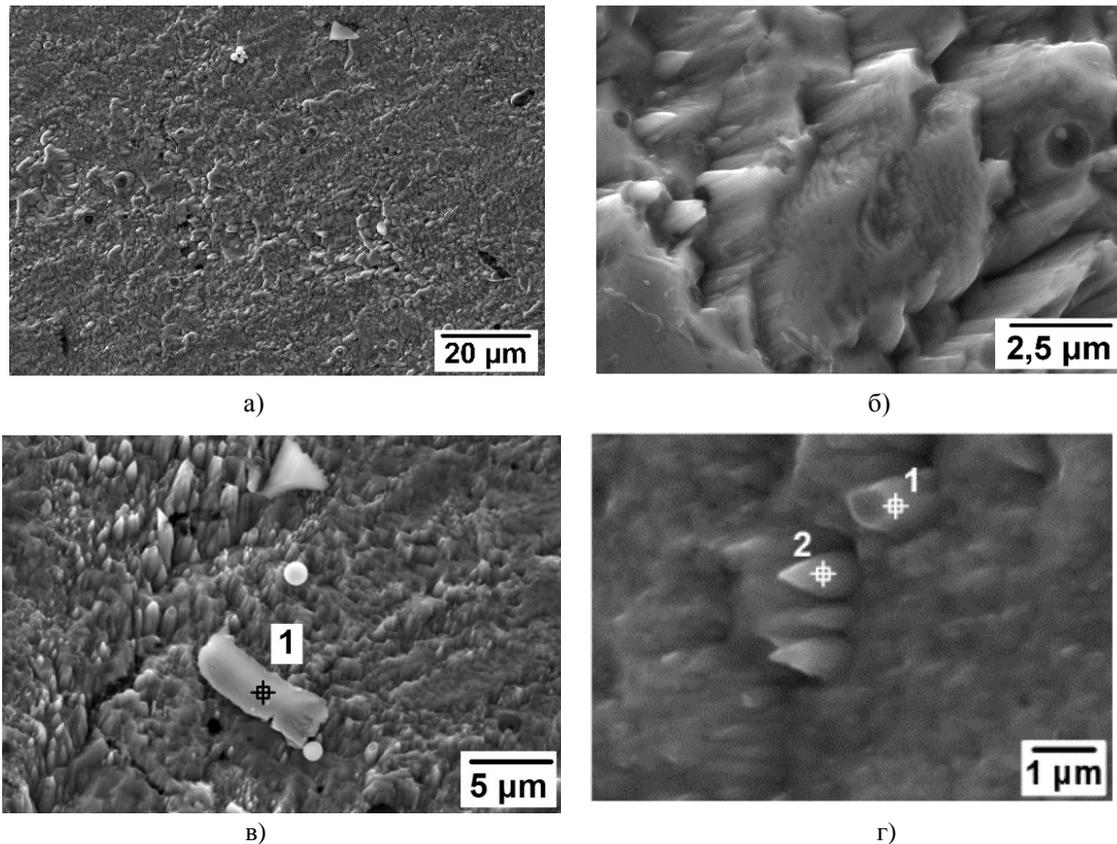


Рис. 2. Микроструктура и состав кристаллитов в покрытии после обработки БУФО и ионного травления

Таблица 2

Микроанализ в точках на выглаженном электроискровом покрытии

Точки микроанализа	Концентрация элементов, ат.%					
	<i>Al</i>	<i>Ni</i>	<i>Fe</i>	<i>Si</i>	<i>Cr</i>	<i>Mn</i>
Рисунок 2, в						
1	18,4	22,73	51,09	1,18	4,63	2,22
Рисунок 2, г						
1	24,25	55,11	13,9	-	3,82	-
2	21,75	59,96	14,56	-	4,13	-

Выводы

1. Для обеспечения оптимальных параметров шероховатости электроискровых покрытий, сформированных с использованием анодного материала на основе фазы Ni_3Al , рекомендовано проведение выглаживания посредством шести проходов БУФО.

2. При получении покрытия методом ЭИЛ с использованием анодного материала на основе сплава Ni_3Al , структура по-

крытия состоит из нормально ориентированных к поверхности катода столбчатых кристаллитов, состав которых соответствует системе $Ni_x-Al_y-Fe_z$.

3. Увеличение количества проходов БУФО покрытий, сформированных с использованием Si , вызывает рост шероховатости, что объясняется высокой пластичностью Si и «налипанием» материала на индентор.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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*. 2010. – P. 892–898.
2. Верхотуров, А.Д. Формирование поверхностного слоя при ЭИЛ / А.Д. Верхотуров. - Владивосток: Дальнаука, 1995. – 323 с.
3. Gould, J. Application of Electro–Spark Deposition as a Joining Technology / J. Gould // *Welding Journal*, 2011. – Vol. 90. – P. 191–197.
4. Leo, P. Study of the Direct Metal Deposition of AA2024 by Electro Spark for Coating and Reparation Scopes / P. Leo, G. Renna, G. Casalino // *Applied Sciences*, 2017. - Vol. 7. - P. 1–16.
5. Tarelynyk, V. Modeling Technological Parameters for Producing Combined Electrospark Deposition Coatings / V. Tarelynyk, I. Konoplianchenko, N. Tarelynyk, A. Kozachenko // *Materials Science Forum*, 2019. – Vol. 968. – P. 131–142.
6. Radek, N. Laser treatment of electro–spark coatings deposited in the carbon steel substrate with using nanostructured WC–Cu electrodes / N. Radek, K. Bartkowiak // *Physics Procedia*, 2012. - Vol. 39. - P. 95–301.
7. Bagliuk, G. Surface hardening of metallic materials by use of combined mat–forming treatment and electrospark doping / G. Bagliuk, V. Makovey, Yu. Borodiy // *International Scientific Journals of Scientific Technical Union of Mechanical Engineering «Industry 4.0» Machines. Technologies. Materials*, 2019. - Vol.13. - Is. 1. - P. 15–18.
8. Mikhailyuk, A.I. Features of plastic deformation of electrospark coatings and ways for improvement of their strength characteristics at friction / A.I. Mikhailyuk, R.P. Zhitaru // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2008. – Vol. 44. – No. 5. – P. 383–389.
9. Rakhimyanov, Kh. Technological Peculiarities Providing the Surface Quality Parameters at Ultrasonic Surface Hardening / Kh.Rakhimyanov, J. Semyonova, A. Eryomina // *Applied Mechanics and Materials*, 2015. – Vol. 698. – P. 482–486.
10. Khimukhin, S.N. Nickel aluminides coatings on steel C1030 after thermal cycling / S.N. Khimukhin, K.P. Eremina, H. Ri // *Materials Today: Proceedings*, 2019. – No 11. – P. 240–246.
11. Application guide manual for surfcom series surface roughness and waviness parameters. – Tokyo, Japan: Tokyo Seimitsu CO., LTD. – 96 p.
12. ISO 13565–2 – Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface Texture: Profile method; Surfaces having Stratified Functional Properties – Part 2: Height Characterization Using the Linear Material Ratio Curve; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 1996.
13. Schneider, U. An approach to the evaluation of surface profiles by separating them into functionally different parts / U. Schneider, A. Steckroth, N. Rau, G.Hobner // *Surface Topography*, 1988. – Vol.1. – P. 343–355.
14. Pawlus, P. Reverse Problem in Surface Texture Analysis – One–Process Profile Modeling on the Basis of Measured Two–Process Profile after Machining or Wear / P. Pawlus, R. Reizer, M. Wieczorowski // *Materials*, 2019. - Vol.12. - 12 p.
15. Muralikrishnan, B. Functional Filtering and Performance Correlation of Plateau Honed Surface Profiles / B. Muralikrishnan, J. Raja // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2005. - Vol. 127. - P. 193–197.
16. Graham, T. Smith. *Industrial Metrology. Surfaces and Roundness*. U.K. London: Springer / T. Graham, 2002. – 338 p.
17. Rosén, B.G. Wear of cylinder bore microtopography / B.G. Rosén, R.Ohlsson, T.R. Thomas // *Wear*, 1996. – Vol. 198. – Is. 1–2. – P. 271–279.
18. Khimukhin, S.N. The structure of the intermetallic coating after ultrasonic burnishing process / S.N.Khimukhin, K.P.Eremina, H.Ri // *Materials Today: Proceedings*. 2019. – No 19. – P. 2413 – 2416.
1. 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*. 2010. – P. 892–898.
2. Verkhoturov, A.D. *Surface Layer Formation at ESA* / A.D. Verkhoturov. – Vladivostok: Dalnauka, 1995. – pp. 323.
3. Gould, J. Application of Electro–Spark Deposition as a Joining Technology / J. Gould // *Welding Journal*, 2011. - Vol. 90. - P. 191–197.
4. Leo, P. Study of the Direct Metal Deposition of AA2024 by Electro Spark for Coating and Reparation Scopes / P. Leo, G. Renna, G. Casalino // *Applied Sciences*, 2017. - Vol. 7. - P. 1–16.
5. Tarelynyk, V. Modeling Technological Parameters for Producing Combined Electrospark Deposition Coatings / V. Tarelynyk, I. Konoplianchenko, N. Tarelynyk, A. Kozachenko // *Materials Science Forum*, 2019. – Vol. 968. – P. 131–142.
6. Radek, N. Laser treatment of electro–spark coatings deposited in the carbon steel substrate with using nanostructured WC–Cu electrodes / N. Radek, K. Bartkowiak // *Physics Procedia*, 2012. – Vol. 39. – P. 95–301.
7. Bagliuk, G. Surface hardening of metallic materials by use of combined mat–forming treatment and electrospark doping / G. Bagliuk, V. Makovey, Yu. Borodiy // *International Scientific Journals of Scientific Technical Union of Mechanical Engineering «Industry 4.0» Machines. Technologies. Materials*, 2019. - Vol.13. - Is. 1. - P. 15–18.
8. Mikhailyuk, A. I. Features of plastic deformation of electrospark coatings and ways for improvement of their strength characteristics at friction / A. I. Mikhailyuk, R. P. Zhitaru // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2008. – Vol. 44. – No. 5. – P. 383–389.

- Applied Electrochemistry, 2008. – Vol. 44. – No. 5. – P. 383–389.
9. Rakhimyanov, Kh. Technological Peculiarities Providing the Surface Quality Parameters at Ultrasonic Surface Hardening / Kh.Rakhimyanov, J. Semyonova, A. Eryomina // Applied Mechanics and Materials, 2015. – Vol. 698. – P. 482–486.
10. Khimukhin, S.N. Nickel aluminides coatings on steel C1030 after thermal cycling / S.N. Khimukhin, K.P. Eremina, H. Ri // Materials Today: Proceedings, 2019. – No 11. – P. 240–246.
11. Application guide manual for surfcom series surface roughness and waviness parameters. – Tokyo, Japan: Tokyo Seimitsu CO., LTD. – 96 p.
12. ISO 13565–2 – Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface Texture: Profile method; Surfaces having Stratified Functional Properties – Part 2: Height Characterization Using the Linear Material Ratio Curve; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 1996.
13. Schneider, U. An approach to the evaluation of surface profiles by separating them into functionally different parts / U. Schneider, A. Steckroth, N. Rau, G.Hobner // Surface Topography, 1988. – Vol.1. – P. 343–355.
14. Pawlus, P. Reverse Problem in Surface Texture Analysis – One–Process Profile Modeling on the Basis of Measured Two–Process Profile after Machining or Wear / P. Pawlus, R. Reizer, M. Wiczciorowski // Materials, 2019. – Vol.12. – 12 p.
15. Muralikrishnan, B. Functional Filtering and Performance Correlation of Plateau Honed Surface Profiles / B. Muralikrishnan, J. Raja // Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2005. – Vol. 127. – P. 193–197.
16. Graham, T. Smith. Industrial Metrology. Surfaces and Roundness. U.K. London: Springer / T. Graham, 2002. – 338 p.
17. Rosén, B.G. Wear of cylinder bore microtopography / B.G. Rosén, R.Ohlsson, T.R. Thomas // Wear, 1996. – Vol. 198. – Is. 1–2. – P. 271–279.
18. Khimukhin, S.N. The structure of the intermetallic coating after ultrasonic burnishing process / S.N.Khimukhin, K.P.Eremina, H.Ri // Materials Today: Proceedings. 2019. – No 19. – P. 2413 – 2416.

Ссылка цитирования:

Химухин, С.Н. Обработка электроискровых покрытий методом ультразвукового пластического деформирования / С.Н. Химухин, К.П. Ерёмкина, Г.С. Дзюба // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2020. – № 11. – С. 36-43. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-11-36-43.

Статья поступила в редакцию 04.06.20.

Рецензент: д.т.н., профессор Муромского филиала (института) Владимирского государственного университета

Соловьев Д.Л.,

член редсовета журнала «Вестник БГТУ».

Статья принята к публикации 27.10.20.

Сведения об авторах:

Химухин Сергей Николаевич, д.т.н., профессор Тихоокеанского государственного университета, зам. директора по науке Института материаловедения ХНЦ ДВО РАН, e-mail: ximuxin@yandex.ru.

Ерёмкина Ксения Петровна, инженер Института материаловедения ХНЦ ДВО РАН, тел. 89243036581, e-mail: bksenya_p@bk.ru.

Khimukhin Sergey Nikolayevich, Dr. Sc. Tech., Prof., Pacific State University, Deputy Director for Science, Institute of Material Science, HNC DVO RAS, e-mail: ximuxin@yandex.ru.

Yeryomina Ksenia Petrovna, Engineer, Institute of Material Science, HNC DVO RAS, phone: 8 924 303 65 81, e-mail: bksenya_p@bk.ru.

Дзюба Геннадий Саввич, к.т.н., доцент кафедры «Литейное производство и технология металлов» Тихоокеанского государственного университета, тел. 77-88-13.

Dzyuba Gennady Savvich, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. “Foundry and Metal Technology”, Pacific State University, phone: 77-88-13.