

УДК 621.785.5: 621.793.6

**Середа Б.П., д.т.н., професор, Палехова И.В., аспірант**  
Днепропетровский государственный технический университет

### **ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЛЕГИРОВАННЫХ ТИТАНОВЫХ ПОКРЫТИЙ НА КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЯХ В НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ**

*В работе рассмотрены методы нанесения на конструкционные стали титановых покрытий, легированных бором и медью. Представлена технология формирования защитных слоев в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Исследовано влияние составов и дисперсности реакционных шихт на температурные и кинетические характеристики процесса формирования покрытий в режиме теплового самовоспламенения. Рекомендованы оптимальные составы насыщающих смесей для упрочнения углеродистых сталей износостойкими покрытиями. Проведены исследования износостойкости полученных слоев, на углеродистых сталях.*

**Ключевые слова:** самораспространяющийся высокотемпературный синтез, газотранспортная технология, газотранспортные химические реакции, тепловое самовоспламенение, диффузионное насыщение, микротвердость, износостойкость.

**Постановка проблемы.** Для поверхностного упрочнения изделий из конструкционных и легированных сталей, работающих в сложных условиях эксплуатации, широко применяют различные способы методы модифицирования поверхности. Способы получения защитных покрытий на металлических изделиях различаются технологией нанесения покрытия и основной целью их создания является хорошая адгезия с подложкой, а также получение сплошного, беспористого и стойкого в данной среде защитного слоя. По типу соединения защитного слоя с подложкой различают адгезионные и диффузионные металлические покрытия.

Одним из наиболее широко распространенных методов поверхностного упрочнения сталей является химико-термическая обработка (ХТО), которая заключается в одновременном воздействии на поверхности температурных градиентов и веществ, химически реагирующих с металлом изделия [1].

Среди таких процессов важное место занимают технологии насыщения поверхностного слоя сталей бором.

Покрытия боридного типа имеют высокие физико-механические характеристики. Микротвердость слоев достигает 20000-30000 МПа и эти значения микротвердости могут сохраняться до температур 600-700°C, что важно для повышения износостойкости изделий, работающих при высоких температурах. При борировании на поверхности стальных изделий возможно получить достаточно протяженные слои, однако из-за различных коэффициентов температурного расширения слоя и основы, они характеризуются низкой адгезией к подложке и высокой хрупкостью [2].

Большинство из известных процессов борирования длительны (4-12 часов), трудоемки, материало- и энергозатратны [3-10], что приводит к повышению себестоимости изделий.

Кроме того, длительная высокотемпературная изотермическая выдержка может привести к перегреву стальных изделий, что значительно ухудшает структуру и механические свойства деталей. Поэтому интенсификация процессов борирования, а также получение покрытий боридного типа, устойчивых к скалыванию и получение у них заданных свойств является в настоящее время актуальной задачей. Одним из решений этой задачи может оказаться нанесение комплексных многокомпонентных покрытий в условиях самораспространяющегося высоко температурного синтеза (СВС). Технология формирования износостойких покрытий в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в значительной степени лишена указанных недостатков и позволяет получать покрытия при ограниченном или минимальном времени их формирования.

СВС - высокоинтенсивное экзотермическое взаимодействие химических элементов в конденсированной фазе, способное к самопроизвольному распространению в виде волны горения [11-14]. Эффективность обработки определяется временными параметрами процесса и

теплофизическими характеристиками СВС-смесей. Поэтому представляет интерес поиск механизма воздействия на протекание процессов теплового воспламенения.

**Цель работы.** Целью данной работы являлось теоретическое и экспериментальное исследование физико-химических процессов, лежащих в основе получения комплексных титано-боридных покрытий на конструкционных сталях в режиме теплового самовоспламенения с применением принципа газотранспортных химических реакций [15], поиск оптимальных порошковых СВС-шихт, позволяющих формировать многокомпонентные защитные слои на сталях, изучение влияния природы насыщающих реагентов, состава реакционных смесей, химического состава сталей и параметров процесса насыщения (времени, температуры) на состав, структуру и свойства титано-боридных покрытий, полученных методом СВС. Изучение влияния добавок-катализаторов на теплофизические свойства СВС-смесей и протекание процесса диффузионного насыщения в нестационарных температурных условиях. Сравнительный анализ технологических параметров СВС-процесса, структуры, фазового, химического состава и свойств покрытий, полученных в СВС-смесях без добавок металлов-активаторов и с ними, а также исследования износостойкости слоев в условиях трения скольжения.

**Материалы и методика исследования.** Объектом исследования были образцы из сталей массового назначения (сталь 20, сталь 45, У8).

В качестве реакционных агентов использовали порошки дисперсностью 100-350 мкм

1.  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  — оксид хрома (III) - источник хрома в покрытии.

2.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  — оксид алюминия (III) - инертная добавка.

3. Al — алюминий марки АСД1- восстановитель оксидов

4. В — бор технический - источник бора в покрытии

5.  $\text{B}_4\text{C}$  - карбида бора - источник бора в покрытии

6  $\text{MgB}_{12}$  - источник бора в покрытии

7. Ti — титан технической чистоты - источник титана в покрытии.

8.  $\text{J}_2$ — йод металлический - активатор процесса насыщения.

9.  $\text{NH}_4\text{Cl}$  — хлористый аммоний - активатор процесса насыщения.

10. Cu - медь технической чистоты

Химико-термическую обработку осуществляли в реакторе открытого типа ( $P=10^5$  Па) в рабочем интервале температур 850-1100 °С. Продолжительность изотермической выдержки варьировалась от 30 до 60 минут.

Подготовка поверхности образцов состояла в последовательных шлифовке, полировке и обезжиривания в ацетоне. Иницирование процесса теплового самовоспламенения осуществлялось путем предварительного нагрева в печи сопротивления до температуры начала экзотермической реакции ( $t_*$ ). Температуру СВС-смесей контролировали хромель-алюмелевыми и вольфрам-ренийевыми термопарами в защитном чехле, помещенными в объем реакционной шихты, и подключенными к потенциометру серии КСП. Толщину упрочненных слоев покрытий исследовали на световом микроскопе "Neophot-21" при увеличении до  $\times 250$ ,  $\times 500$ . 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 [16,19]. Для анализа фазового состава покрытий использовали рентгеновский дифрактометр ДРОН-3М. Исследование элементного состава покрытий проводили методом микрорентгеноспектрального анализа с применением микроанализатора JEOL "Superprob-733". Испытания на износостойкость проводились при трении о нежестко закрепленные частицы (ГОСТ 23.208-79) на установке СМТ-1. Для создания абразивно-масляной среды в масляную ванну машины трения добавляли абразивный материал, приготовленный из кварцевого песка (ГОСТ 2138-84). Для расчета равновесного состава продуктов системы были использованы прикладные пакеты программ "АСТРА.4", TERRA и REcalc [17]. При разработке составов порошковых реакционных СВС-смесей, обеспечивающих высокую износостойкость, использовали методы математического планирования эксперимента с реализацией полного факторного анализа по плану  $2^3$  и дробного факторного эксперимента  $2^{4-1}$ .

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 частности износостойкость,  $\Delta G$  (испытание на машине трения СМТ-1,  $\tau_{исп.} - 5$  ч) [10,18].

В качестве независимых переменных были выбраны: содержание в СВС-смеси хромистой составляющей, титана, бора и алюминия. В качестве исходного материала была выбрана сталь 45. Активатором процесса являются  $J_2$  и  $NH_4Cl$  для всех систем.

Расчетные уровни интервалов варьирования, характер их изменений и схемы кодирования представлены в таблицах 1 и 2. Введение в смесь больше 5% газотранспортного агента приводит к сильному растравливанию поверхности образца, менее 1% не активизирует протекание всех газотранспортных реакций.

Для получения стопроцентного состава порошковых СВС-смесей в качестве конечного продукта использовался  $Al_2O_3$ .

Таблица 1

Исследуемые факторы для системы титан-бор

Характеристика	Факторы		
	В составе В %, мас.	В составе ХС %, мас.	В составе Тi %, мас.
Код	$X_1$	$X_2$	$X_3$
Основной уровень	10	20	20
Интервал варьирования	5	5	5
Нижний уровень	5	15	15
Верхний уровень	15	25	25

Таблица 2

Исследуемые факторы для системы титан-бор-медь

Характеристика	Факторы			
	В составе В %, мас.	В составе Тi %, мас.	В составе Cu %, мас.	В составе ХС %, мас.
Код	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
Основной уровень	10	20	8	20
Интервал варьирования	5	5	3	5
Нижний уровень	5	15	5	15
Верхний уровень	15	25	11	25

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 износостойкости защитных покрытий от режима теплового самовоспламенения и содержания легирующих элементов.

Численные значения коэффициентов регрессии и их значимость, определенные с учетом различия дисперсий для каждой функции отклика, а также проверка значимости по критерию Стьюдента и оценка адекватности модели по критерию Фишера.

Для оценки адекватности уравнений был проведен расчет по полученным уравнениям регрессии для оптимального режима теплового самовоспламенения. Результаты расчетов были сопоставлены с экспериментальными исследованиями.

**Результаты исследований и их обсуждение.** С точки зрения теплофизики формирование покрытий в режиме теплового самовоспламенения условно можно разделить на пять последовательных стадий: инертный прогрев реакционной смеси до температуры воспламенения, теплое самовоспламенение, прогрев изделий, изотермическая выдержка, охлаждение.

Продолжительность стадий и какие именно процессы будут протекать на каждой стадии в значительной степени зависят от составов реакционных смесей и их тепловых характеристик. Таким образом, регулируя в реакционных СВС-смесях концентрацию активных экзотермических составляющих и газотранспортных агентов, можно значительно снизить

температуру начала самовоспламенения ( $t_*$ ) и увеличить температуру максимального разогрева ( $t_m$ ).

Экспериментально было установлено, что при нанесении покрытий системы Ti-B максимальное содержание в СВС-шихте газотранспортных агентов не должно превышать: для  $\text{NH}_4\text{Cl}$  – 5%, а для  $\text{I}_2$  – 4%.

Продолжительность первой стадии в значительной степени зависит от состава смеси и ее тепловых характеристик. Поэтому введение в состав реакционных смесей веществ, обладающих высокими показателями теплопроводности позволяет интенсифицировать процесс самовоспламенения, а именно снизить температуру начала воспламенения  $t_*$  на 50-100 °C (при введении дополнительно 5-8% Cu) и значительно увеличить скорость прогрева шихты с 0,86 °C/c до 4,16 °C/c по сравнению с СВС-смесями без добавок медного катализатора.

Аналогичным образом влияет на основные характеристики процесса теплового самовоспламенения ( $t_*$  и  $t_m$ ) увеличение в шихте концентрации активной экзотермической составляющей  $\text{Cr}_2\text{O}_3+\text{Al}$  и газотранспортного агента  $\text{I}_2$ .

На стадии инертного прогрева происходит испарение и распад используемых газотранспортных носителей по реакциям:



На данной стадии диффузионный слой не формируется ни в смесях, содержащих  $\text{B}_4\text{C}$  и Ti, ни в смесях с содержанием  $\text{MgB}_{12}$  и Ti.

Вторая стадия (теплового самовоспламенения) характеризуется протеканием основных экзотермических реакций:



В смесях, содержащих  $\text{MgB}_{12}$  возможно протекание конкурирующей экзотермической реакции по реакции (5), однако ее экзотермический эффект в используемом для насыщения интервале концентраций достаточно слабо выражен.



Температура в реакторе резко повышается до максимальной температуры процесса  $t_m$ . Происходит образование газообразных соединений и перенос основных насыщающих элементов к подложке. Для осуществления химического транспорта необходимо наличие градиента температур между насыщающими элементами и подложкой.



Где M – наносимый элемент, Gn – галоген, MGm – летучий галогенид.

При этом необходимо, чтобы транспортируемый элемент и подложка находились в разных температурных зонах.

Термодинамический анализ равновесного состава продуктов системы свидетельствует о присутствии в исследуемом диапазоне температур хлоридов или йодидов (в зависимости от выбранного газотранспортного агента) алюминия, хрома титана, бора с образованием летучих галогенидов. Если энергия активации взаимодействия элементов шихты с носителем меньше, чем энергия активации основного восстановительного процесса, то реакции образования летучих галогенидов будут протекать квазистационарно по мере протекания основной реакции. Если температура самовоспламенения ниже температуры начала интенсивного образования летучего галогенида, то для этого случая образование галогенидов происходит лишь на стадии нестационарного роста температуры. На поверхности внесенных в порошковую систему стальных изделий на этой стадии возможно протекание гетерогенных реакций обмена с железом подложки.

Присутствие в газовой фазе как I, так и  $\text{I}_2$  свидетельствует о протекании в исследуемом диапазоне температур следующих химических транспортных реакций:





Термодинамически более вероятны реакции взаимодействия элементов системы с йодом в атомарном состоянии.

Также на стадии теплового самовоспламенения для СВС-составов, содержащих добавки порошка меди, при достижении максимальных температур, возможен жидкостный механизм транспорта насыщающих элементов в диффузионную зону (титан и алюминий растворяются в меди и переносятся к подложке).

Экспериментально установлено, что максимальная концентрация порошка меди в СВС-шихте не должна превышать 7-8%, так как ее рост приводит к резкому увеличению максимальной температуры воспламенения  $t_m$ , что приведет к перегреву металла основы и снижению ее физико-механических свойств, а также к спеканию шихты и, следовательно, уменьшению ее газопроницаемости для составляющих газовой фазы.

На поверхности внесенных в порошковую систему стальных изделий на этой стадии возможно протекание гетерогенных реакций обмена с железом подложки.

На 3 стадии (прогрева изделий) происходит выравнивание температуры по объему реактора. Температура процесса снижается до расчетной температуры насыщения. Начинается формирование покрытия. При этом активные атомы титана, бора, хрома и алюминия диффундируют в металлическую подложку образуя твердый раствор этих элементов в железе, также возможно образование легированных боридных фаз.

На 4 стадии (изотермической выдержки) происходит формирование постоянного диффузионного потока активных атомов насыщающих элементов. Наблюдается диффузионный рост покрытия. Увеличение продолжительности изотермической выдержки приводит к росту толщины слоя, который подчиняется параболическому закону. На этой стадии протекают процессы, аналогичные насыщению в стационарных условиях.

На 5 стадии (охлаждения) формирование диффузионных слоев происходит менее интенсивно, это объясняется уменьшением коэффициентов диффузии насыщающих элементов. Максимальная скорость роста покрытий наблюдается на начальных этапах СВС-процесса. Это связано с тем, что аустенит, образующийся при резком повышении температуры на стадии теплового самовоспламенения характеризуется высокой плотностью дислокаций по краям зерен и разветвленностью межзеренных границ [21-22]. В связи с этим его диффузионная восприимчивость увеличивается.

На толщину формируемых покрытий влияют состав шихты, продолжительность и температура изотермической выдержки. Фазовый состав зон в значительной степени зависит от особенностей диффузионного механизма легирующих элементов и химического состава подложки.

Размер зерен покрытия зависит от скорости охлаждения.

Регулируя температурные условия процесса, можно управлять как скоростью роста слоев, так и их структурой.

Установлено, что при одновременном способе обработки, основным фактором, влияющим на толщину покрытия, является концентрация легирующих элементов в реакционной смеси.

С увеличением концентрации углерода в подложке, толщина покрытия уменьшается.

Фазовый состав зон в значительной степени зависит от особенностей диффузионного механизма легирующих элементов и химического состава подложки.

По результатам металлографического и рентгеноструктурного анализов установлено, что при совместном насыщении сталей титаном и бором диффузионный механизм формирования покрытия имеет некоторые особенности: захват активных атомов бора и титана поверхностью металла происходит в разных местах и конкуренции между ними нет [20]. Скорость диффузии титана в сталях ускоряется вследствие встречной диффузии углерода с образованием карбидов и карбоборидов различного состава. Этот процесс повышает твердость подборидной зоны.

В местах совместной диффузии бора и титана преобладает диффузионный механизм образования покрытия. Диффундирующие элементы образуют фазы внедрения или замещения с образованием на углеродистых сталях легированные титаном, хромом и алюминием карбидные, боридные и карбоборидные фазы. Диффундирующий титан замещает железо в карбидах и карбоборидах железа, повышая их устойчивость.

В поверхностном слое образцов из углеродистых сталей образуются соединения титана с бором, представляющие собой продукт СВС-взаимодействия. Полученные титано-боридные покрытия характеризуются игольчатым строением, однако при совместном насыщении с титаном, игольчатая структура менее выражена, иглы имеют более округлую форму, карбидные образования приобретают глобулярную форму, таким образом повышая пластичность покрытия, вследствие чего снижается величина разрушающих напряжений.

Образовавшиеся покрытия имеют многофазное строение и состоит из  $TiB_2$ , легированных соединений  $(Fe, Cr, Al)B$ ,  $(Fe, Cr, Al)_2B$ ,  $(Fe, Cr, Al)Ti_2$  и переходной зоны твердого раствора  $B$ ,  $Ti$ ,  $Cr$ ,  $Al$  в железе.

При исследовании диффузионных слоев на приборе ПМТ-3 установлено, что микротвердость соединений бора с титаном на поверхности технического железа и сталей составляет  $30000 \div 32000$  МПа. Микротвердость легированных боридных фаз колеблется в пределах  $14000 \div 16000$  МПа, а микротвердость переходной зоны не превышает 4500 МПа.

Результаты испытания стальных образцов на износ в условиях трения скольжения на машине трения СМТ-1 представлены на рис. 1.

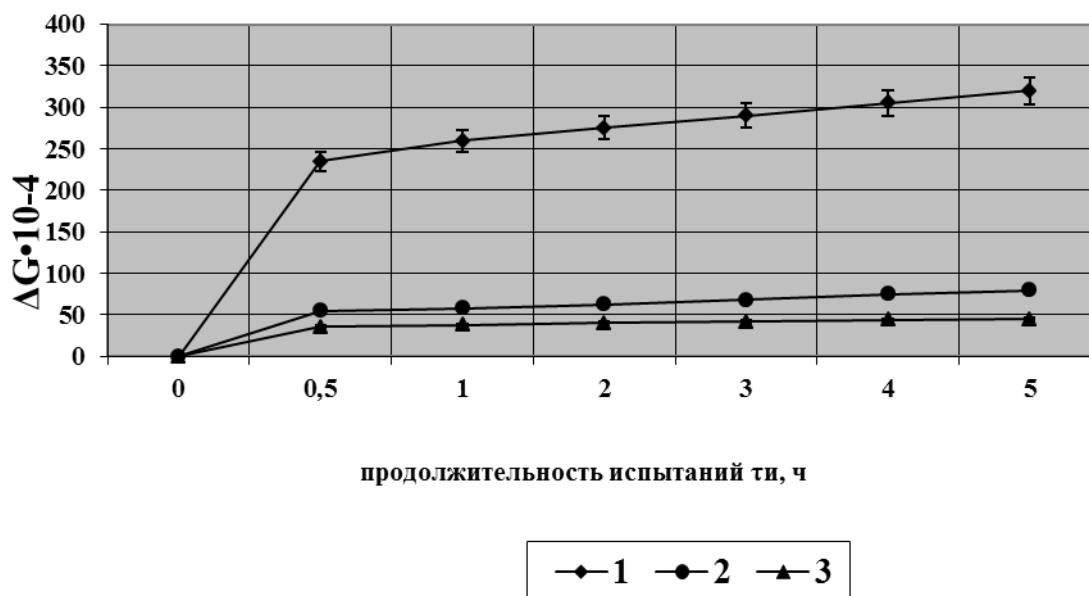


Рис. 1. Зависимость износостойкости различных пар трения от продолжительности испытания на машине СМТ-1 и вида покрытия на стали 45 в присутствии абразивно-масляной прослойки

1 – контрольный образец сталь 45 без покрытия.

2 – образец с титаноборированным покрытие на стали 45, полученным способом ХТО при изотермической выдержке 4 часа.

3 – образец с титаноборированным покрытие на стали 45, полученным методом СВС при продолжительности изотермической выдержки 60 мин.

Графики свидетельствуют о значительном увеличении износостойкости обработанных образцов. Сравнивались образцы с покрытиями, нанесенными методом СВС (продолжительность насыщения 60 мин.) и химико-термической обработки в изотермических условиях (продолжительность обработки 4 часа). Толщина покрытий в обоих случаях примерно одинакова. В качестве контрольного образца использовался образец из стали 45 без покрытия.

В результате испытаний установлено повышение износостойкости СВС покрытий по сравнению с диффузионным аналогом на 45-50%, что связано с присутствием в покрытии

сложнолегированных фаз и объясняется особенностями СВС-процесса. По сравнению с контрольным образцом наблюдается повышение износостойкости в 7-8 раз.

#### **Выводы:**

1. Метод СВС позволяет получать на углеродистых сталях качественные покрытия на основе титана при снижении материальных и энергетических затрат.
2. Проведено моделирование по поиску оптимальных порошковых СВС-смесей для получения износостойких защитных титановых покрытий на сталях 45 и У8 с использованием технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Исследованы структуры защитных слоев и их износостойкость в условиях трения скольжения.
3. Титаноборированные стали с СВС-покрытиями обладают улучшенными показателями износостойкости (в 7,0-8,0 раз) по сравнению с образцами без покрытия.

#### **Список литературы**

1. Трефилова Н. В. Анализ современных методов нанесения защитных покрытий// Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 10. – С. 67-67
2. Ворошнин Л. Г., Ляхович Л. С. Борирование стали. – М.: Металлургия, 1978 – 239 с.
3. Ворошнин Л. Г. Борирование промышленных сталей и чугунов.- Минск, 1981 – 237 с.
4. Лахтин Ю. М. Металловедение и термическая обработка металлов. / Ю.М. Лахтин // – М.: Металлургия, 1993. – 448 с.
5. Химико-термическая обработка металлов и сплавов: Справочник / под ред. Ляховича Л.С.- М.: Металлургия, 1981.- 424 с.
6. Лахтин Ю. М., Арзамасов Б. Н. Химико-термическая обработка металлов. Учебное пособие для вузов. - М.: Металлургия, 1985. - 256 с.
7. Филоненко Б. А. Комплексные диффузионные покрытия. М.: Машиностроение. 1981 – 137 с.
8. Лабунец В. Ф., Ворошнин Л. Г., Киндрачук М. Ф. Износостойкость боридных покрытий.- Киев: Изд. «Техніка», 1989, 204 с.
9. Шатинский В. Ф., Нестеренко А. И. Защитные диффузионные покрытия.– Киев: Наукова думка, 1988 – 272 с.
10. Лахтин Ю. М. Поверхностное упрочнение сталей и сплавов / МиТОМ, 1988, №11, с. 11-14
11. Мержанов А. Г. Процессы горения и синтез материалов.- Черноголовка: ИСМАН, 1998.- 512 с.
12. Grigor'ev Y. M., Merzhanov A.G. SHS coatings / Int. J. of SHS, 1992, v.1, №4.- p. 600-639
13. Коган Я. Д., Середа Б. П., Штессель Э. А. Высокоинтенсивный способ получения покрытий в условиях СВС / Металловедение и термическая обработка металлов, 1991, №6.- с.39-40
14. Середа Б. П. Современное состояние и перспективы развития технологий нанесения защитных покрытий в условиях СВС / Б. П. Середа, И. В. Кругляк, В. И. Иванов // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. – 2004. – №1. – С. 88-93.
15. Шефер Г. Химические транспортные реакции.- М.: Мир, 1964.- 189 с.
16. Беккерт М., Клемм Х. Справочник по металлографическому травлению.- М.: Металлургия, 1979.- 336 с.
17. Синярев Г. Б., Ватолин Н. А., Трусов Б. Г., Моисеев Р. К. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов.- М.: Наука, 1982. – 263с.
18. Середа Б. П., Иванов В. И., Грицай В. П., Усенко Ю. И. Получение борированных покрытий в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / Изв. ВУЗов. Черная Металлургия, 1998, №9, с. 57-61
19. Бялік О. М., Кондратьюк С. Є., Киндрачук М. В., Черненко В. С. Структурний аналіз металів. Металографія. Фрактографія: Підручник. – К.:ВПВ ВПК «Політехніка», 2006. – 328с.
20. Гурьев А. М., Иванов С. Г. Механизм диффузии бора, хрома и титана при одновременном многокомпонентном поверхностном легировании железоуглеродистых сплавов / Упрочняющие технологии и покрытия, 2011, №1, с. 56-61
21. 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.

22. 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

**Б.П.Середа, д.т.н., професор, І.В. Палехова, аспірант**  
Дніпровський державний технічний університет

### **ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ І ВЛАСТИВОСТЕЙ ЛЕГОВАНИХ ТИТАНОВИХ ПОКРИТТІВ НА КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЯХ ПРИ НЕСТАЦІОНАРНИХ ТЕМПЕРАТУРНИХ УМОВАХ**

*В роботі розглянуті методи нанесення на конструкційні сталі титанових покриттів, легованих бором і міддю. Представлена технологія формування захисних шарів в умовах саморозповсюджувального високотемпературного синтезу. Досліджено вплив складів і дисперсності реакційних шихт на температурні і кінетичні характеристики процесу формування покриттів в режимі теплового самозаймання. Рекомендовані оптимальні склади насичуючих сумішей для зміцнення вуглецевих сталей зносостійкими покриттями. Проведено дослідження зносостійкості отриманих покриттів, на вуглецевих сталях.*

**Ключові слова:** високотемпературний синтез, газотранспортна технологія, газотранспортні хімічні реакції, теплове самозаймання, дифузійне насичення, мікротвердість, зносостійкість.

**B.P. Sereda, doctor of technical sciences, professor, I.V.Paleshova, postgraduate**  
Dniprovsky State Technical University

### **FORMATION OF STRUCTURE AND PROPERTIES OF DOPED TITANIUM COATINGS ON CONSTRUCTION STEELS IN NONSTATIONARY TEMPERATURE CONDITIONS**

*The paper discusses the methods of deposition of titanium coatings alloyed with boron and copper on structural steels. The technology of the formation of protective layers under conditions of self-propagating high-temperature synthesis is presented. The influence of the composition and dispersion of the reaction mixtures on the temperature and kinetic characteristics of the process of the formation of coatings in the thermal self-ignition mode was investigated. The optimal compositions of saturating mixtures for hardening carbon steels with wear-resistant coatings are recommended. Studies of the wear resistance of the layers obtained on carbon steels were carried out.*

**Keywords:** self-propagating high-temperature synthesis, gas transmission technology, gas transport chemical reactions, thermal self-ignition, diffusion saturation, microhardness, wear resistance.

Стаття надійшла до редакції 14.11.2018