

УДК 621.793.6:669.35

Ткаченко С. Н.

канд. техн. наук, доцент кафедры информационных технологий Института управления Классического частного университета, Запорожье, Украина,
e-mail: space7770@ukr.net

ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ПРИ СИЛЬНОЭКЗОТЕРМИЧЕСКОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ХИМИЧЕСКИХ РЕАГЕНТОВ БОРА И КРЕМНИЯ В КОНДЕНСИРОВАННОЙ ФАЗЕ

Цель работы. Повышение эксплуатационных свойств деталей и инструмента методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза.

Методы исследования. Стандартное испытание на износ.

Полученные результаты. Изучены условия повышения эксплуатационных свойств деталей и инструмента при использовании сильноэкзотермического взаимодействия химических реагентов в конденсированной фазе. В работе представлены результаты исследования работоспособности поверхности деталей, модифицированных методом СВС, а также влияния последующей термической обработки на износостойкость опытных образцов и пары трения в целом. Установлено, что метод СВС позволяет путем подбора соответствующего состава шихты и инициирования реакции горения с выделением большого количества теплоты значительно сократить время процесса при формировании поверхности достаточно высокого качества. Основными упрочняющими фазами являются карбиды и бориды хрома. Карбидная фаза в покрытии сталей представлена дисперсными карбидами хрома типа $Cr_{23}C_6$ (с микротвердостью 9900–11300 МПа). В покрытии на чугунах вследствие более высокого содержания углерода присутствуют более твердые карбиды Cr_7C_3 (с микротвердостью 16200–19300 МПа), а также бориды CrB (с микротвердостью более 20000 МПа). Наибольшей износостойкостью обладают упрочненные образцы, легированные 11 % Cr. В силу того, что хром входит в состав хромистой составляющей, которая отвечает за температурный фактор, то дальнейшее увеличение содержания хрома (при содержании ХС 22 %) в данной технологии не представляется возможным. Введение бора в шихту способствует равномерному распределению мелкодисперсных карбидов по сечению слоя и является активным аустенизатором. Наружный борированный диффузионный слой представляет собой FeB , а внутренний – Fe_2B . При такой технологии на поверхности исследуемых образцов формируются достаточно однородные слои с эффективной глубиной 150–200 мкм, которые представляют собой высокодисперсную структуру с равномерным распределением частиц упрочняющих фаз. При всех типах износа карбидная фаза должна отличаться минимальным размером, компактной структурой, максимальной твердостью. В результате показано что хром, используемый в качестве обязательного экзотермического реагента для инициации СВС-процесса в количестве 11 % масс, приводит к увеличению износостойкости поверхности в 2,4–2,7 раз по отношению к неупрочненному материалу благодаря образованию твердых фаз из карбидов и боридов хрома.

Научная новизна. В результате показано, что хром, используемый в качестве обязательного экзотермического реагента для инициации СВС-процесса в количестве 11 % масс, приводит к увеличению износостойкости поверхности в 2,4–2,7 раз по отношению к неупрочненному материалу благодаря образованию твердых фаз из карбидов и боридов хрома.

Практическая ценность. Одним из преимуществ СВС – технологии является возможность получения многокомпонентных композиций в одну стадию: формирование как простых, так и сложнолегированных соединений. Установлено, что метод СВС позволяет путем подбора соответствующего состава шихты и инициирования реакции горения с выделением большого количества теплоты значительно сократить время процесса (как правило, не более 1 ч) при формировании поверхности достаточно высокого качества.

Ключевые слова: эксплуатационные свойства; износ; самораспространяющийся высокотемпературный синтез; диффузия; слой; покрытие; тепловое самовоспламенение; конденсированная газовая фаза; шихта; бор; кремний.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальным является вопрос повышения эксплуатационного срока службы деталей за счет поверхностного упрочнения. Одним из наиболее

эффективных технологических направлений повышения надежности работы эксплуатационной стойкости деталей из высокоуглеродистых материалов, которые используют в индустрии, явля-

© Ткаченко С. Н., 2019

DOI 10.15588/1727-0219-2019-1-5

ISSN 1727-0219 Вестник двигателестроения № 1/2019

— 35 —

ется нанесение на их рабочую поверхность различных покрытий. Покрытие представляет поверхностный слой, целенаправленно создаваемый воздействием окружающей среды на поверхность детали, и характеризующийся конечной толщиной, а также химическим составом и структурно-фазовым состоянием, качественно отличающимися от аналогичных характеристик материала основы. Незначительную затрату материала покрытия и высокие характеристики поверхности детали обеспечивают повышенный интерес к разработке новых методов нанесения покрытий целевого назначения и широкое внедрение покрытий в промышленность. Эффективным (в отношении подложки) методом улучшения поверхности является химико-термическая обработка (ХТО) в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) является эффективным энерго- и ресурсосберегающим методом получения тугоплавких и композиционных материалов [1–2] и порошков для газотермического напыления [3], основанным на использовании экзотермического эффекта реакций взаимодействия большинства металлов периодической системы с бором, углеродом, азотом, кремнием и др. [4].

1 АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Разработка новых способов химико-термической обработки деталей, которые позволяют регулировать состав и структуру покрытий, обеспечивая высокие эксплуатационные характеристики деталей при минимальном времени формирования покрытий интересует широкий круг ученых. Проблеме защиты высокоуглеродистых материалов путем нанесения на детали комплексных защитных покрытий предложено авторами работ [4–33]. В работе [34] авторы предложили способ, который основан на явлении СВС. Сущность метода СВС заключается в проведении экзотермических реакций в режиме распространения волны горения с образованием продуктов горения в виде соединений и материалов, представляющих практическую ценность и обладающих ценными характеристиками [36]. Такой синтез материалов значительно отличается от стандартных методов порошковой металлургии, основанных на спекании химически инертных соединений и обладают рядом очевидных преимуществ, среди которых можно отметить следующие [36]:

1) формирование активных химических и термических зон, что позволяет интенсифицировать превращения реагентов и приводит к образованию нужных продуктов;

2) использование менее дорогой химической

энергии (тепловыделение при экзотермических реакциях) вместо электрической для достижения высоких температур, требуемых при получении продуктов;

3) использование относительно простого оборудования (вместо печей и других нагревательных устройств);

4) использование в процессе быстрого послойного нагрева больших объемов реагентов вместо медленного прогрева через стенки от внешних источников тепла.

В зависимости от условий реализации СВС можно получать диффузионные слои в режиме горения или теплового самовоспламенения при времени процесса от нескольких минут до 1–1,5 ч. При этом формируется прочное тонкое покрытие с регулируемой толщиной в пределах 5–150 мкм [34]. При диффузионном насыщении можно получать равномерные по толщине покрытия на изделиях сложной формы [35]. СВС обладает рядом специфических черт, которые выгодно отличают его от существующих способов получения неорганических соединений. К ним следует отнести высокие температуры и малое время проведения синтеза, относительно малые внешние энергетические затраты, простота оборудования, и что самое главное возможность управления процессом синтеза, и, как следствие, получение материалов с заданным сочетанием свойств [20, 21]. При синтезе композиционных порошков СВС в качестве связок обычно используются металлы и металлические сплавы (на основе Ni, Fe, Al), а также интерметаллиды (Ni_xAl_y , Fe_xAl_y , Ti_xNi_y , Ti_xAl_y). В качестве тугоплавких соединений, как правило, используют карбиды вольфрама, титана, хрома, кремния и их комбинации, а также оксиды алюминия, титана и хрома. Одним из преимуществ технологии СВС является возможность получения многокомпонентных композиций в одну стадию: формирование как простых, так и сложнелегированных соединений. Характерными особенностями синтезируемых порошков являются: наличие металлургической связи между составляющими композиционной частицы; мелкозернистая структура с тонким объемным распределением тугоплавкой составляющей и постоянством фазового состава независимо от размеров порошковой композиционной частицы. Обеспечить комплекс защитных свойств в зависимости от условий эксплуатации покрытия позволяют порошковые электродные материалы с нанодобавками, полученные по технологии СВС.

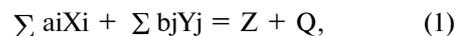
Повышение эксплуатационных свойств деталей машин и механизмов представлены в работах [4–13], связанные с применением новых составов электродных материалов и современного оборудования, обеспечивающих развитие техно-

логии электроискрового легирования (ЭИЛ). Показано, что для улучшения свойств необходим подбор соответствующих электродных материалов. Рекомендуются для обеспечения защитных свойств в зависимости от условий эксплуатации покрытий применять синтетические твердосплавные инструментальные материалы (СТИМ), полученные по технологии СВС. В качестве основы этих материалов применяется карбид титана, бора или хрома, который обеспечивает твердость и износостойкость. Для обеспечения высокой когезии и пластичности формируемых покрытий служат добавки Ni; NiAl; TiAl; ХН70Ю и др. В процессе ЭИЛ ударно-тепловое воздействие искрового разряда приводит к формированию мелкозернистой структуры на рабочей поверхности материала электрода. Идет усталостное разрушение зерен карбида титана, взаимодействие с воздухом, в канале разряда, и уже в структуре покрытия размер зерен составляет 100–500 нм. Анализ микроструктур покрытий на титановой подложке ОТ4-1, полученных с использованием электрода на основе TiC-Ti₃AlC₂ и из этого же сплава, но модифицированного нанодобавкой W, позволил [9, 10] установить позитивное влияние нанодобавок. Электроискровые покрытия с нанодобавками имеют повышенные значения толщины, сплошности, микротвердости, жаростойкости, при этом снижается коэффициент трения [4, 5, 10, 11]. Добавки нанопорошков обеспечивают значительное модифицирование структуры электродных материалов от 2 до 7 раз и повышение их физико-химических свойств [6–13]. По данным работы [11] по технологии горячего прессования из нанодисперсного порошка 92 % WC – 8 % Co получен наноструктурный электродный материал с размером зерна карбида вольфрама 100 нм. Применение такого электрода по сравнению с обычным электродом ВК8 (размер зерен WC = 1–2 мкм), способствовало повышению характеристик покрытия, а именно твердости (Нм) модуля упругости, сплошности, толщины и др.

2 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Задачей данного вида ХТО является придание поверхности упрочняемых материалов высоких поверхностных физико-механических характеристик при минимальном времени проведения процесса, а также минимальных экономических затратах [5]. Сущность процесса заключается в том, что после локального инициирования, реакция протекает в узкой зоне – волне горения, перемещающейся по образцу за счет теплопередачи. В качестве реагентов используются смеси элементов: металлов с неметаллами; металлов с металлами; неметаллов с неметаллами или их соединений, способных при взаимодействии выделять большое количество тепла [6].

Химическая реакция процесса может быть представлена следующей формулой (1) [7–21]:



где Q – тепловой эффект; X – Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Mo, W и др.; Y – B, C, N, Si, Se, S, Al и др.; Z – бориды, карбиды, нитриды, силициды и др.

Благодаря особенностям процесса: высокой температуре; кратковременности химических и физических процессов; высокой скорости внутреннего саморазогрева; протеканию реакций в условиях резкого градиента температур и др. метод позволяет синтезировать композиции, получение которых другими известными способами требует больших затрат или сложного дорогостоящего оборудования, либо вообще невозможно [3].

Принципиально для реализации СВС выделяют способы управления [18–19]:

- 1) на стадии подготовки шихты;
- 2) на стадии проведения процесса, включающее термический подогрев системы;
- 3) при охлаждении готовых продуктов, состоящее в изменении температурного режима охлаждения и типа используемой атмосферы.

Проблему защиты высокоуглеродистых материалов можно решить путем нанесения на детали комплексных защитных покрытий [22–33]. Нанесение покрытий обычной химико-термической обработкой характеризуются ресурсо- и энергоемкостью, а также длительностью. В связи с этим, является актуальной разработка новых способов химико-термической обработки, позволяющие регулировать состав и структуру покрытий, обеспечивающие необходимые эксплуатационные характеристики при минимальном времени их формирования. Такими технологиями могут служить способы, основанные на явлении самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [34]. В зависимости от условий реализации СВС-процесса можно получать диффузионные слои в режиме горения или теплового самовоспламенения при времени процесса от нескольких минут до 1–1,5 ч. При этом формируется прочное тонкое покрытие с регулируемой толщиной в пределах 5–150 мкм [34]. При диффузионном насыщении можно получать равномерные по толщине покрытия на изделиях сложной формы [35]. Сущность метода СВС заключается в проведении экзотермических реакций в режиме распространения волны горения с образованием продуктов горения в виде соединений и материалов, представляющих практическую ценность и обладающих ценными характеристиками [36]. Такой синтез материалов значительно отличается от стандартных методов порошковой ме-

таллургии, основанных на спекании химических инертных соединений и обладают рядом очевидных преимуществ, среди которых можно отметить следующие [36]:

1) формирование активных химических и термических зон, что позволяет интенсифицировать превращения реагентов и приводит к образованию нужных продуктов;

2) использование менее дорогой химической энергии (тепловыделение при экзотермических реакциях) вместо электрической для достижения высоких температур, требуемых при получении продуктов;

3) использование относительно простого оборудования (вместо печей и других нагревательных устройств);

4) использование в процессе быстрого послыдного нагрева больших объемов реагентов вместо медленного прогрева через стенки от внешних источников тепла.

СВС обладает рядом специфических черт, которые выгодно отличают его от существующих способов получения неорганических соединений. К ним следует отнести высокие температуры и малое время проведения синтеза, относительно малые внешние энергетические затраты, простота оборудования, и что самое главное, возможность управления процессом синтеза, и, как следствие, получение материалов с заданным сочетанием свойств [20, 21]. Использование самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) для формирования защитных покрытий основано на применении порошковых экзотермических смесей и представляет собой экзотермическое взаимодействие химических элементов в конденсированной фазе, способное к самопроизвольному распространению в виде волны горения [18–19].

При синтезировании композиционных порошков СВС в качестве связок обычно используются металлы, металлические сплавы (на основе Ni, Fe, Al) и интерметаллиды (Ni_xAl_y , Fe_xAl_y , Ti_xNi_y , Ti_xAl_y). В качестве тугоплавких соединений, как правило, используют карбиды вольфрама, титана, хрома, кремния и их комбинации, а также оксиды алюминия, титана и хрома.

Одним из преимуществ СВС – технологии является возможность получения многокомпонентных композиций в одну стадию: формирование как простых, так и сложнолегированных соединений.

Характерными особенностями синтезируемых порошков являются: наличие металлургической связи между составляющими композиционной частицы; мелкозернистая структура с тонким объемным распределением тугоплавкой составляющей и постоянством фазового состава независимо от размеров порошковой композиционной частицы.

Технология получения СВС- порошков включает следующие основные этапы: подготовку порошковой шихты; непосредственно синтез; разлом и классификацию полученного продукта по фракциям.

Самофлюсующиеся порошки на никель-хромовой основе широко используются при газотермическом напылении благодаря значительному повышению их эксплуатационных характеристик, которые частично связаны с относительно низкой температурой плавления жидкой фазы, не превышающей 1050–1080 °С. Структура порошков и наплавленных покрытий исследовались многими авторами. Установлены основные структурные факторы, определяющие их повышение.

Однако газотермическое напыление не всегда решает проблему получения «не толстых» покрытий с высокой адгезионной прочностью сцепления без потери твердости, а также получать качественные покрытия на локальных областях деталей и инструмента различного назначения.

Обеспечить комплекс защитных свойств в зависимости от условий эксплуатации покрытия позволяют порошковые электродные материалы с нанодобавками, полученные по технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС).

В цикле работ [4–13] представлены результаты исследований по развитию технологии электроискрового легирования (ЭИЛ), связанные с применением новых составов электродных материалов и современного оборудования, обеспечивающих повышение эксплуатационных свойств ответственных деталей машин и механизмов. Показано, что для каждой конкретной технологической задачи необходим подбор соответствующих электродных материалов. Рекомендуются для обеспечения защитных свойств в зависимости от условий эксплуатации покрытий применять синтетические твердосплавные инструментальные материалы (СТИМ), полученные по технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). В качестве основы этих материалов применяется карбид титана, бора или хрома, который обеспечивает твердость и износостойкость. Связкой для них служат Ni; NiAl; TiAl; XH70Ю и др., которые обеспечивают высокую когезию и пластичность формируемых покрытий.

В процессе ЭИЛ ударно-тепловое воздействие искрового разряда приводит к формированию мелкозернистой структуры на рабочей поверхности материала электрода. Идет усталостное разрушение зерен карбида титана, взаимодействие с воздухом, в канале разряда, и уже в структуре покрытия размер зерен составляет 100–500 нм. Анализ микроструктур покрытий на титановой

подложке ОТ4-1, полученных с использованием электрода на основе $TiC-Ti_3AlC_2$ и из этого же сплава, но модифицированного нанодобавкой W, позволил [9, 10] установить позитивное влияние нанодобавок. Электроискровые покрытия с нанодобавками имеют повышенные значения толщины, сплошности, микротвердости, жаростойкости, при этом снижается коэффициент трения [4, 5, 10, 11]. Добавки нанопорошков обеспечивают значительное модифицирование структуры электродных материалов от 2 до 7 раз и повышение их физико-химических свойств [6–13]. По данным работы [11] по технологии горячего прессования из нанодисперсного порошка 92 % WC – 8 % Co получен наноструктурный электродный материал с размером зерна карбида вольфрама 100 нм. Применение такого электрода по сравнению с обычным электродом VK8 (размер зерен WC = 1–2 мкм), способствовало повышению характеристик покрытия, а именно твердости (H_u) модуля упругости, сплошности, толщины и др.

Вышеприведенный наноструктурный электродный материал обеспечил формирование более износостойкого покрытия на титановом сплаве BT 14 с одновременным снижением коэффициента трения по сравнению с покрытием из традиционного электрода VK8.

Установлено, что метод СВС позволяет путем подбора соответствующего состава шихты и иницирования реакции горения с выделением большого количества теплоты значительно сократить время процесса (как правило, не более 1 ч) при формировании поверхности достаточно высокого качества.

3 ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Изнашивание защитных покрытий на материале ВЧ 45-5 при сухом трении проводилось при скорости скольжения контртела (сталь 30ХГСА) 1,02 м/с и удельном давлении 7,5 МПа на пути 500 м при времени испытаний 8,17 мин (рис. 1а). В условиях граничного трения испытания проводились при той же скорости и удельном давлении с подачей масла 20 капель в минуту (масло индустриальное И-20) на пути трения $1,4 \times 10^4$ м при времени испытаний 3,81 ч (рис. 1б). Скорость и продолжительность испытания при обоих видах трения были установлены опытным путем, исходя из необходимости получения надежных и воспроизводимых результатов при малой продолжительности испытания. Температура процесса поверхностного упрочнения составляла для ВЧ 45-5 – 1000 °С; время выдержки – 80 мин.

Из рис. 1 видно, что наибольшей износостойкостью обладают упрочненные образцы, легированные 11 % Cr. В силу того, что хром входит в состав хромистой составляющей, которая отвечает за температурный фактор, то дальнейшее увеличение содержания хрома (при содержании ХС 22 %) в данной технологии не представляется возможным. Введение бора в шихту, способствует равномерному распределению мелкодисперсных карбидов по сечению слоя и является активным аустенизатором. Наружный борированный диффузионный слой представляет собой FeB, а внутренний – Fe_2B .

При такой технологии на поверхности исследуемых образцов формируются достаточно однородные слои с эффективной глубиной 150–200 мкм, которые представляют собой высокодисперсную структуру с равномерным распределением частиц упрочняющих фаз.

Высокая износостойкость поверхности в первую очередь определяется карбидной фазой и достигается при:

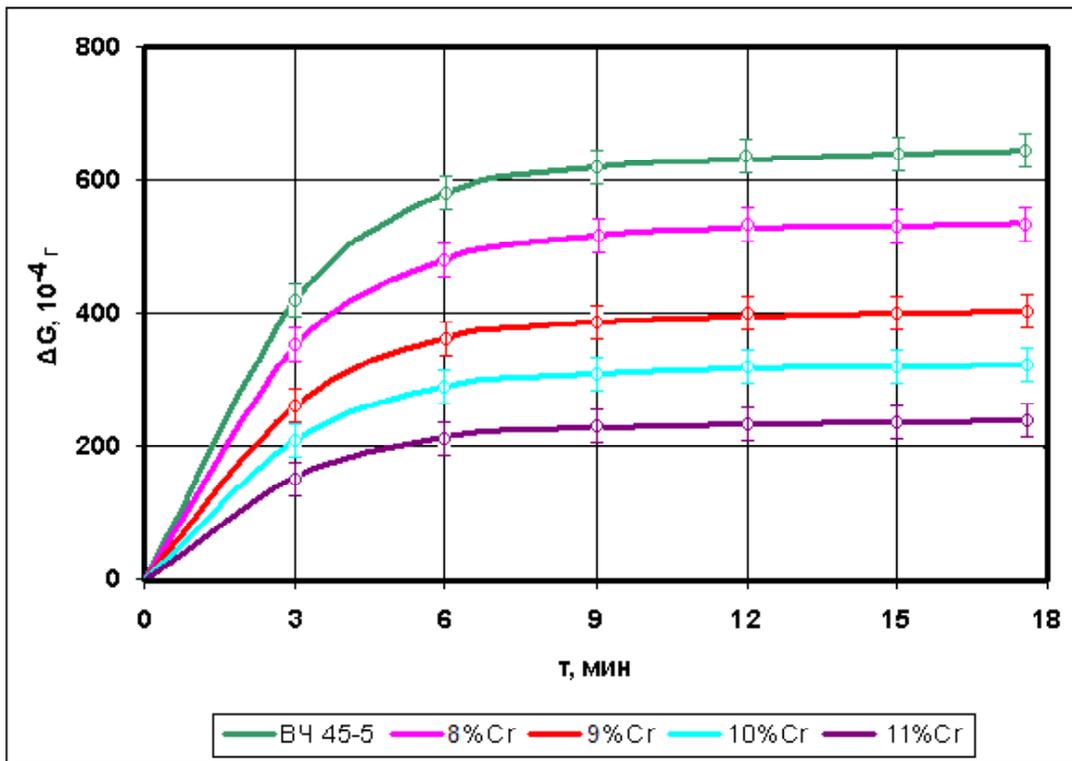
- максимальном количестве карбидов;
- максимальной твердости карбидов, превосходящей твердость абразива;
- минимальном размере карбидов;
- тригональных карбидах типа Cr_7C_3 , ориентированных осью перпендикулярно изнашиваемой поверхности;
- нанесении слоев с большим количеством (≥ 40 %) заэвтектических карбидов при условии их значительного измельчения и удовлетворительных механических свойствах сплавов.

Основными упрочняющими фазами являются карбиды и бориды хрома. Карбидная фаза в покрытии сталей представлена дисперсными карбидами хрома типа $Cr_{23}C_6$ (с микротвердостью 9900–11300 МПа). В покрытии на чугунах вследствие более высокого содержания углерода присутствуют более твердые карбиды Cr_7C_3 (с микротвердостью 16200–19300 МПа), а также бориды CrB (с микротвердостью более 20000 МПа).

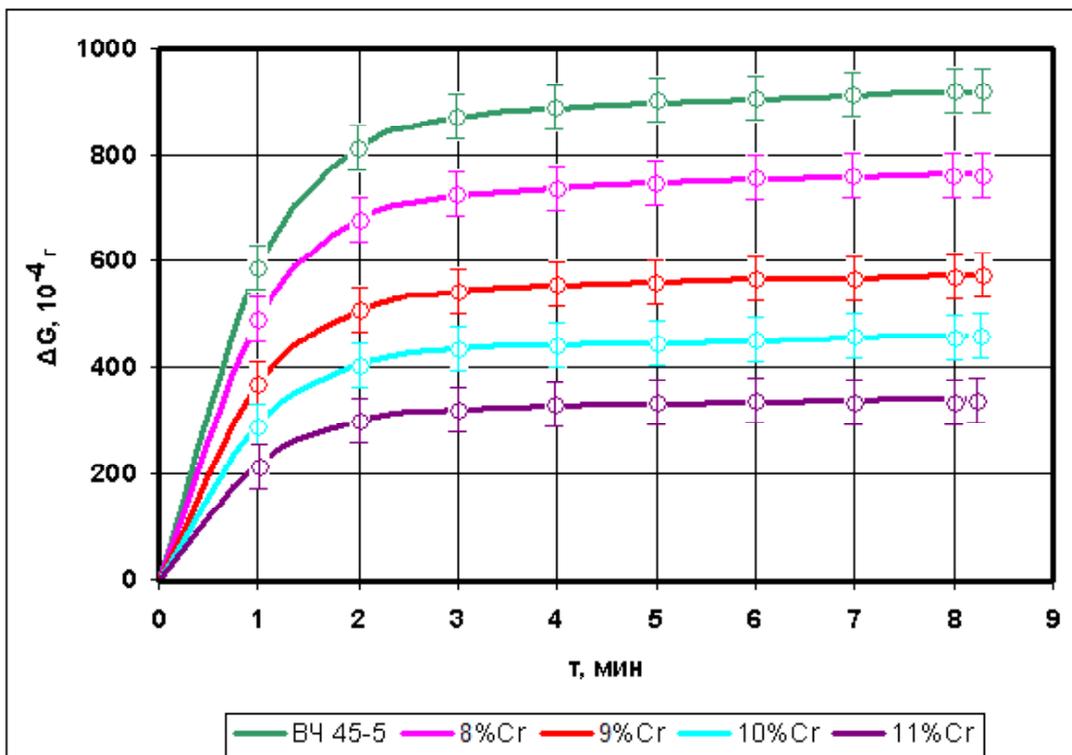
ВЫВОДЫ

При всех типах износа карбидная фаза должна отличаться минимальным размером, компактной структурой и максимальной твердостью.

В результате показано, что хром, используемый в качестве обязательного экзотермического реагента для инициации СВС-процесса в количестве 11% масс, приводит к увеличению износостойкости поверхности в 2,4–2,7 раз по отношению к неупрочненному материалу благодаря образованию твердых фаз из карбидов и боридов хрома.



a



b

Рисунок 1. Зависимость износостойкости на материале ВЧ 45-5 без покрытия и с различным содержанием хрома на покрытии при сухом трении (*a*) и в условиях граничного трения с подачей масла (*b*)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мержанов А. Г. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез / А. Г. Мержанов // Под. ред. Я. М. Колотверкина. — М. : Химия, 1983. — С. 6–45.
2. Левашов Е. А. Физико-химические и технологические основы самораспространяющегося синтеза / Е. А. Левашов, А. С. Погаев, В. И. Юхнин. — М. : Бином, 1999. — 176 с.
3. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез порошков для газотермического напыления / А. Ф. Ильющенко, А. В. Беляев, Т. Д. Талако и др. // Технология ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки: материалы 8-й межд. практич. конф.-выставки: в 2 ч. Часть 1. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2006. — С. 135–139.
4. Левашов Е. А. Перспективы применения сплава СТИМ-3Б модифицированного нанокристаллическим порошком ZrO_2 , в технологии электроискрового легирования / Е. А. Левашов, А. Е. Кудряшов, О. В. Малочкин // Изв. ВУЗов. Цветная металлургия. — 2000. — № 5. — С. 68–72.
5. Об особенностях влияния нанокристаллических порошков на процессы горения и формирования составов / Е. А. Левашов, А. Е. Кудряшов, О. В. Малочкин и др. // Изв. ВУЗов. Цветная металлургия. — 2001. — № 1. — С. 53–59.
6. Левашов Е. А. О влиянии нанокристаллических порошков на процесс формирования, структуру и свойства электроискровых покрытий на основе титанохромового карбида / Е. А. Левашов, А. Е. Кудряшов, О. В. Малочкин // Изв. ВУЗов. Цветная металлургия. — 2001. — № 3. — С. 44–51.
7. Кудряшов А. Е. Разработка и промышленное применение новых композиционных материалов и технологии электроискрового легирования : автореф. дисс. канд. техн. наук / А. Е. Кудряшов. — М., 2001. — 19 с.
8. Исследование влияния добавки нанокристаллического порошка оксида циркония различной природы на состав, структуру и физико-механические свойства твердого сплава СТИМ-3Б / Е. А. Левашов, А. Е. Кудряшов, Ю. С. Погожев и др. // Физика металлов и металловедение. — 2003. — Т. 96. — № 2. — С. 87–94.
9. Особенности влияния нанокристаллических порошков на структуру и свойства сплава $Ti - 40\% \text{ XH70Ю}$, полученного методом СВС / Е. А. Левашов, Е. С. Мишина, Б. Р. Сетулин и др. // Физика металлов и металловедение. — 2003. — Т. 96. — № 6. — С. 58–64.
10. Исследование кинетики формирования структуры, состава и свойств электроискровых покрытий на титановом сплаве OT4-1 из модифицированных электродных материалов на основе $TiC-XH70Ю$ / Е. А. Левашов, А. Е. Кудряшов, Е. С. Мишина и др. // Изв. ВУЗов. Цветная металлургия. — 2004. — № 1. — С. 68–76.
11. Исследование влияния параметров импульсных разрядов на массоперенос, структуру, состав и свойства электроискровых покрытий на основе $TiC-NiAl$, модифицированных нанодисперсными компонентами / Е. А. Левашов, А. Е. Кудряшов, Ю. С. Погожев и др. // Изв. ВУЗов. Цветная металлургия. — 2004. — № 6. — С. 39–46.
12. Особенности влияния добавок нанодисперсных тугоплавких частиц на состав, структуру и физико-механические свойства твердого СВС- сплава СТИМ-40НА (система $TiC-NiAl$) / Ю. С. Погожев, Е. А. Левашов, А. Е. Кудряшов и др. // Цветные металлы. — 2005. — № 1. — С. 59–64.
13. Упрочнение деталей и инструмента методом электроискрового легирования и применением новых электродных материалов / Е. И. Замулаева, Е. А. Левашов, А. Е. Кудряшов и др. // Технология ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки: материалы 8-й межд. практич. конф.-выставки: в 2 ч. Часть 2. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. — С. 200–209.
14. Евтушенко А. Т. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез инструментальной стали / А. Т. Евтушенко, С. Пазаре, С. С. Горбунов // МИТОМ. — 2007. — № 4. — С. 43–46.
15. Архипов В. Н. Повышение стойкости инструмента методом СВС / В. Е. Архипов, Г. В. Москвитин, А. П. Поляков // СТИН. — 2008. — № 1. — С. 19–21.
16. Покрытия на основе хрома и бора, полученные методом СВС / В. Е. Архипов, Л. И. Куксенова, Г. В. Москвитин и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2008. — № 4. — С. 28–32.
17. Рыбакова Л. М. Рентгенографический метод исследования структурных изменений в тонком поверхностном слое металла при трении / Л. М. Рыбакова, Л. И. Куксенова, С. В. Босов // Заводская лаборатория. — 1973. — № 3. — С. 293–296.
18. Борисова А. Л. Использование процессов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / А. Л. Борисова, Ю. С. Борисов // Порошковая металлургия. — 2008. — № 1/2. — С. 105–125.

19. Шаривкер С. Ю. СВС-порошки и их технологическая переработка / С. Ю. Шаривкер, А. Г. Мержанов – Черногловка, 2000. – 123 с.
20. Истин В. И. Высокотемпературный синтез интерметаллических соединений : монография / В. И. Истин, Ю. С. Найбороденко. – Томск : Изд. ТГУ, 1989. – 214 с.
21. Евтектичні градієнтні зносостійкі матеріали / М. І. Павечко, Г. С. Ершов, К. О. Ленік та ін. // Порошкова металургія. – 1999. – №7/8. – С. 17–21.
22. Мержанов А.Г. Твердо-пламенное горение / А. Г. Мержанов – Черногловка : ИСМАН, 2000. – 244 с.
23. СВС дисперсных алюминидов никеля на их основе / Б. М. Вольпе, В. В. Евстигнеев, И. В. Милуков [и др.] // Физика и химия обраб. материалов. – 1996. – №1. – С. 50–54.
24. СВС дисперсных материалов Ti-Al и защитные покрытия на их основе / Б. М. Вольпе, В. В. Евстигнеев, И. В. Милуков [и др.] // Физика и химия обраб. материалов. – 1995. – № 2. – С. 73–79.
25. Исследование свойств газотермических покрытий и композиционных порошков никелькарбид титана и хрома / И. Н. Горбатов, В. М. Шкиро, А. С. Терентьев [и др.] // Физика и химия обраб. материалов. – 1991. – № 4. – С. 102–106.
26. Особенности структуры и свойств композиционных материалов на основе карбида титана с добавками меди / Т. А. Азарова, П. А. Витязь, Б. А. Виллаге [и др.] // Порошковая металлургия. – Минск, 2002. – Вып. 25. – С. 85–89.
27. СВС-порошки для газотермических покрытий, работающих в условиях комплексного воздействия коррозии и износа / А. Ф. Илющенко, А. В. Беляев, Т. Л. Талако [и др.] // Порошковая металлургия. – Минск, 2000. – Вып. 23. – С. 54–57.
28. Газотермические покрытия из композиционных порошков на основе карбида титана-хрома / И. Н. Горбатов, А. Д. Панасюк, Л. К. Шведова [и др.] // Защитные покрытия на металлах. – 1991. – №25. – С. 22–25.
29. Структура и свойства газотермических покрытий на основе карбида титана, оксидов титана и хрома, содержащих твердые смазки / А. Л. Борисова, Л. И. Адеева, А. Ю. Туник [и др.] // Автомат. сварка. – 1999. – №1. – С. 22–27.
30. Амосов А. П. Порошковая технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза материалов / А. П. Амосов, И. П. Боровинская, А. Г. Мержанов. – М. : Машиностроение-1, 2007. – 567 с.
31. Покрытия на основе хрома и бора, полученные методом СВС / В. Е. Архипов, Л. И. Куксенова, Г. В. Москвитин [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. – № 4. – С. 25–30.
32. Гордиенко С. П. Взаимодействие титана с нитридом бора в режиме самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / С. П. Гордиенко, Т. М. Евтушок // Порошковая металлургия. – 2001. – №1/2. – С. 76–79.
33. Зозуля В. Д. Принципы создания покрытий на антифрикционных материалах методом СВС / В. Д. Зозуля // Изв. вуз. Цвет. метал. – 1999. – № 5. – С. 58–63.
34. International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis, Alletron Press, Inc. 150, Fifth Avenue, New York, 10011, USA. – P. 68.
35. Зозуля В. Д. Принципы создания новых трибологических СВС-материалов / В. Д. Зозуля // Трение и износ. – 1994. – 15, № 3. – С. 422–428.
36. Истин В. И. Высокотемпературный синтез интерметаллических соединений : монография / В. И. Истин, Ю. С. Найбороденко. – Томск : Изд. ТГУ, 1989. – 214 с.

Статья поступила в редакцию 12.03.2019

Ткаченко С. М. канд. техн. наук, доцент кафедры інформаційних технологій Інститута управління Класичного приватного університету, Запоріжжя, e-mail: space7770@ukr.net

ПОВЕРХНЕВЕ ЗМІЦНЕННЯ ПРИ СИЛЬНОЕКЗОТЕРМІЧНІЙ ВЗАЄМОДІЇ ХІМІЧНИХ РЕАГЕНТІВ БОРА І КРЕМНІЮ В КОНДЕНСОВАНІЙ ФАЗИ

Мета роботи. Підвищення експлуатаційних властивостей деталей і інструменту методом саморозповсюдженого високотемпературного синтезу.

Методи дослідження. Стандартне випробування на знос.

Отримані результати. Вивчено умови підвищення експлуатаційних властивостей деталей і інструменту при використанні сильноекзотермічної взаємодії хімічних реагентів в конденсованій фазі. В

роботі представлені результати дослідження працездатності поверхні деталей, модифікованих методом СВС, а також впливу подальшої термічної обробки на зносостійкість дослідних зразків і пари тертя в цілому. Встановлено, що метод СВС дозволяє шляхом підбору відповідного складу шихти і ініціювання реакції горіння з виділенням великої кількості теплоти значно скоротити час процесу при формуванні поверхні досить високої якості. Основними зміцнюючими фазами є карбіди та бориди хрому. Карбідна фаза в покритті сталей представлена дисперсними карбідами хрому типу Cr_{23}C_6 (з мікротвердістю 9900–11300 МПа). У покритті на чавунах внаслідок більш високого вмісту вуглецю присутні більш тверді карбіди Cr_7C_3 (з мікротвердістю 16200–19300 МПа), а також бориди CrB (з мікротвердістю більше 20000 МПа). Найбільшою зносостійкістю володіють зміцнені зразки, леговані 11 % Cr. В силу того, що хром входить до складу хромової складової, що відповідає за температурний фактор, то подальше збільшення вмісту хрому (при вмісті ХС 22 %) в даній технології не представляється можливим. Введення бору в шихту сприяє рівномірному розподілу дрібнодисперсних карбідів по перетину шару і є активним аустенізатором. Зовнішній борований дифузійний шар являє собою Fe_2B , а внутрішній – Fe_3B . При такій технології на поверхні досліджуваних зразків формуються досить однорідні шари з ефективною глибиною 150–200 мкм, які представляють собою високодисперсну структуру з рівномірним розподілом часток зміцнюючих фаз. При всіх типах зносу карбідна фаза повинна відрізнятися мінімальним розміром, компактною структурою, максимальною твердістю. В результаті показано, що хром, який використовується в якості обов'язкового екзотермічного реагенту для ініціації СВС-процесу в кількості 11% мас, призводить до збільшення зносостійкості поверхні в 2,4–2,7 разів по відношенню до незміцненого матеріалу завдяки утворенню твердих фаз з карбідів і боридів хрому.

Наукова новизна. У результаті показано, що хром, який використовується в якості обов'язкового екзотермічного реагенту для ініціації СВС-процесу в кількості 11% мас, призводить до збільшення зносостійкості поверхні в 2,4–2,7 разів по відношенню до незміцненого матеріалу завдяки утворенню твердих фаз з карбідів і боридів хрому.

Практична цінність. Одним з переваг СВС- технології є можливість отримання багатокомпонентних композицій в одну стадію: формування як простих, так і складнолегованих з'єднань. Встановлено, що метод СВС дозволяє шляхом підбору відповідного складу шихти і ініціювання реакції горіння з виділенням великої кількості теплоти значно скоротити час процесу (як правило, не більше 1 г) при формуванні поверхні досить високої якості.

Ключові слова: експлуатаційні властивості; знос; саморозповсюджуваний високотемпературний синтез; дифузія; шар; покриття; теплове самозаймання; конденсована газова фаза; шихта; бор; кремній.

Tkachenko S. N. Ph.D, Associate professor of the Information Technology Institute of Management of the Classical Private University, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: space7770@ukr.net

SURFACE HARDENING IN THE STRONGLY-EZOTHERMAL INTERACTION OF CHEMICAL REAGENTS OF BORON AND SILICON IN CONDENSED PHASE

Objective. Exploiting properties of parts and tools by the method of self-propagating high-temperature synthesis are improves.

Methods of research. Standard wear test.

Results. The conditions for improving exploiting characteristics of parts and tools using high exothermic interaction of chemical reagents in the condensed phase were studied. The article presents the results of a study of the performance of the surface of parts modified by the SHS method, as well as the effect of subsequent heat treatment on the wear resistance of the prototypes and the friction pair as a whole. It is established that the SHS method makes it possible, by selecting the appropriate composition of the charge and initiating the combustion reaction with the release of a large amount of heat, to significantly reduce the time of the process when forming a surface of sufficiently high quality. The main strengthening phases are carbides and borides of chromium. The carbide phase in the coating of steels is represented by dispersed chromium carbides of the Cr_{23}C_6 type (with microhardness of 9900–11300 MPa). In the coating on cast iron, due to the higher carbon content, there are more solid carbides Cr_7C_3 (with a microhardness of 16200–19300 MPa), as well as CrB borides (with microhardness more than 20,000 MPa). Hardened specimens alloyed with 11 % Cr have the highest wear resistance. Due to the fact that chromium is the part of the chromium component, which is responsible for the temperature factor, is not further increase possible to the chromium content (when the ХС content is 22 %). The introduction of boron into the mixture, contributes to the uniform distribution of fine

carbides over the cross section of the layer and is an active austenerizer. The outer borated diffusion layer is FeB , and the inner is Fe_2B . With this technology, rather homogeneous layers with an effective depth of 150–200 μm are formed on the surface of the samples, which are highly dispersed structure with a uniform distribution of particles of strengthening phases. For all the types of wear, the carbide phase should be distinguished by a minimum size, compact structure, maximum hardness. As a result, it was shown that chromium, used as a mandatory exothermic reagent to initiate the SHS process in an amount of 11 % by weight, leads to an increase in the surface wear resistance of 2.4–2.7 times with respect to the unstretched material due to the formation of solid phases of chromium carbides and borides chromium.

Scientific novelty. As a result, it was shown that chromium, used as a mandatory exothermic reagent to initiate the SHS process in the amount of 11% by weight, leads to an increase in surface wear resistance of 2.4–2.7 times with respect to the unhardened material due to the formation of solid phases of chromium carbides and borides.

Practical value. One of the advantages of the SHS technology is the possibility of obtaining multicomponent compositions in one stage: the formation of both simple and complexly alloyed compounds. It has been established that the method of SHS allows, by selecting the appropriate composition of the charge and initiating a combustion reaction with the release of large amount of heat, to significantly reduce the process time (usually not more than 1 hour) while forming a surface of sufficiently high quality.

Key words: operational properties; wear; self-propagating high-temperature synthesis; diffusion; layer; coating; thermal autoignition; condensed gas phase; batch; boron; silicon.

REFERENCES

1. Merzhanov A. N. (1983) Samorasprostranyayushchyya visokotemperaturniy sintez. Pod. red. Ya. M. Kolotverkyna. M.: Khymyya, 6–45.
2. E. A. Levashov, A.S. Rohahev, V. Y. Yukhnyn Levashov (1999) Fyzyko-khymycheskiye y tekhnolohycheskiye osnovi samorasprostranyayushchehosya synteza. M.: Bynom, 1999, 176.
3. A. F. Yl'yushenko, A. V. Belyaev, T. D. Talako i dr. (2006) Samorasprostranyayushchyya visokotemperaturniy sintez poroshkov dlya hazotermichesko napilenyya. Tekhnolohyya remonta, vosstanovlenyya i uprochnenyya detaley mashyn, mekhanyzmov, oborudovanyya, instrumenta y tekhnolohycheskoy osnastki: materyali 8-y mezhd. praktych. konf.-vistavky: v 2 ch. Chast' 1. SPb.: Yzd-vo Polytekh. un-ta, 135–139.
4. E. A. Levashov, A. E. Kudryashov, O. V. (2000) Malochkyn Perspektivi prymerenyya splava STYM-3B modyfytsyrovannoho nanokrystallicheskykh poroshkom ZrO_2 , v tekhnolohyy elektroykrovoho lehyrovanyya. *Yzv. VUZov. Tsvetnaya metallurhyya*, 5, 68–72.
5. E. A. Levashov, A. E. Kudryashov, O. V. Malochkyn i dr. (2001) Ob osobennostyakh vlyanyya nanokrystallicheskykh poroshkov na protsessi horenyya y formyrovanyya sostavov. *Yzv. VUZov. Tsvetnaya metallurhyya*, 1, 53–59.
6. E.A. Levashov, A.E. Kudryashov, O.V. Malochkyn (2001) O vlyanyy nanokrystallicheskykh poroshkov na protsess formyrovanyya, strukturu i svoystva elektroykrovskh pokrytyy na osnove tytanokhromovoho karbyda. *Yzv. VUZov. Tsvetnaya metallurhyya*, 3, 44–51.
7. Kudryashov A. E. (2001) Razrabotka y promishlennoe prymerenye novikh kompozytsyonnykh materyalov y tekhnolohyy elektroykrovoho lehyrovanyya. Avtoref. dys. Candidate of Engineering Sciences. M., 19.
8. E. A. Levashov, A. E. Kudryashov, Yu. S. Pohochev i dr. (2003) Yssledovanye vlyanyya dobavky nanokrystallichesko poroshka oksyda tsyrkonyya razlychnoy pryrodi na sostav, strukturu y fyzyko-mekhanycheskiye svoystva tverdoh splava STYM-ZB. *Fyzyka metallov y metallovedenye*, 96, 2, 87–94.
9. E. A. Levashov, E. S. Myshyna, B. R. Setulyan i dr. (2003) Osobennosty vlyanyya nanokrystallicheskykh poroshkov na strukturu y svoystva splava Ti – 40 % XH70Yu, poluchennoho metodom SHS. *Fyzyka metallov y metallovedenye*, 96, 6, 58–64.
10. E. A. Levashov, A. E. Kudryashov, E. S. Myshyna i dr. (2004) Yssledovanye kynytyky formyrovanyya strukturi, sostava y svoystv elektroykrovnykh pokrytyy na tytanovom splave OT4-1 yz modyfytsyrovannikh elektrodnykh materyalov na osnove TiS-KhH70Yu. *Yzv. VUZov. Tsvetnaya metallurhyya*, 1, 68–76.
11. E. A. Levashov, A. E. Kudryashov, Yu. S. Pohochev i dr. (2004) Yssledovanye vlyanyya parametrov ymпульсник razryadov na massoperenos, strukturu, sostav y svoystva elektroykrovnykh pokrytyy na osnove TiS-NiAl, modyfytsyrovannikh nanodispersnykh komponentamy. *Yzv. VUZov. Tsvetnaya metallurhyya*, 6, 39–46.
12. Yu. S. Pohochev, E. A. Levashov, A. E. Kudryashov i dr. (2005) Osobennosty vlyanyya dobavok nanodispersnykh tuhoplavkykh chastyts na sostav, strukturu y fyzyko-mekhanycheskiye svoystva tverdoh SHS - splava STYM-40NA (systema TiS-NiAl). *Tsvetnie metalli*. 1, 59–64.

13. E. Y. Zamulaeva, E.A. Levashov, A.E. Kudryashov i dr. (2006) Uprochnenye detaley y ynstrumenta metodom elektroyskrovoho lehyrovanyya y pryomeneniyem novikh elektrodnykh materialov. Tekhnologiya remonta, vosstanovleniya y uprochneniya detaley mashyn, mekhanizmov, oborudovaniya, ynstrumenta y tekhnologicheskoy osnastky: materialy 8-y mezhd. prakt. konf.-vystavky: v 2 ch. Chast' 2. S-Pb.: Yzd-vo Polytekh. un-ta, 200–209.
14. A. T. Evtushenko, S. Pazare, S. S. (2007) Horbunov Samorasprostranyayushchyy syntez vysokotemperaturniy syntez ynstrumental'noy staly. *MYTOM*, 4, 43–46.
15. V. E. Arkhypov, H. V. Moskvityn, A. P. (2008) Polyakov Povisheniye stoykosti ynstrumenta metodom SHS. *STYN*, 1, 19–21.
16. V. E. Arkhypov, L. Y. Kuksenova, H. V. (2008) Moskvityn i dr. Pokrytiya na osnove khroma y bora, poluchenniy metodom SHS. *Uprochnyayushchye tekhnologiy y pokrytiya*, 4, 28–32.
17. L. M. Ribakova, L. Y. Kuksenova, S. V. Bosov (1973) Rentgenograficheskiy metod yssledovaniya strukturnykh yzmeneniy v tonkom poverkhnostnom sloe metalla pry trenny. *Zavodskaya laboratoriya*, 3, 293–296.
18. A. L. Borysova, Yu. S. Borysov (2008) Yspol'zovaniye protsessov samorasprostranyayushchehosya vysokotemperaturno synteza. *Poroshkovaya metallurhiya*, 1/2, 105–125.
19. S.Yu. Sharyvker, A.N. Merzhanov (2000) SVS-poroshky y ykh tekhnologicheskaya pererabotka. Chernoholovka, 123.
20. V. Y. Ystyn, Yu. S. (1989) Nayborodenko Visokotemperaturniy syntez yntermetallycheskykh soedyneniy : Monografyya. Tomsk : Yzd. THU, 214.
21. M. I. Pavechko, H. S. Ershchov, K. O. Lyenik ta in. (1999) Evtelktychni hradiyentni znosostiyki materialy. *Poroshkovaya metalurhiya*, 7/8, 17–21.
22. Merzhanov A. N. (2000) Tverdo-plamennoe horeniye. Chernoholovka : YSMAN, 244.
23. B. M. Vol'pe, V. V. Evstyhneev, Y. V. Mylyukov i dr. (1996) SHS dyspersnykh alyuminydov nykelya na ykh osnove *Fyzyka y khymyya obrab. materialov*, 1, 50–54.
24. B. M. Vol'pe, V. V. Evstyhneev, Y. V. Mylyukov i dr. (1995) SHS dyspersnykh materialov Ti-Al y zashchytniy pokrytiya na ykh osnove. *Fyzyka y khymyya obrab. materialov*, 2, 73–79.
25. Y. N. Horbatov, V. M. Shkyro, A. S. Terent'ev i dr. (1991) Yssledovaniye svoystv hazotermicheskykh pokryty y kompozitsionnykh poroshkov nykel'-karbyd tytana y khroma. *Fyzyka y khymyya obrab. materialov*, 4, 102–106.
26. T. A. Azarova, P. A. Vytyaz', B. A. Vylahe i dr. (2002) Osobennosti struktury y svoystv kompozitsionnykh materialov na osnove karbyda tytana s dobavkamy medy. *Poroshkovaya metallurhiya*, Mynsk, 25, 85–89.
27. A. F. Ylyushchenko, A. V. Belyaev, T. L. Talako i dr. (2000) SHS-poroshky dlya hazotermicheskykh pokryty, rabotayushchykh v uslovyakh kompleksnogo vozdeystviya korrozii y yznosa. *Poroshkovaya metallurhiya*. Mynsk, 23, 54–57.
28. Y. N. Horbatov, A. D. Panasyuk, L. K. Shvedova i dr. (1991) Hazotermicheskiye pokrytiya yz kompozitsionnykh poroshkov na osnove karbyda tytana-khroma. *Zashchytniy pokrytiya na metallakh*, 25, 22–25.
29. A. L. Borysova, L. Y. Adeeva, A.Yu. Tunyk i dr. (1999) Struktura y svoystva hazotermicheskykh pokryty na osnove karbyda tytana, oksydov tytana y khroma, sodержashchykh tverdie smazky. *Avtomat. svarka*, 1, 22–27.
30. A. P. Amosov, Y. P. Borovynskaya, A. N. (2007) Merzhanov Poroshkovaya tekhnologiya samorasprostranyayushchehosya vysokotemperaturno synteza materialov. M. : Mashynostroeniye-1, 567.
31. V. E. Arkhypov, L. Y. Kuksenova, H. V. Moskvityn i dr. (2008) Pokrytiya na osnove khroma y bora poluchenniy metodom SHS. *Uprochnyayushchye tekhnologiy y pokrytiya*, 25–30.
32. S. P. Hordyenko, T. M. Evtushok (2001) Vzaymodeystviye tytana s nytrydom bora v rezhyme samorasprostranyayushchehosya vysokotemperaturno synteza. *Poroshkovaya metallurhiya*, №1/2, 76–79.
33. Zozulya V.D. (1999) Pryntsypy sozdaniya pokryty na antyfyktsionnykh materialakh metodom SHS. *Yzv. vuz. tsvet. metal.*, 5, 58–63.
34. International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis, Alletron Press, Inc. 150, Fifth Avenue, New York, 10011, USA, 68.
35. Zozulya V. D. (1994) Pryntsypy sozdaniya novikh trybolohicheskyykh SHS-materialov. *Trenye y yznos*, 15, № 3, 422–428.
36. V. Y. Ystyn, Yu. S. Nayborodenko (1989) Visokotemperaturniy syntez yntermetallycheskykh soedyneniy : Monografyya. Tomsk : Yzd. THU, 214.