

Б.П. СЕРЕДА, И.В. ПАЛЕХОВА

ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ УПРОЧНЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЛЕГИРОВАННЫМИ ТИТАНОВЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

Рассмотрена газотранспортная СВС-технология формирования легированных титановых покрытий в режиме теплового самовоспламенения на конструкционных материалах и сплавах. Исследованы закономерности и механизмы формирования защитных слоев. Установлена зависимость толщины покрытий от технологических параметров процесса. С использованием методов математического моделирования разработаны оптимальные составы СВС-шхт для нанесения комплексных покрытий. Изучено влияние составов СВС-шхт на свойства полученных покрытий. С целью анализа процесса формирования комплексных легированных покрытий на основе титана в условиях СВС выполнен расчет равновесного состояния продуктов реакций в многокомпонентных порошковых системах. Предложена кинетическая схема химических превращений. Представлены результаты микроскопического и рентгеноструктурного анализов фазового состава полученных покрытий. Рассмотрено влияние поверхностного СВС–упрочнения материалов на эксплуатационные характеристики материалов.

Ключевые слова: химические газотранспортные реакции, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, покрытие, тепловое самовоспламенение, математическое моделирование, коррозионная стойкость, диффузия, плотность, пористость, микротвердость.

Б.П. СЕРЕДА, І.В. ПАЛЕХОВА

ИННОВАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ЗМІЦНЕННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ЛЕГОВАНИМИ ТИТАНОВИМИ ПОКРИТТЯМИ

Розглянуто газотранспортна СВС-технологія формування легованих титанових покриттів в режимі теплового самозаймання на конструкційних матеріалах і сплавах. Досліджено закономірності та механізми формування захисних шарів. Установлено залежність товщини покриттів від технологічних параметрів процесу. З використанням методів математичного моделювання розроблено оптимальні склади СВС-шхт для нанесення комплексних покриттів. Вивчено вплив складів СВС-шхт на властивості отриманих покриттів. З метою аналізу процесу формування комплексних легованих покриттів на основі титану в умовах СВС виконаний розрахунок рівноважного стану продуктів реакцій в багатокомпонентних порошкових системах. Запропоновано кінетичну схему хімічних перетворення. Представлені результати мікроскопічного та рентгеноструктурного аналізів фазового складу отриманих покриттів. Розглянуто вплив поверхневого СВС зміцнення матеріалів на експлуатаційні характеристики матеріалів.

Ключові слова: хімічні газотранспортні реакції, саморозповсюджувальний високотемпературний синтез, покриття, теплове самозаймання, математичне моделювання, корозійна стійкість, дифузія, щільність, пористість, микротвердість.

B.P. SEREDA, I.V. PALEKHOVA

INNOVATIVE TECHNOLOGY OF STRENGTHENING OF CONSTRUCTION MATERIALS WITH ALLOYED TITANIUM COATINGS

The gas transport SHS–technology for the formation of doped titanium coatings in the thermal self-ignition mode on structural materials and alloys is considered. The laws and mechanisms of the formation of protective layers are investigated. The dependence of the coating thickness on the technological parameters of the process is established. Using the methods of mathematical modeling, the optimal compositions of SHS-mixtures for the application of complex coatings have been developed. The influence of the composition of SHS-mixture on the properties of the coatings obtained was studied. In order to analyze the process of forming complex doped coatings based on titanium under SHS conditions, the equilibrium state of the reaction products in multicomponent powder systems was calculated. A kinetic scheme of chemical transformations is proposed. The results of microscopic and X-ray analysis of the phase composition of the obtained coatings are presented. The influence of the surface SHS hardening of materials on the performance characteristics of materials is considered.

Keywords: chemical gas-transport reactions, self-propagating high-temperature synthesis, coating, thermal self-ignition, mathematical modeling, corrosion resistance, diffusion, density, porosity, microhardness.

Введение. С повышением требований к надежности оборудования и сроку его эксплуатации большую актуальность приобретают детали из жаростойких, коррозионностойких и износостойких конструкционных материалов. В машиностроении значительную часть себестоимости продукции формируют затраты на ремонт оборудования, узлов и агрегатов ответственного назначения. Решение этих задач тесно связано с упрочнением поверхности изделий.

Для повышения надежности техники, снижения себестоимости ее обслуживания, увеличения ресурса эксплуатации широкое применение получили покрытия на основе титана. Поскольку в сложных условиях эксплуатации однокомпонентные титановые покрытия не способны обеспечить необходимые рабочие свойства изделий, то целесообразно насыщение поверхности металлов несколькими элементами. Совместное насыщение сталей Ti, Cr и Si

позволяет повышать твердость поверхностного слоя, жаростойкость и коррозионную стойкость изделий, а также увеличить толщину наносимых покрытий и ускорить процесс их формирования [1-6].

В данной работе рассмотрена технология химико-термической обработки сталей в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), совмещенная с химическими газотранспортными реакциями [7-11]. СВС представляет собой высокоинтенсивное экзотермическое взаимодействие химических элементов в конденсированной фазе, способное к самопроизвольному распространению в виде волны горения.

Такой синтез материалов значительно отличается от стандартных методов порошковой металлургии, основанных на спекании химически инертных соединений и обладает рядом преимуществ: формирование активных химических и термических

зон, что позволяет интенсифицировать превращения реагентов и приводит к образованию нужных продуктов; использование менее дорогой химической энергии (тепловыделение при экзотермических реакциях) вместо электрической для достижения высоких температур, требуемых при получении продуктов; использование относительно простого оборудования (вместо печей и других нагревательных устройств); использование в процессе быстрого послойного нагрева больших объемов реагентов вместо медленного прогрева через стенки от внешних источников теплоты.

Процессы обработки могут осуществляться в режиме горения или теплового самовоспламенения и характеризуются интенсивным нанесением покрытий благодаря наличию градиента температур в системе изделие – порошковая среда.

Целью данной работы являлась разработка составов порошковых СВС– смесей для нанесения многокомпонентных покрытий на основе титана в режиме теплового самовоспламенения, исследование физико-химических процессов формирования покрытий, определение оптимальных технологических параметров СВС-процесса при комплексном насыщении, изучение их влияния на кинетику роста слоев и оценка их качества.

Материалы исследований. Химико-термическая обработка углеродистых сталей проводилась в реакторе открытого типа в рабочем интервале температур 950-1200° С при продолжительности изотермической выдержки 30-60 мин. В качестве насыщающих сред применяли смеси порошков оксидов хрома и алюминия, титана, кремния, алюминия и металлического йода (газотранспортного агента) дисперсностью 200-350 мкм.

Подготовка поверхности образцов включала последовательные стадии шлифовки, полировки и обезжиривания в ацетоне. Инициирование процесса насыщения осуществляли путем предварительного нагрева в печи сопротивления до температуры начала самовоспламенения (скорость нагрева – 0,5°С/с). Температуры СВС-смеси контролировали хромель-алюмелевой термопарой в защитном чехле, введенной непосредственно в объем шихты, и подключенной к потенциометру серии КСП.

Толщину упрочненных слоев исследовали на световом микроскопе "Neophot-21" при увеличении $\times 150$, $\times 250$. Микроструктуру выявляли методом травления в 3% спиртовом растворе пикриновой кислоты (ТУ 6-09-08-317-80). Для выявления границ зерен феррита использовали 4% спиртовый раствор азотной кислоты [12].

Исследование элементного состава проводили методом микрорентгеноспектрального анализа с применением микроанализатора JEOL "Superprob-733". Локальность анализа 1 мкм², глубина анализа ~ 1 мкм. Микротвердость покрытий определяли на приборе ПМТ-3. Коррозионную стойкость образцов с покрытиями оценивали в 10-% растворе H₂SO₄ при температуре 20°С. Для расчета равновесного состава

продуктов системы был использованы прикладные пакеты программ "АСТРА.4", TERRA и Recalc [13].

При разработке составов порошковых реакционных СВС-смесей, обеспечивающих высокую коррозионную стойкость, использовали методы математического планирования эксперимента с реализацией полного факторного анализа по плану 2³ и дробного факторного эксперимента 2⁴⁻¹.

Выбор оптимального состава смеси для проведения СВС – процессов в условиях теплового самовоспламенения проводили на основании результатов исследований тепловой картины СВС процесса и физико-механических свойств защитных покрытий (в качестве функций отклика была выбрана коррозионная стойкость покрытий).

Параметры оптимизации:

Y_1 – показатели коррозионной стойкости, $\tau_{\text{исп.}}$ – 75ч, для системы Ti-Cr-Si;

В качестве независимых переменных были выбраны: содержание в СВС-смеси хромистой составляющей, титана, кремния. В качестве исходного материала была выбрана сталь 45. Активатором процесса является J₂ в количестве 1-5% масс. для всех систем.

Для получения стопроцентного состава порошковых СВС-смесей в качестве конечного продукта использовался Al₂O₃.

Результатом эксперимента должна стать математическая зависимость между исследуемыми характеристиками в виде функциональной связи $y=f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_m)$.

В результате регрессивного анализа, были получены ряд уравнений, показывающие зависимость коррозионной стойкости защитных покрытий от режима теплового самовоспламенения и содержания легирующих элементов.

Результаты расчетов были сопоставлены с экспериментальными исследованиями.

Результаты исследований и их обсуждение. Анализ реакций, происходящих при тепловом самовоспламенении СВС-шихт, результатов металлографических исследований фазового состава слоев позволил определить схему образования покрытий. Процесс условно можно разделить на несколько стадий [14]:

1. инертный прогрев реакционной смеси до температуры воспламенения;
2. тепловое самовоспламенение;
3. прогрев изделий;
4. изотермическая выдержка;
5. охлаждение.

Получение покрытий в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза происходит при нестационарных условиях, когда ни тепловое, ни химическое равновесие до полного завершения процесса и остывания продуктов является невозможным. Скорости протекания химических процессов определяются кинетическими закономерностями, зависящими от температуры и диффузионных факторов. Если предположить, что на стадии прогрева торможение

диффузионных процессов в газовой фазе невелико, а скорость изменения температуры мала по сравнению со скоростью протекания газофазных химических реакций, то можно считать, что каждому температурному значению соответствует равновесный состав продуктов. Рассчитывая равновесный состав продуктов реакций для ряда конкретных температур из диапазона ее изменения, можно проследить за развитием процесса СВС и предположить механизм образования покрытий.

Термодинамическая модель процесса сводится к следующему: исходная смесь состоит из M веществ, содержащих l химических элементов. При фиксированных значениях объема и температуры из этих элементов в результате химических реакций могут образоваться m_k веществ, присутствующих в $k = 0, 1 \dots q$ различных фазах. Набор веществ включает l атомарных и $(m-l)$ молекулярных компонентов, реакции которых представлены в форме уравнений диссоциации. Математическая формулировка задачи сводится к минимизации термодинамического потенциала.

Исследования показывают, что в диапазоне температур 300-1800 К основными соединениями в газовой фазе являются йодиды TiI_4 , Al_2I_6 , AlI_3 , AlI_2 , AlI , SiI_4 , SiI_3 , SiI_2 , SiI , CrI_2 , CrI , CrI_3 (преобладают йодиды Ti и Al), а также йод в атомарном и молекулярном виде.

Стадия инертного прогрева реакционной смеси до температуры воспламенения сопровождается испарением и распадом газотранспортных носителей до атомарного состояния по реакции



В интервале температур 300-1800 К концентрация газообразных I_2 и I непрерывно возрастает.

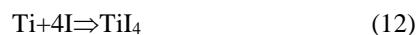
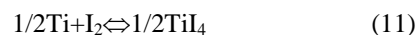
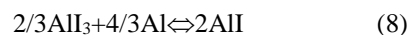
На стадии теплового самовоспламенения протекает экзотермическая реакция восстановления оксида хрома



Температура в реакторе резко повышается до максимальной температуры процесса t_m . Происходит образование газообразных соединений и перенос основных насыщающих элементов к подложке по реакции $M + m/n G_n \Leftrightarrow MG_m$, где M – наносимый элемент, G_n – галоген, MG_m – летучий галогенид.

При этом необходимо, чтобы транспортируемый элемент и подложка находились в разных температурных зонах. На стадии теплового самовоспламенения происходит образованием газообразных йодидов Ti , Al , Si и их химический транспорт к поверхности изделий.

Термодинамический анализ равновесного состава продуктов системы свидетельствует, что в исследуемом диапазоне температур насыщающие элементы реакционной смеси взаимодействуют с йодом как в атомарном, так и в молекулярном состоянии, однако более вероятны реакции взаимодействия элементов с атомарным йодом:



Результаты количественного анализа газообразных продуктов взаимодействия элементов с йодом при максимальной температуре процесса зафиксировали наличие 37,78% Al_2I_6 ; 23,06% TiI_4 ; 5,56% AlI_2 ; 33,06% AlI_3 и 0,54% не прореагировавшего остатка.

В области температур 900-1500 К возрастает доля конденсированного алюминия, достигая максимума при 1422 К при одновременном резком снижении концентрации конденсированного Al_2O_3 . Это дает основание предполагать, что происходит реакция термического разложения.

На стадии прогрева изделий происходит выравнивание температуры по объему реактора и формирование диффузионно-активных атомов элементов. При внесении в порошковую систему стальных изделий на их поверхности возможно протекание гетерогенных реакций обмена с железом подложки.

На стадии изотермической выдержки происходит диффузионный рост покрытия, температура в реакторе не изменяется.

На стадии охлаждения формирование слоев происходит менее интенсивно, что связано с уменьшением коэффициентов диффузии насыщающих элементов. При этом большое влияние на качество покрытия имеет скорость охлаждения.

Эффективность обработки определяется временными параметрами процесса обработки и теплофизическими характеристиками шихты.

Экспериментально установлено, что при повышении температуры насыщения и увеличении длительности изотермической выдержки происходит рост толщины диффузионного слоя (рис. 1, 2).

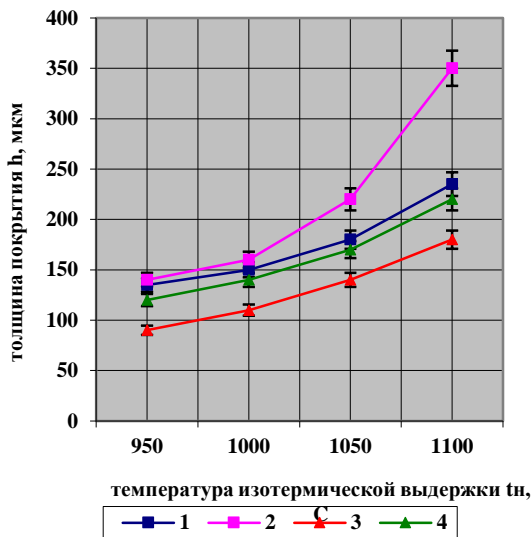


Рис. 1 – Влияние температуры изотермической выдержки на толщину титано-хромосилицированных слоев, полученных на технически чистом железе (2), стали 20 (1), стали 45 (4), У8 (3) в режиме теплового самовоспламенения. Продолжительность изотермической выдержки $\tau_{\text{в}}=60$ мин

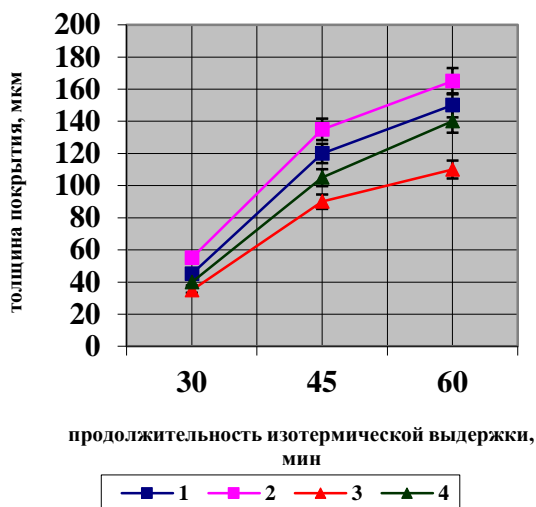


Рис. 2 – Влияние продолжительности изотермической выдержки на толщину титано-хромосилицированных слоев, полученных на технически чистом железе (2), стали 20 (1), стали 45 (4), У8 (3) в режиме теплового самовоспламенения при температуре насыщения $t_{\text{н}}=1000$ °C

Покрyтия, получаеmые в СВС-процессах состоят из продуктов взаимодействия СВС-шихты в поверхностном слое и широкой градиентной диффузионной зоны, вследствие чего обладают улучшенными характеристиками по сравнению с диффузионными аналогами, а также характеризуются высокой адгезионной прочностью. Установлено, что на поверхности сталей формируется зона сложного

силицида $(\text{Ti}, \text{Fe})_5\text{Si}_3$, ниже расположены зоны алюминидов Fe_2Al_5 , FeAl , Fe_3Al , легированных Ti, Cr и Si, под ней расположена зона α -твердого раствора титана, кремния, хрома, алюминия в железе с включением избыточной фазы Ti_5Si_3 (рис.3).

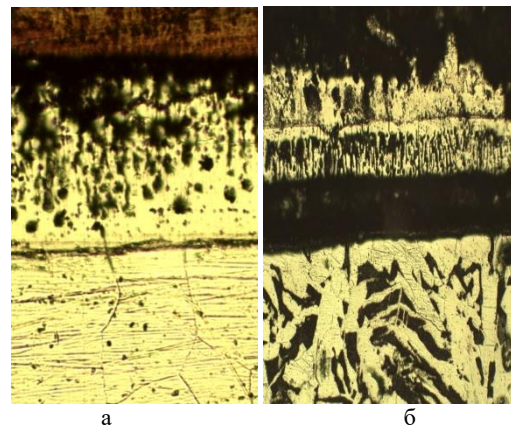


Рис. 3 – Микроструктуры многокомпонентных титано-хромосилицированных покрытий, полученных в режиме теплового самовоспламенения СВС – систем: а – на технически чистом железе; б – на стали 45, $\times 250$

При диффузии некарбидообразующих элементов в γ -железе после достижения предела растворимости происходит $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращение. В α -железе растворимость углерода незначительна, поэтому он оттесняется вглубь подложки с формированием зоны с повышенным содержанием углерода под покрытием. При повышении содержания в шихте алюминия и кремния толщина покрытия растет, однако для достижения высоких концентраций всех насыщающих элементов в покрытии, содержание Si и Al в шихте рекомендовано ограничить до 10% мас. Плотность, пористость и шероховатость покрытий зависит от содержания Si в смеси, при содержании Si $\sim 10\%$ масс. поры имеют преимущественно округлую замкнутую форму. При увеличении концентрации кремния в шихту шероховатость покрытий увеличивается, высота микронеровностей достигает 15-20 мкм. Плотность сформированных покрытий составляет 2,8-3,1 г/см³. При увеличении концентрации кремния в смеси от 5 до 10% (масс.) общая пористость покрытия растет, при этом изменяется и конфигурация пор. Фазовый состав покрытий: Ti-Cr: $(\text{Cr}, \text{Fe})_{23}\text{C}_6$, $(\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_3$, $(\text{Ti}, \text{Cr})\text{C}$, Cr_3C_2 , Cr_2Ti , Fe_2Ti , Ti-Si: $(\text{Ti}, \text{Fe})_5\text{Si}_3$, Ti_5Si_3 , Fe_2Ti , TiSi_2 , TiSi , $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{Si}$, Ti-Al: Fe_2Al_5 , FeAl , Fe_3Al , Ti_3Al , TiAl_3 , Fe_2Ti , TiAl, Ti-B: Fe_3C , Fe_3B , FeB , Fe_2B , $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{Al})\text{B}$, $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{Al})_2\text{B}$, $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{Al})\text{Ti}_2$, TiB_2 , TiC , Cr_2B .

Разработанные составы СВС-смесей были опробованы для упрочнения валков прокатных станов. При исследовании защитных слоев на приборе ПМТ-3 установлено, что микротвердость α -твердого раствора составляет 350–200 HV, микротвердость сложного силицида на поверхности сталей составляет 1100–1000 HV.

Выводы. Проведенные испытания СВС-покрытий на коррозионную стойкость показали

повышение этого показателя в 1,7–1,9 раз по сравнению с диффузионными покрытиями, полученными в изотермических условиях.

Список литературы

1. Химико-термическая обработка металлов и сплавов: Справочник / под ред. Ляховича Л. С. – М.: Металлургия, 1981. – 424 с.
2. Ворошин Л. Г. Антикоррозионные диффузионные покрытия – Минск: Наука и техника, 1981 – 296 с.
3. Лахтин Ю. М., Арзамасов Б. Н. Химико-термическая обработка металлов. Учебное пособие для вузов. – М.: Металлургия, 1985. – 256 с.
4. Середя Б. П. Поверхневе зміцнення матеріалів: Монографія / Середя Б. П., Калініна Н. С., Кругляк І. В. – Запоріжжя: РВВ ЗДІА, – 2004. – 230 с.
5. Середя Б. П. Металознавство та термічна обробка чорних та кольорових металів. Підручник. – Запоріжжя: Вид-во ЗДІА, 2008. – 302 с.
6. Филоненко Б. А. Комплексные диффузионные покрытия. М.: Машиностроение. 1981 – 137 с.
7. Мерджанов А. Г. Процессы горения и синтез материалов. – Черноголовка: ИСМАН, 1998. – 512 с.
8. Коган Я. Д., Середя Б. П., Штессель Э. А. Высокоинтенсивный способ получения покрытий в условиях СВЧ / Металловедение и термическая обработка металлов, 1991, №6. – с. 39–40
9. Бейгул О. О. Отримання зносостійких покриттів на автомобільних деталях при нестационарних температурних умовах / Бейгул О. О., Адамчук С. І., Середя Д. Б., Шульга А. С. // Збірник наукових праць ДДТУ, Кам'янське. – 2017. – Випуск 1(30). – С. 77–80.
10. Sereda B., Sereda D. Obtaining of Boride Coatings under SHS Conditions for Car Parts. Material science and technology– 2016. Salt Lake City, Utah USA 2016-1339p.-P.945-948.
11. Sereda B., Sereda D. Development of Protective Coatings Formulations Based on Boron for Units Operating at High Temperatures in Metallurgy. Material science and technology 2016. Conference and Exhibition. Salt Lake City, Utah USA 2012-1550p.-P.931–934
12. Беккерт М., Клемм Х. Справочник по металлографическому травлению. – М.: Металлургия, 1979. – 336 с.
13. Синярев Г. Б., Ватолин Н. А., Трусов Б. Г., Моисеев Р. К. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов. – М.: Наука, 1982. – 263с.
14. Середя Б. П., Палехова И. В., Белокопю Ю. А., Середя Д. Б. Получение интерметаллидных соединений и покрытий при нестационарных температурных условиях. Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении: Научный журнал № 2, 2014. ЗНТУ, Запоріжжя, С.67-71

References (transliterated)

1. Himiko-termicheskaja obrabotka metallov i splavov: Spravochnik / pod red. Ljahovicha L. S.– Moscow: Metallurgija, 1981. – 424 p. (in Russian).
2. Voroshnin L. G. Antikorrozionnye diffuzionnye pokrytija – Minsk: Nauka i tehnika, 1981 – 296 p. (in Russian).
3. Lahtin Ju. M., Arzamasov B. N. Himiko-termicheskaja obrabotka metallov. Uchebnoe posobie dlja vuzov. – Moscow: Metallurgija, 1985. – 256 p. (in Russian).
4. Sereda B. P. Poverhneve zmicnennja materialiv: Monografija / Sereda B. P., Kalinina N. S., Krugljak I. V. – Zaporizhzhja: RVV ZDIA, – 2004. – 230 p. (in Russian).
5. Sereda B. P. Metaloznavstvo ta termichna obrobka chornih ta kol'orovih metaliv. Pidruchnik. – Zaporizhzhja: Vid-vo ZDIA, 2008. – 302 p. (in Russian).
6. Filonenko B. A. Kompleksnye diffuzionnye pokrytija. Moscow: Mashinostroenie. 1981 – 137 p. (in Russian).
7. Merzhanov A. G. Processy gorenija i sintez materialov. – Chernogolovka: ISMAN, 1998. – 512 p. (in Russian).
8. Kogan Ja. D., Sereda B. P., Shtessel' Je. A. Vysokointensivnyj sposob poluchenija pokrytij v uslovijah SVS / Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov, 1991, No 6. – pp.39–40 (in Russian).
9. Bejgul O. O. Otrimannja znosostijkih pokrittiv na avtomobil'nih detaljah pri nestacionarnih temperaturnih umovah / Bejgul O. O., Adamchuk S. I., Sereda D. B., Shul'ga A. S. // Zbirk naukovih prac' DDTU, Kam'jans'ke. – 2017. – No 1(30). – pp. 77–80 (in Russian).
10. Sereda B., Sereda D. Obtaining of Boride Coatings under ShS Conditions for Car Parts. Material science and technology– 2016. Salt Lake City, Utah USA 2016-1339p.-PP.945-948 (references)
11. Sereda B., Sereda D. Development of Protective Coatings Formulations Based on Boron for Units Operating at High Temperatures in Metallurgy. Material science and technology 2016. Conference and Exhibition. Salt Lake City, Utah USA 2012-1550 p.-PP. 931–934 (references)
12. [Bekker M., Klemm H. Spravochnik po metallograficheskomu travleniju. – Moscow: Metallurgija, 1979.– 336 p. (in Russian).
13. Sinjarev G. B., Vatoлин N. A., Trusov B. G., Moiseev R. K. Primenenie JeVM dlja termodinamicheskikh raschetov metallurgicheskikh processov. – Moscow: Nauka, 1982. – 263p. (in Russian).
14. Sereda B. P., Palehova I. V., Belokon' Ju. A. , Sereda D. B. Poluchenie intermetallidnyh soedinenij i pokrytij pri nestacionarnyh temperaturnyh uslovijah. Novye materialy i tehnologii v metallurgii i mashinostroenii: Nauchnyj zhurnal No 2, 2014. ZNTU, Zaporozh'e, pp.67–71 (in Russian).

Получена (received) 22.10.2018

Відомості про авторів /Сведения об авторах / About the Authors

Середя Борис Петрович (Середя Борис Петрович, Sereda Borys Petrovich) – научный руководитель научно-исследовательского центра «Материаловедения и инновационных технологий», доктор технических наук, профессор Днепропетровского государственного технического университета, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9518-381X>; e-mail: seredabp@ukr.net

Палехова Ирина Владимировна (Палехова Ирина Володимирівна, Palekhova Irina Vladimirovna) – аспірант кафедри «Автомобілі та автомобільне господарство» Дніпровський державний технічний університет, <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6507380761> , e-mail: seredabp@ukr.net