

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Администрация Правительства Кузбасса

Научно-образовательный центр мирового уровня «Кузбасс»

Сибирский государственный индустриальный университет

*Посвящается 100-летию
со дня рождения ректора СМИ,
доктора технических наук,
профессора Н.В.Толстогузова*

**МЕТАЛЛУРГИЯ:
ТЕХНОЛОГИИ, ИННОВАЦИИ, КАЧЕСТВО
«Металлургия – 2021»**

Труды

XXII Международной научно-практической конференции

10 – 11 ноября 2021 г.

Часть 2

**Новокузнецк
2021**

УДК 669(06)+658.012.056(06)
М 540

Редакционная коллегия
д.т.н., академик РАН Л.А. Смирнов, д.т.н., доцент А.Б. Юрьев,
д.т.н., профессор Н.А. Козырев, д.т.н., профессор Е.В. Протопопов,
д.т.н., профессор А.Р. Фастыковский, к.т.н. Е.Н. Темлянцева,
д.т.н., доцент В.В. Зимин, д.т.н., профессор А.Г. Никитин,
к.э.н., доцент Ю.С. Климашина

М 540 Металлургия: технологии, инновации, качество : труды XXII Международной научно-практической конференции: в 2-х ч. Ч. 2 / под ред. А.Б. Юрьева, Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2021. – 342 с. : ил.

ISSN 2542-1670

Труды конференции включают доклады по актуальным вопросам теории и технологии процессов сварки, порошковой металлургии, получения композиционных материалов и покрытий, тепло- и массопереноса в металлургических процессах и агрегатах, ресурсо- и энергосбережения, экологии и утилизации отходов, охраны труда, автоматизации и моделирования металлургических процессов, инновационных металлургических технологий в машиностроении, экономико-управленческих проблем металлургических регионов.

ОРГАНИЗАТОРЫ И ПАРТНЕРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

Администрация Правительства Кузбасса
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»
АО «ЕВРАЗ ЗСМК»
АО «Русал-Новокузнецк»
АО «Кузнецкие ферросплавы»
АО «НЗРМК им. Н.Е. Крюкова»
Ляонинский университет науки и технологии, г. Аньшань, КНР
ОАО «Черметинформация»
Издательство Сибирского отделения РАН
Журнал «Известия вузов. Черная металлургия»
Журнал «Вестник СибГИУ»
Журнал «МАТЕС Web of Conferences »
Научно-образовательный центр мирового уровня «Кузбасс»
АО «Кузбасский технопарк»
Западно – Сибирское отделение Российской Академии естественных наук
Совет молодых ученых Кузбасса

ISSN 2542-1670

© Сибирский государственный
индустриальный университет, 2021

СЕКЦИЯ 3: ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОЦЕССОВ СВАРКИ, ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ И ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ

УДК 621.791.92

КОМБИНИРОВАННАЯ НАПЛАВКА ПРОВОЛОКОЙ, СОДЕРЖАЩЕЙ НАНОПОРОШОК ВОЛЬФРАМА

Зернин Е.А.^{1,2}, Козырев Н.А.², Данилов В.И.³, Кузнецов М.А.⁴

¹*Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева*

²*Сибирский государственный индустриальный университет*

³*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН*

⁴*Юргинский технологический институт (филиал) НИ ТПУ,
Новокузнецк, Россия, yuti_sp@bk.ru*

Аннотация. В работе приведена схема наплавки высокопрочных слоёв, рассмотрены основные принципы проектирования и изготовления проволоки с нанопорошком вольфрама для дуговой наплавки, проанализирована микроструктура и свойства высокопрочного наплавленного слоя.

Ключевые слова: нанопорошок вольфрама, порошковая проволока, дуговая наплавка, высокопрочный слой.

COMBINED SURFACING WITH WIRE, CONTAINING TUNGSTEN NANOPOWDER

Zernin E.A.^{1,2}, Kozyrev N.A.², Danilov V.I.³, Kuznetsov M.A.⁴

¹*Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev*

²*Siberian State Industrial University*

³*Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS*

⁴*Yurginsky Institute of Technology (branch) NO TPU, Novokuznetsk, Russia, yuti_sp@bk.ru*

Abstract. The paper presents a scheme for surfacing high-strength layers, discusses the basic principles of designing and manufacturing a wire with tungsten nanopowder for arc surfacing, analyzes the microstructure and properties of a high-strength deposited layer.

Keywords: tungsten nanopowder, powder wire, arc surfacing, high-strength layer. В последние десятилетия наука о материалах сосредоточена на разработке наноматериалов и нанопорошков. Главным преимуществом этих материалов является их применение в различных областях промышленности, так как их структура дает возможность получать улучшенные свойства материалов: твердость, прочность, пластичность и т.д. Тем не менее, производство и применение наноматериалов и нанопорошков является довольно сложным процессом [1].

Свойства сварных соединений, а также наплавленного металла (наплавленных слоев) в основном зависят от геометрических параметров и формы дендритов, формирование которых происходит в результате кристаллизации сварочной ванны [2-4]. Изменить размер зерен возможно за счет модифицирования. Одни из наиболее эффективных способов модифицирования является введение в расплав тугоплавких элементов с мелким размером частиц. Исто-

дя из источников литературы одним из перспективных методом модифицирования является введение в жидкую сварочную ванну с последующей кристаллизацией в наплавленном металле нанодисперсных металлических частиц, введенные в сварочную ванну частицы приводят к существенному повышению конструктивной прочности наплавленного металла и сварного соединения в целом [5-9].

В настоящее время процессы модифицирования наплавленного металла широко применяются в сварочном производстве и в машиностроении в целом, т.к. большая доля металлических изделий являются сварными. Поэтому вопрос о модифицировании сварных соединений, в том числе модификаторами с ультра- и наноразмерными частицами, является актуальным. Модифицирование ультра- и наноразмерными частицами позволит управлять процессом кристаллизации наплавленного металла, получать сварные соединения с заданной структурой и свойствами.

Образование мелкозернистой структуры наплавленного металла позволит повысить механические (временное сопротивление на разрыв, предел текучести) и эксплуатационные (коррозионная стойкость, износостойкость) свойства по сравнению со структурой, имеющей крупное зерно [10, 11].

Основным недостатком модифицирования наплавленного металла при сварке (наплавке) является то, что наноструктурированные порошки попадают в дуговой промежуток, температура которого, превышает температуру плавления данных порошков. Повышенная температура в зоне действия дуги способствует растворению частиц наноструктурированных порошков в жидкой сварочной ванне. В связи с этим большинство исследований посвящено изучению способов введения наноструктурированных порошков в жидкую сварочную ванну или применение порошков, обладающих повышенной термической стабильностью, увеличенными значениями модуля упругости и меньшим коэффициентом термического расширения по сравнению [12, 13].

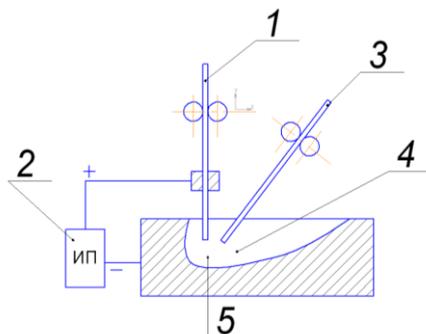
На основе анализа мирового опыта применения нано- и ультрадисперсных порошков в качестве модификаторов при сварке плавлением предлагается систематизация по способам введения указанных порошков в жидкую сварочную ванну. При различных способах сварки есть особенности введения данных порошков в жидкую сварочную ванну. На рисунке 1 представлена схема применения нано- и ультрадисперсных порошков в соединительных технологиях.



Рисунок 1 – Схема применения нано- и ультрадисперсных порошков в соединительных технологиях

В данной работе рассмотрен способ модифицирования наплавленного металла путем введения дополнительной проволоки, содержащей нанопорошки, в хвостовую часть сварочной ванны.

Модифицирование наплавленного металла было реализовано введением наноструктурированных порошков-модификаторов в состав шихты порошковой проволоки. Технология модифицирования была реализована через введение порошковой проволоки в качестве присадочного материала дополнительно к основному сварочной проволоке. Схема наплавки представлена на рисунке 2 [14].

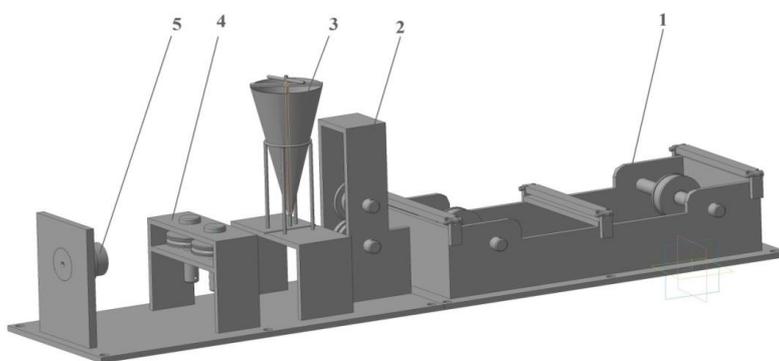


1 – основная сплошная сварочная проволока; 2 – источник питания; 3 – присадочная проволока, содержащая нанопорошок вольфрама; 4 – низкотемпературная зона сварочной ванны (хвостовая часть); 5 – высокотемпературная зона сварочной ванны (головная часть)

Рисунок 2 – Схема наплавки высокопрочных слоев

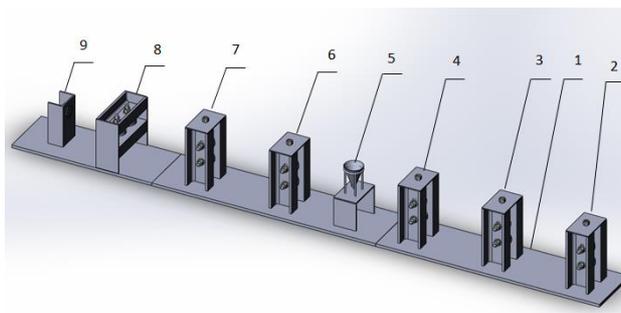
Процесс модифицирования, где порошковая проволока с наноструктурированными модификаторами применяется в качестве дополнительной к основной сварочной проволоке, заключается в следующем. Присадочную проволоку, выполненную по технологии изготовления порошковой проволоки, в состав сердечника которой входят наноструктурированный порошок вольфрама, подают в хвостовую часть сварочной ванны. Присадочная проволока плавится в потоке перегретого жидкого металла сварочной ванны, направленного из-под дуги в хвостовую часть. Наноструктурированный порошок из расплавленной присадочной проволоки попадают в хвостовую часть сварочной ванны, не проходят дуговой промежуток, т.е. практически без потерь переходят в жидкий металл сварочной ванны, перемешиваются в ней и служат дополнительными центрами кристаллизации при образовании зерна микроструктуры наплавленного металла – модифицируют структуру наплавленного металла шва. Они не расплавляются в жидкой сварочной ванне в связи с их высокой температурой плавления.

Технология получения порошковой проволоки, в состав которой входят наноструктурированные порошки-модификаторы, заключается в проектировании, разработке и изготовлении установки для получения порошковой проволоки. Обобщенная схема показана на рисунке 3, компоновочная схема представлена на рисунке 4.



1 – корпус; 2 - профилирующая клетка; 3 – дозатор для добавления нанопорошка неорганического материала; 4 - формирующая клетка; 5 – фильера

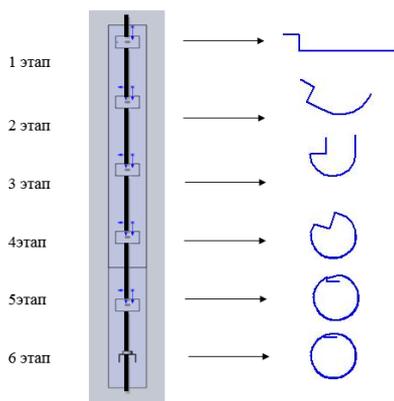
Рисунок 3 – Схема установки для изготовления сварочной проволоки



1 – основание, 2 – профилегибочная клетка №1, 3 – профилегибочная клетка №2,
4 - профилегибочная клетка №3, 5 – дозатор, 6 - профилегибочная клетка №4,
7 – профилегибочная клетка №5, 8 – поджимающая клетка, 9 – фильера

Рисунок 4 – Компонентная схема линии для изготовления порошковой проволоки

Сущность процесса изготовления порошковой проволоки: из подготовленной металлической ленты формируют путем прокатывания через профилегибочную клетку 2,3,4 U-образный желобок, с постепенным увеличением загиба. После чего при помощи дозатора 5 в желобок засыпается наполнитель с необходимым составом в нужном количестве. Далее происходит постепенное смыкание кромок в профилегибочной клетке 6, 7. Поджимающая клетка 8 обеспечивает закрытие замка, которое предотвратит высыпание наполнителя из проволоки. Сформированная заготовка порошковой проволоки подвергается на завершающем этапе волочению через формирующую фильеру 9. Где происходит получение необходимого типоразмера и дополнительное уплотнение наполнителя. Этапы формирования порошковой проволоки показаны на рисунке 5.

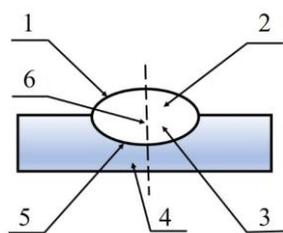


1 этап – прокатка ленты через ролики и получение ступени, которая будет служить в качестве замка для предотвращения высыпания шихты; 2 этап – постепенное придание ленте U-образной формы; 3 этап – получение U-образной формы и засыпание шихты, которая поступает из бункера; 4 этап – на данном этапе края ленты сгибаются до соприкосновения замка с противоположной частью ленты; 5 этап – на предпоследнем этапе формируется трубка заданной формы, с защелкнутым замком; 6 этап – протяжка ленты через фильеру для придания порошковой проволоке заданного диаметра

Рисунок 5 – Этапы формирования порошковой проволоки

Для получения порошков вольфрама использовалась проволока марки «ВА» диаметром 0,31мм, длиной 50мм, напряжение, которое подавали на высоковольтный электрод 31кВ [15, 16]. Порошок был изготовлен методом электрического взрыва проводников (ЭВП). Данный метод позволяет варьировать дисперсность порошка, меняя как физические (диаметр, длину взрываемого отрезка проволоки, давление газа в установке), так и электрофизические параметры (рабочее напряжение, емкость, индуктивность контура, а как следствие – энергию, вводимую в проводник при электрическом взрыве [17, 18].

Исследования наплавленных слоев проводились согласно схеме, представленной на рисунке 6.



1 – наплавленный валик; 2 – область «зеренных» дендритов; 3 – область разноориентированных дендритов; 4 – основной металл; 5 – зона сплавления наплавленного валика и основного металла; 6 – линия измерения микротвердости

Рисунок 6 – Схема исследования наплавленного слоя

Микроструктурный анализ наплавленного слоя осуществлялся по методике, приведённой в работах [16-17]. Исследования проводились методом оптической металлографии на микроскопе Neophot-21 с регистрацией изображений цифровой камерой Genius VileCam. Исследования структуры наплавленных слоёв различных образцов показали, что все они имеют схожее строение, и характеризуются двумя выраженными областями: область «зеренных» дендритов и область разноориентированных дендритов (рисунок 7).

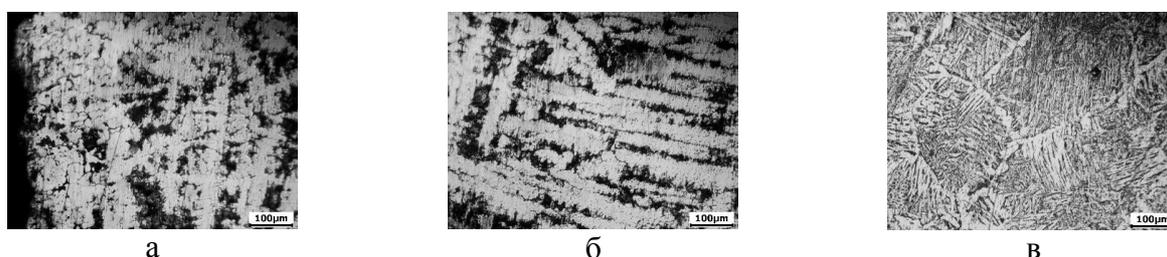


Рисунок 7 – Микроструктура наплавленного и основного металла: а – область «зеренных» дендритов; б – область разноориентированных дендритов; в – основной металл

Однако, несмотря на схожее строение, с увеличением содержания нанопорошка в шихте проволоки размер зерен уменьшается. Результаты экспериментальных данных изменения размера зерна в зависимости от концентрации нанопорошка вольфрама в шихте проволоки представлены на рисунке 8.

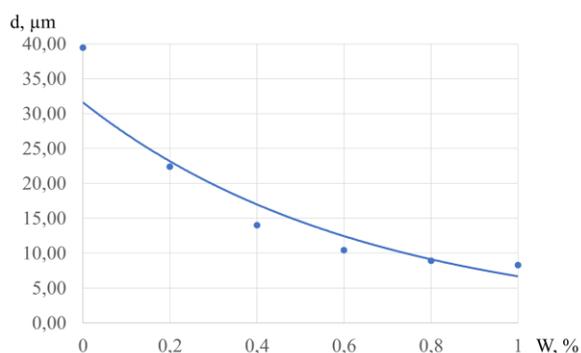


Рисунок 8 – Влияние концентрации нанопорошка вольфрама на размер зерна

Анализ экспериментальных данных позволил описать полученную зависимость эмпирическим уравнением вида

$$d = 31,59 \cdot \exp(-1,55 / W)$$

где d – размер зерна, μm;

W – концентрация нанопорошка вольфрама в проволоке, %.

В данном случае частица нанопорошка вольфрама служат готовыми центрами кристаллизации, т.е. выполняют функцию модификатора наплавленного металла. Регулируя кон-

центрацию вольфрама в составе порошковой проволоки возможно управлять структурой наплавленного металла.

Для оценки влияния нанопорошка на прочностные показатели наплавленных слоев была проведено измерение микротвердости наплавленных валиков по линии б (рис. 6) с шагом 0,5 мм на микротвердомере ПМТ-3М при нагрузке $P=100$ гр. Расстояние от поверхности наплавленного металла изменялось от 0,5 мм до 3 мм (рисунок 9).

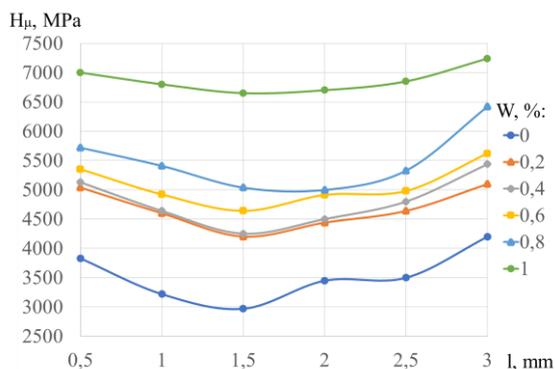


Рисунок 9 – Микротвердость наплавленных слоев в поперечном сечении

Во всех образцах распределение микротвердости имеет идентичный характер. Наибольшую твердость наплавленные валики имеют у поверхности и возле границы сплавления с основным металлом. При этом во втором случае показатели микротвердости несколько выше, что обусловлено разным теплоотводом при кристаллизации наплавленного металла в окружающую атмосферу и в основной металл.

На графике (рисунок 10) подставлена зависимость среднего значения микротвердости наплавленных слоев от процентного содержания вольфрама

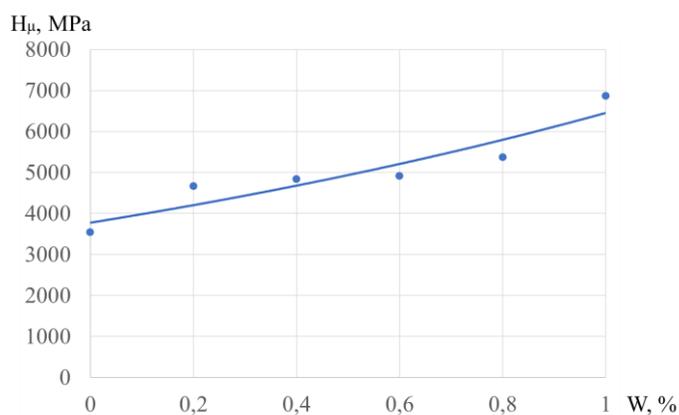


Рисунок 10 – Влияние концентрации нанопорошка вольфрама на микротвердость наплавленного слоя

Анализ данных позволил описать полученную экспериментальную зависимость эмпирическим уравнением вида

$$H_{\mu} = 3776,8 \cdot \exp(0,54 \cdot W),$$

где H_{μ} - микротвердость наплавленных слоев, МПа.

Применение нанопорошка вольфрама в составе дополнительной присадочной проволоки позволяет значительно повысить твердость, а следовательно, и прочностные свойства наплавленных слоёв.

Выводы.

Рассмотренный способ изготовления проволоки позволяет получать наплавочный материал с нанопорошком вольфрама. Такая порошковая проволока применяется в качестве дополнительной присадки, обеспечивающей управление структурой и свойствами напла-

ленных высокопрочных слоёв. Анализ показал, что заданный диапазон концентрации вольфрама в порошковой проволоке позволяет уменьшить размер зерна наплавленного металла в 2,7 раза. При этом твердость наплавки возрастает в 1,94 раза. Максимальные значения микротвёрдости у поверхности наплавленного металла и возле зоны сплавления, что связано с формированием структуры при остывании наплавки (разные условия теплоотвода).

Библиографический список

1. T.K. Lee, H.J. Kim, B.Y. Kang, S.K. Hwang, Effect of Inclusion Size on the Nucleation of Acicular Ferrite in Welds, *ISIJ Int.* 40(12) (2000) 1260-1268.
2. Ogundimu EO, Akinlabi ET, Erinsho MF. Study on microstructure and mechanical properties of 304 stainless steel joints by tig-mig hybrid welding. *Surf. Rev. Lett.* 2018; 25(1): 1850042.
3. Kumar SS, Murugan N, Ramachandran KK. Microstructure and mechanical properties of friction stir welded AISI 316L austenitic stainless steel joints. *J. Mater. Process. Technol.* 2018; 254: 79-90.
4. Mohan DG, Gopi S., Rajasekar V. Mechanical and corrosion-resistant properties of hybrid-welded stainless steel. *Mater. Perform.* 2018; 57(1): 53-56.
5. Wang JY., Chang TC, Chang LZ, Lee S. Effect of Al and Mn Content on the Mechanical Properties of Various ECAE Processed Mg-Li-Zn Alloys. *Mater. Trans.* 2006; 47(4): 971-976.
6. Klimpel A, Kik T. Erosion and abrasion wear resistance of GMA wire surfaced nanostructural deposits. *Arch. Mater. Sci. Eng.* 2008; 30(2): 121-124.
7. Saha A, Mondal SC. Multi-objective Optimization of Welding Parameters in MMAW for Nano-structured Hardfacing Material Using GRA Coupled with PCA. *Trans. Indian Inst. Met.* 2017; 70(6): 1491-1502.
8. Cuixin C, Huifen P, Ran L, Yuanyuan L, Pu Z. Research on inclusions in low alloy steel welds with nano alumina addition. *J. Comput. Theor. Nanosci.* 2012; 9(9): 1533-1536.
9. Liang XS, Chen CX, Peng HF. Effect of nano-scale titanium oxide on the microstructure of weld deposits for high strength low alloyed steel. *Mater. Sci. and Technol.* 2009; 17(2): 41-45.
10. Wang Jian-Yih Effect of Al and Mn Content on the Mechanical Properties of Various ECAE Processed Mg-Li-Zn Alloys / Jian-Yih Wang, Tien-Chan Chang, Li-Zen Chang and Shyong Lee // *Materials Transactions.* – 2006. – Vol. 47 – No. 4. – PP. 971-976.
11. Klimpel A. Erosion and abrasion wear resistance of GMA wire surfaced nanostructural deposits / A Klimpel, T Kik // *Archives of Materials Science and Engineering.* – 2008. – Vol. 30 – Issue 2. – PP. 121-124.
12. Zhu Y. Tribological properties of nanostructured and conventional WC-Co coatings deposited by plasma spraying / Y. Zhu, K. Yukimura, C.X. Ding, P.Y. Zhang, // *Thin Solid Films.* – 2001. – Vol. 388 (1-2). – PP. 277-282.
13. Wu P. Influence of WC particle behavior on the wear resistance properties of Ni-WC composite coatings / P. Wu, H.M. Du, X.L. Chen, Z.Q. Li, H.K. Bai, E.Y. Jiang // *Wear.* – 2004. – Vol. 257 (1-2). – PP. 142-147.
14. Способ механизированной сварки плавящимся электродом в среде защитных газов // Патент России № 2613264. 2017. Бюл. № 2 / Кузнецов М.А., Крампит Н.А., Зернин Е.А.
15. Яворовский Н.А., Шиян Л.Н., Савельев Г.Г., Галанов А.И. Модифицирование полимерных мембран нановолокнами оксигидроксида алюминия // *Нанотехника.* 2008. № 3(15). С. 40–45.
16. М.А. Кузнецов, Е.А. Зернин, В.И. Данилов, С.П. Журавков, А.В. Крюков Оптимизация параметров модифицирования наплавленного металла наноструктурированными волокнами оксигидроксида алюминия // *Российские нанотехнологии.* – 2018. – Т. 13. – № 9-10. – с. 70-76.
17. Kwon Y.S., Jung Y.H., Yavorovsky N.A., Illyn A.P., Kim J.S. Ultra-fine powder by wire explosion method // *Scripta Materialia.* 2001. V. 44. № 8–9. P. 2247–2251.
18. Лернер М.И., Сваровская Н.В., Псахье С.Г., Бакина О.В. Технология получения, характеристики и некоторые области применения электровзрывных нанопорошков металлов // *Российские нанотехнологии.* 2009. Т. 4. № 11–12. С. 56–68.