

<http://dx.doi.org/10.15589/jnn20140408>

УДК 621.793.7

Д 79

IMPROVEMENT OF OPERATIONAL PROPERTIES OF SPRAYED COATINGS BY MEANS OF ELECTRIC IMPULSE IMPACT ON TWO-PHASE HIGH-TEMPERATURE FLOW WITH FURTHER HEAT TREATMENT

УЛУЧШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ НАПЫЛЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА ДВУХФАЗНЫЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ПОТОК С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

Oleksandr M. Dubovyi

oleksandr.dubovyi@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-2843-1879

Anton A. Karpechenko

anton.karpechenko@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-7543-4159

Maksym M. Bobrov

laborantmtm@gmail.com

ORCID: 0000-0002-9098-6912

А. Н. Дубовой,

д-р техн. наук, проф.;

А. А. Карпеченко,

канд. техн. наук, доц.;

М. Н. Бобров,

асп.

National University of Shipbuilding, Mykolayiv

Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

Abstract. The article considers the possibility of increase of the operational properties of the electric arc sprayed coatings Sv-08G2S of wire and plasma coatings PG-19M-01 of powder by the electropulse treatment on the biphasic high-temperature flow with the subsequent heat treatment. It is determined that the wear resistance of the electric arc sprayed coatings increases to 1.7 times under the electropulse treatment, the strength of adhesion to the substrate – by 30 %. The wear resistance of the plasma coating increases to 1.5 times, the strength of adhesion to the substrate increases by 18 % compared to the conventional technology of their application. The optimum heat treatment modes of prerecrystallization thermal treatment of coatings under the electropulse treatment which help to increase the hardness of the electric arc sprayed coatings by 50 %, plasma coatings – by 42 %.

Keywords: gas-thermal electric arc sprayed coatings and plasma coatings, electrical pulse, heat treatment, hardness, adhesion strength, wear resistance.

Аннотация. Исследована возможность повышения эксплуатационных свойств электродуговых и плазменных покрытий электроимпульсным воздействием на высокотемпературный двухфазный поток с последующей их передрекристиализационной термической обработкой.

Ключевые слова: газотермические электродуговые и плазменные покрытия, электрический импульс, термическая обработка, твердость, прочность сцепления, износостойкость.

Анотація. Досліджено можливість підвищення експлуатаційних властивостей электродугових і плазмових покриттів електроімпульсним впливом на високотемпературний двофазний потік з подальшою їх передрекристилізаційною термічною обробкою.

Ключові слова: газотермічні электродугові та плазмові покриття, електричний імпульс, термічна обробка, твердість, міцність зчеплення, зносостійкість.

REFERENCES

- [1] Dubovyi O.M., Kulik S.G., Zhdanov O.O., Bobrov M.M., Mirko O.I. Vplyv deformatsii ta lehuiuchykh elementiv na tverdist stali i napylenykh pokryttiv pislia peredrekrytalizatsiinoi termichnoi obrobky [Effect of strain and alloying elements on the hardness of steel and sprayed coatings after prerecrystallization heat treatment]. *Zb. nauk. prats NUK* [Collection of Scientific Publications NUS], 2011, no. 2, pp. 36–44.
- [2] Dubovyi O.M., Ovsianynkov V.M., Karpechenko A.A., Bobrov M.M., Ovsianynkova K.V. Vplyv elektrychnykh impulsiv na strukturu ta tverdist elektroduhovykh pokryttiv [Effect of electric pulses on the structure

- and hardness of electric arc sprayed coatings]. *Zb. nauk. prats NUK* [Collection of Scientific Publications NUS], 2012, no. 5–6, pp. 38–41.
- [3] Borisov Yu.S., Kharlamov Yu.A., Sidorenko S.L. et al. *Gazotermicheskie pokrytiya iz poroshkovykh materialov* [Thermal spray coatings of powder materials]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1987. 544 p.
- [4] Gorelik S.S., Dobatkina S.V., Kaputkina L.M. *Rekristallizatsiya metallov i splavov* [Recrystallization of metals and alloys]. Moscow, MISSIS Publ., 2005. 432 p.
- [5] Gutman B.Ye. *Izmelchenie kapel pri plazmennom napylenii s modulyatsiey toka* [Shredding of droplets during plasma spraying with current modulation]. *Avtomaticheskaya svarka – Automatic welding*, 1988 no. 9, pp. 37–39.
- [6] Dubovyi O.M., Lebedieva N.Yu., Yankovets T.A. *Vplyv peredrekristalizatsiinoi termichnoi obrobky na fizyko-mekhanichni vlastyvoli napylenykh pokryttiv ta deformovanykh metaliv ta splaviv* [Effect of prerecrystallization heat treatment on physical and mechanical properties of sprayed coatings and deformed metals and alloys]. *Zb. nauk. prats NUK* [Collection of Scientific Publications NUS], 2010, no. 3, pp. 7–10.
- [7] Kadyrmetov A. M. *Issledovanie protsessov plazmennogo naneseniya i uprochneniya pokrytiy i puti upravleniya ikh kachestvom* [Study of plasma coating processes and coatings hardening and ways of their qualities management]. *Nauchnyy zhurnal KubGAU* [KubHAU scientific journal], 2012, no. 81, pp. 1–18.
- [8] Korobov Yu.S. *Effektivnost primeneniya aktivirovannoy dugovoy metallizatsii dlya naneseniya zashchitnykh pokrytiy* [Efficiency of activated arc metallization application for protective coatings spraying]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding Engineering*, 2002, no. 2, pp. 47–49.
- [9] Korotkikh V.M. *Upravlyaemye energoeffektivnyye tekhnologii plazmennogo napyleniya zashchitnykh pokrytiy selskokhozyaystvennogo naznacheniya* [Managed energy-efficient technologies of plasma spraying of protective coatings for agricultural purposes]. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Altai State Agrarian University], 2011, no. 8, pp. 83–87.
- [10] Kudinov V.V., Bobrov G.V. *Nanesenie pokrytiy napyleniem. Teoriya, tekhnologiya i oborudovanie* [Coating spraying. Theory, technology and equipment]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1992. 432 p.
- [11] Dubovyi O.M., Karpechenko A.A., Yankovets T.A., Zhdanov O.O. *Sposib nanesennya pokryttiv* [Method of coatings spraying] Patent UA, no. a 2009 88755, 2009.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Защита деталей машин и конструкций от коррозии и износа, повышение долговечности машин и механизмов достигается за счет формирования поверхностного слоя на изделии, контактирующего с внешней средой, с повышенными физико-механическими и эксплуатационными свойствами. В настоящее время для создания защитных покрытий все больше применяют методы газотермического напыления, такие, как газопламенный, электродуговой, плазменный и детонационный, которые позволяют сократить потери металла, уменьшить расход ресурсов на восстановление деталей машин и конструкций, создают возможность повысить качество, надежность и срок эксплуатации оборудования. Это достигается за счет использования более совершенных материалов, усовершенствования оборудования и технологий получения газотермических покрытий, а также их дальнейшей обработкой. Поэтому разработка новых высокоэффективных способов повышения физико-механических и эксплуатационных свойств газотермических покрытий является актуальной задачей в машиностроительной, судостроительной и других отраслях промышленности Украины.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Среди всех методов газотермического напыления следует выделить электродуговой метод, который обладает высокой производительностью, коэффициентом использования материалов, энергетическим КПД, низкой себестоимостью [3, 8], и плазменный метод, так как он является наиболее универсальным и имеет широкие возможности по регулированию структуры покрытия в процессе ее формирования и как следствие свойств покрытий [10].

Известно [5, 7], что повышение физико-механических и эксплуатационных свойств плазменных покрытий можно обеспечить наложением в процессе напыления на постоянный ток плазменной дуги коротких импульсов. Также известны работы авторов [9], посвященные плазменному напылению с использованием дополнительного источника напряженности электрического поля. Согласно проведенным исследованиям сделаны выводы о положительном влиянии данных воздействий на скорость частиц и прочность сцепления покрытий с основой.

В работах [1, 6, 11] показана возможность повышения физико-механических свойств напыленных покрытий предрекристиализационной термической обработкой.

ЦЕЛЬ СТАТЬИ – изучение влияния электроимпульсного воздействия на высокотемпературный двухфазный поток с последующей предрекристаллизационной термической обработкой на эксплуатационные свойства электродуговых и плазменных покрытий.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Объектом исследований выбраны электродуговые покрытия из проволоки марки Св-08Г2С и плазменные покрытия из порошка марки ПГ-19М-01. Покрытия наносили на углеродистую конструкционную качественную сталь 45. Перед напылением покрытий поверхность подложки обезжировали техническим этанолом и подвергали струйно-абразивной обработке на установке марки 026-7 «Ремдеталь». В качестве абразива использовали электрокорунд марки 7Б, шлифзерно номер 125 по ОСТ 5.9957–85. Режим струйно-абразивной обработки: давление сжатого воздуха 0,4...0,6 МПа, дистанция от среза сопла до обрабатываемой поверхности 100...150 мм, угол наклона сопла к обрабатываемой поверхности 60...90°. Электродуговые покрытия наносили при помощи установки КДМ-2, в комплект которой входит электродуговой распылитель ЭМ-14М. Напыление осуществлялось на следующем режиме: напряжение на дуге – 25 В, сила тока – 110 А, давление сжатого воздуха – 0,6 МПа, дистанция напыления – 100 мм. Плазменные покрытия наносили на установке «Киев-7», которая укомплектована плазмотроном ПУН-1 на следующем режиме: напряжение на дуге – 180 В, сила тока – 150 А, дистанция напыления – 180 мм, расход плазмообразующего газа – 6,5 м³/ч, давление транспортирующего газа – 0,01 МПа. В качестве плазмообразующего и транспортирующего газов использовали сжатый воздух. Термообработку полученных покрытий проводили в лабораторной электрической печи СНОЛ-1.6.2.0.08/9-М1. Твердость покрытий определяли на приборе типа Виккерс при нагрузке на индентор 5 кг (ДСТУ ISO 6507-4:2008). Износостойкость покрытий определяли на машине трения СМЦ-2, прочность сцепления покрытий с основой – на разрывной машине УММ-5.

Для электроимпульсного воздействия на высокотемпературный двухфазный поток использовали источник высоковольтных высокочастотных электрических импульсов, который подключали к распылителям по прямой схеме. Напыление осуществлялось на предварительно установленном оптимальном режиме работы источника импульсов [2], который имеет значения: для электродуговых покрытий – частота 6,5 кГц, напряжение 5 кВ; для плазменных покрытий – частота 5 кГц, напряжение 5 кВ. При этих значениях была зафиксирована максимальная твердость электродуговых и плазменных покрытий – 2,70 и 1,57 ГПа соответственно.

Для определения эксплуатационных свойств полученных покрытий проведены испытания на износостойкость и прочность сцепления покрытия с основой.

Износостойкость электродуговых и плазменных покрытий определялась по схеме ролик–колотка при ограниченной подаче смазки (моторное масло марки М10Г2К ГОСТ 8581–75). Окружная скорость вращения ролика составляла 0,8 м/с, давление – 4 МПа. Колотку и ролик изготавливали из стали 45. Электродуговое покрытие наносили на ролик, а плазменное – на колотку на указанных выше оптимальных режимах. Контртело подвергали термическому улучшению, после которого его твердость составила 30...32 HRC.

Анализ результатов определения износостойкости (рис. 1) показал, что плазменное покрытие, нанесенное с использованием высоковольтных высокочастотных электрических импульсов (см. рис. 1 (2)), имеет в 1,5 раза меньший износ, чем покрытие, напыленное по традиционной технологии. Электродуговое покрытие, нанесенное с использованием высоковольтных высокочастотных электрических импульсов, имеет в 1,7 раза меньший износ, чем покрытие, напыленное по традиционной технологии. Увеличение износостойкости связано с увеличением твердости покрытий.

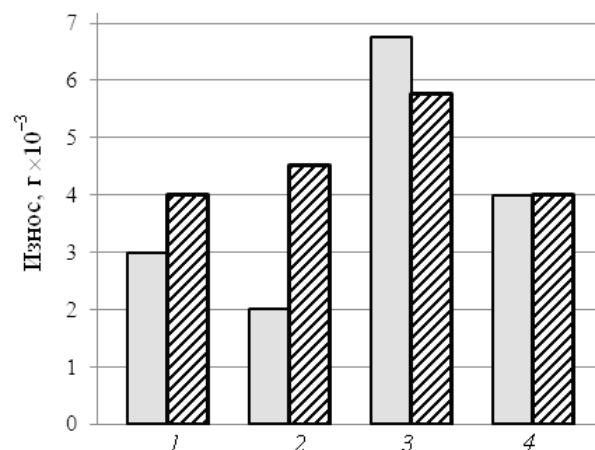


Рис. 1. Результаты определения износостойкости покрытий: □ – покрытие; ▨ – контртело; 1 – плазменных, нанесенных по традиционной технологии; 2 – плазменных, нанесенных с использованием электроимпульсного воздействия на оптимальном режиме; 3 – электродуговых, нанесенных по традиционной технологии; 4 – электродуговых, нанесенных с использованием электроимпульсного воздействия на оптимальном режиме

Прочность сцепления покрытий с основой определяли методом «вытягивания конусного штифта». Согласно полученным результатам, при наложении высоковольтных электрических импульсов наблюдается повышение прочности сцепления электродугового

стального покриття из проволоки Св-08Г2С с основой с 26 до 34 МПа. Для плазменного бронзового покриття из порошка ПГ-19М-01 при использовании электроимпульсного воздействия на оптимальном режиме также наблюдается повышение прочности сцепления с основой с 17 до 21 МПа. Повышение адгезии полученных покрытий можно объяснить увеличением скорости частиц как за счет дробления, так и воздействия ударных волн, что обеспечивает большую фактическую площадь контакта частиц с основой.

Далее исследовали влияние предрекристаллизационной термической обработки на твердость полученных покрытий.

Согласно данным по измерению твердости (рис. 2) электродуговых покрытий установлено, что значение твердости повышается после предрекристаллизационной термической обработки при температуре 450 °С и выдержке 2 мин для покрытия без наложения импульсов от 2,0 до 2,6 ГПа. Для покрытия, нанесенного с применением импульсов, оптимальной является выдержка 1 мин при температуре 400 °С. Значение твердости повышается от 2 до 3 ГПа (прирост твердости на 50 % по сравнению с состоянием после напыления по традиционной технологии).

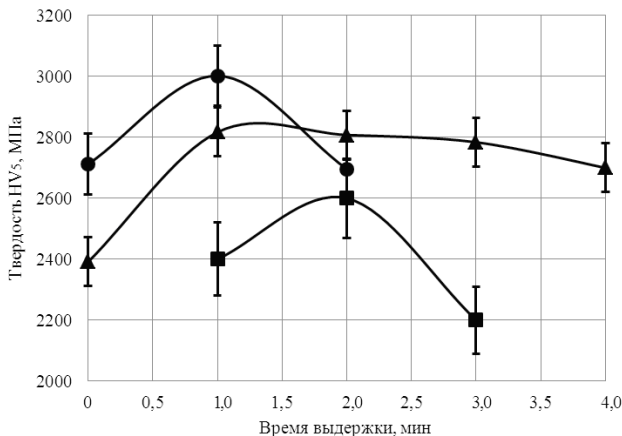


Рис. 2. Твердость электродуговых покрытий, нанесенных из проволоки марки Св-08Г2С: ■ – без электрических импульсов (температура 450 °С); ▲ – с наложением электрических импульсов (450 °С); ● – с наложением электрических импульсов (400 °С)

Аналогичная зависимость наблюдается и с твердостью плазменных покрытий (рис. 3). Оптимальный режим предрекристаллизационной термической обработки для плазменного покрытия из порошка ПГ-19М-01, нанесенного по традиционной технологии, заключается в нагревании до температуры 350 °С и выдержке 2 мин, который обеспечивает повышение твердости на 15 %. Для покрытия, напыленного с применением электроимпульсного воздействия, оптимальный режим термической обработки также смещается в область более низких температур

и заключается в нагревании до 250 °С и выдержке 2 мин. При этом твердость плазменного покрытия увеличивается с 1,2 до 1,7 ГПа (прирост твердости на 42 % по сравнению с состоянием после напыления по традиционной технологии).

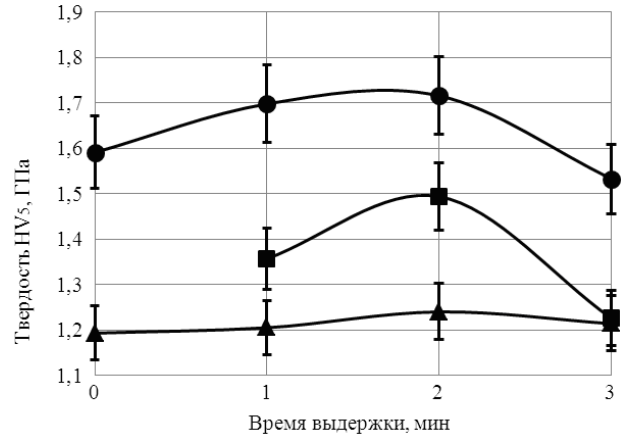


Рис. 3. Твердость плазменных покрытий, нанесенных из порошка марки ПГ-19М-01: ▲ – без импульсов (температура 350 °С); ■ – с наложением электрических импульсов (350 °С); ● – с наложением электрических импульсов (250 °С)

Горячая деформация с высокими скоростями и степенями деформации с последующим быстрым охлаждением материала ниже температуры рекристаллизации сохраняет наклеп, а при плазменном и электродуговом напылении покрытий скорость охлаждения деформированной частицы может достигать 10^8 град/с [10]. Такая высокая скорость охлаждения исключает протекание процессов динамической рекристаллизации в материале покрытия и сохраняет деформированное состояние. Известно [4], что при больших степенях деформации формируются «ячеистая структура» и объемные дислокационные сплетения «стенки ячеек» толщиной в доли микрон. При нагревании трехмерные стенки сплющиваются и превращаются в плоские малоугловые субграницы, а ячейки – в субзерна. После последующей кратковременной выдержки напыленных образцов при температуре начала первичной рекристаллизации и охлаждении их на воздухе происходят процессы предрекристаллизационной полигонизации. Вследствие большой плотности дислокаций в напыленных покрытиях формируется огромное количество зародышей новых субзерен первичной рекристаллизации, а также образуются субструктурные и субмикроскопические (нанокристаллические) элементы структуры [6], что и приводит к повышению физико-механических (в частности твердости) свойств покрытий.

Исходя из полученных результатов определения твердости (см. рис. 2 и 3) следует, что для покрытий, напыленных с применением высоковольтных

высокочастотных электрических импульсов, оптимальный режим предрекристаллизационной термической обработки смещается в сторону меньших температур и выдержек, что связано с более высокой степенью деформации частиц в покрытии.

В перспективе дальнейших исследований лежит изучение тонкой структуры полученных покрытий и механизмов ее образования, определение износостойкости и прочности сцепления с основой термически обработанных покрытий, напыленных с применением высоковольтных высокочастотных электрических импульсов.

ВЫВОДЫ

1. Определено, что износостойкость электродуговых покрытий, напыленных с электроимпульсным воздействием, увеличивается в 1,7 раза, прочность сцепления с основой – на 30 %, износостойкость плазменных покрытий увеличивается в 1,5 раза, прочность сцепления с основой – на 18 % по сравнению с традиционной технологией их нанесения.

2. Установлены оптимальные режимы предрекристаллизационной термической обработки покрытий, нанесенных с электроимпульсным воздействием, которые позволяют повысить твердость электродуговых покрытий на 50 %, плазменных на 42 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Вплив деформації та легуючих елементів на твердість сталей і напилених покриттів після предрекристалізаційної термічної обробки [Текст] / О. М. Дубовий, С. Г. Кулік, О. О. Жданов, М. М. Бобров, О. І. Мирко // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2011. – № 2 (437). – С. 36–44.
- [2] Вплив електричних імпульсів на структуру та твердість электродугових покриттів [Текст] / О. М. Дубовий, В. М. Овсянников, А. А. Карпеченко, М. М. Бобров, К. В. Овсянникова // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2012. – № 5–6 (445). – С. 38–41.
- [3] Газотермические покрытия из порошковых материалов [Текст] : справочник / Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов, С. Л. Сидоренко [и др.]. – К. : Наукова думка, 1987. – 544 с.
- [4] Горелик, С. С. Рекристаллизация металлов и сплавов [Текст] / С. С. Горелик, С. В. Добаткина, Л. М. Капуткина. – М. : МИССИС, 2005. – 432 с.
- [5] Гутман, Б. Е. Измельчение капель при плазменном напылении с модуляцией тока [Текст] / Б. Е. Гутман // Автоматическая сварка. – 1988. – № 9 (420). – С. 37–39.
- [6] Дубовий, О. М. Вплив предрекристалізаційної термічної обробки на фізико-механічні властивості напилених покриттів та деформованих металів та сплавів [Текст] / О. М. Дубовий, Н. Ю. Лебедева, Т. А. Янковець // Металознавство та обробка металів. – 2010. – № 3. – С. 7–10.
- [7] Кадырметов, А. М. Исследование процессов плазменного нанесения и упрочнения покрытий и пути управления их качеством [Текст] / А. М. Кадырметов // Науч. журн. КубГАУ. – 2012. – № 81. – С. 1–18.
- [8] Коробов, Ю. С. Эффективность применения активированной дуговой металлизации для нанесения защитных покрытий [Текст] / Ю. С. Коробов // Сварочное производство. – 2005. – № 2. – С. 47–49.
- [9] Коротких, В. М. Управляемые энергоэффективные технологии плазменного напыления защитных покрытий сельскохозяйственного назначения [Текст] / В. М. Коротких // Вестн. Алтайского гос. аграр. ун-та. – 2011. – № 8 (82). – С. 83–87.
- [10] Кудинов, В. В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование [Текст] / В. В. Кудинов, Г. В. Бобров. – М. : Металлургия, 1992. – 432 с.
- [11] Пат. а 2009 02658 Україна, МПК С23С 4/18. Спосіб нанесення покриттів [Текст] / Дубовий О. М., Карпеченко А. А., Янковець Т. А., Жданов О. О. ; заявник та патентоодержувач Нац. ун-т кораблебудування. – № 88755 ; заявл. 23.03.09 ; опубл. 10.11.09, Бюл. № 21.

© О. М. Дубовий, А. А. Карпеченко, М. М. Бобров

Надійшла до редколегії 13.05.2014

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК

д-р техн. наук, проф. В. Ф. Квасницький