

УДК: 621.793.6

**Бейгул О.А., д.т.н., Серета Д.Б., аспірант, Кругляк И.В., к.т.н., Шиллер А.Г., магістр, Токаев В.Н., магістр, Чернета О.А., к.т.н.**

Днепропетровский государственный технический университет

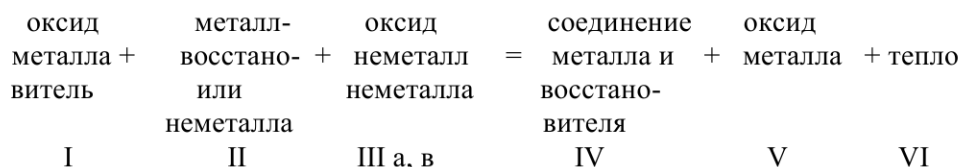
### ПОЛУЧЕНИЕ ЗАЩИТНЫХ ЖАРСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБИЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

*В работе представлены результаты исследований процесса силицирования с использованием явления самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в режиме теплового самовоспламенения. Изучено влияние состава реакционной шихты на тепловые характеристики процесса и толщину покрытия. Проведенные исследования показывают, что СВС технология получения хромоалюмосилицированных слоев позволяет получать качественные защитные покрытия при ограниченном времени их формирования.*

**Ключевые слова:** износостойкость, синтез, жаростойкость, сталь.

Использование самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) для формирования силицированных покрытий основано на применении порошковых экзотермических смесей. СВС – процесс представляет собой высокоинтенсивное экзотермическое взаимодействие химических элементов в конденсированной фазе, способное к самопроизвольному распространению в виде волны горения. Подбор СВС – систем основан на принципах технологического горения. Основной признак – образование полезного продукта в результате экзотермической реакции, причем величина теплового эффекта представляет интерес лишь в той мере, в какой способна обеспечить сам процесс горения. Такой подход привлекает к рассмотрению большое количество разнообразных горючих систем и химических реакций. Тем не менее, наибольшее распространение получили реакции синтеза – как основная (или единственная) химическая стадия процесса [1].

Среди СВС – процессов с участием химических соединений в качестве реагентов, наиболее значительный класс (имеющий наиболее крупные технологические приложения) составляют так называемые реакции СВС с восстановительной стадией. Две схемы получили распространение: оксидная и оксидно-элементная [2, 3].



Спектр веществ, используемых в качестве I и III, велик, в качестве II в процессах горения используют, главным образом, алюминий и магний. Варианты I + II + и II + III а представляют собой классические металотермические реакции и хорошо известны из практики горения термитов.

Развитие СВС как направления исследований, связанного с синтезом материалов, дополнило арсенал химии горения новыми для нее неорганическими реакция, ассортимент которых непрерывно расширяется. Основным интерес в настоящее время представляют реакции в многокомпонентных системах, проводимые с целью получения сложных однофазных соединений или гетерогенных материалов с заданным соотношением фазовых составляющих.

Большую помощь в поисках реакций технологического горения оказывают термодинамические расчеты, позволяющие по известным термодинамическим свойствам веществ заранее вычислить адиабатическую температуру и равновесный состав продуктов горения. На основании этих данных оценивается, насколько целесообразны попытки реализовать в режиме горения химическое взаимодействие в тех или иных системах.

Для правильного выбора условий синтеза полезны результаты исследований кинетики реакций СВС, определения кинетических констант, энергий активации.

В работе рассмотрен процесс получения хромоалюмосилицированных покрытий в режиме теплового самовоспламенения.

Исследования проводили на образцах технически чистого железа, стали 45, стали 20 и У8А.

Покрытие наносили в экзотермических порошковых смесях, состоящих из  $Cr_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ , Si, Al. В качестве газотранспортного агента (ГТА) использовали кристаллический йод ( $J_2$ ) и хлористый аммоний ( $NH_4Cl$ ). Для проведения совместного насыщения поверхности хромом, алюминием и кремнием, содержание кристаллического кремния выбиралось в пределах до 7%

## ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

масс., а кремнистой составляющей до 20%. Концентрация ГТА в шихте составляла 1 и 2% масс., соответственно.

Нанесение защитных слоев осуществлялось на опытно - промышленной установке, включающей следующие функциональные системы: реакционное оборудование, систему газообеспечения и систему контроля и регулирования технологических параметров.

Процесс формирования покрытий условно можно разделить на следующие стадии:

I – инертный прогрев реакционной смеси до температуры воспламенения;

II – стадия теплового самовоспламенения (происходит взаимодействие  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и Al). Температура в реакторе повышается до максимальной, образуются газообразные соединения, а диффундирующие элементы транспортируются к поверхности подложки;

III – стадия прогрева изделия. Температура реакционной смеси снижается до температуры изотермической выдержки, насыщающие элементы диффундируют в подложку;

IV – изотермическая выдержка, в процессе которой происходит диффузионный рост покрытия;

V – стадия охлаждения. Формирования силицированного слоя происходит с меньшей интенсивностью за счет уменьшения коэффициента диффузии кремния при снижении температуры.

Характерный вид температурной кривой приведен на рис.1.

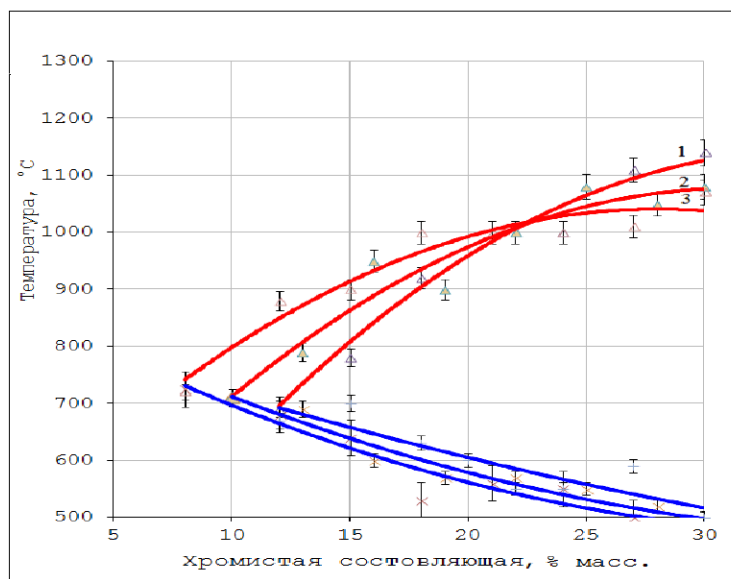


Рис. 1 – Характерный вид температурной кривой. Зависимость температуры воспламенения и максимальной температуры от весового содержания активной составляющей ( $\text{Cr}_2\text{O}_3+2\text{Al}$ ) для состава  $\text{XC} + \text{Al} + \text{Si} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{I}_2 + \text{NH}_4\text{Cl}$ . 1 – 5% масс содержание Si; 2 – 7% масс; 3 – 9% масс; \* – температура воспламенения; Δ – максимальная температура.

Общий подъем температуры процесса при использовании кремнистой составляющей выше, что говорит о более высоких тепловых характеристиках смеси. Изменение глубины слоя в зависимости от температуры и времени насыщения отклоняется от экспоненциального и параболических законов, характерных для чисто диффузионной кинетики. Это вероятно связано с тем, что при повышении температуры изменяется абсолютное значение концентраций и соотношение между количеством диффузионных атомов хрома, алюминия и кремния, что в свою очередь приводит к изменению предельных концентраций, вызывающих фазовую перекристаллизацию, а также к изменению скорости диффузии каждого из элементов. Микроструктура хромоалюмосилицированных слоев приведена на рис. 2.

На поверхности технического железа и стали 20 образуется слой упорядоченного твердого раствора  $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{Al})_3\text{Si}$ . Ниже расположен  $\alpha$ - твердый хрома, алюминия и кремния в железе. Под слоем расположена тонкая перлитная прослойка. На стали 45 и У8А формируется слой состоящий из твердого раствора хрома, алюминия и кремния в  $\alpha$ -железе с включениями карбидов. Под слоем расположена обезуглероженная зона.

Наружная зона обогащена алюминием, кремнием и хромом. На основании данных о распределении элементов можно высказать предположение об особенностях кинетики формирования силицированных слоев, легированных хромом и алюминием. Известно, что кремний повышает термодинамическую активность углерода, поэтому при насыщении кремнием углерод вытесняется с поверхностных слоев в более глубокие.

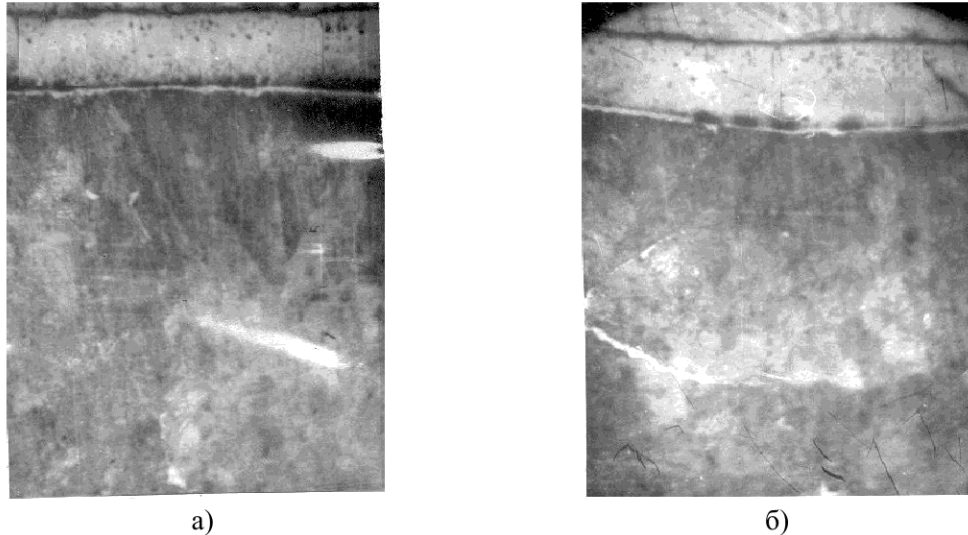


Рис. 2 – Изменение толщины слоя и его пористости на стали У8 в зависимости от содержания кремния (x 250): а) 15% Si; б) 9% Si. Режим обработки:  $t_n = 1100^{\circ}\text{C}$ ;  $\tau_b = 30$  мин.

Хром понижает термодинамическую активность углерода, поэтому при хромировании углерод сильно обогащает поверхность стали за счет обеднения приповерхностных слоев. Коэффициент диффузии кремния в сталь выше, чем хрома, поэтому кремний оттесняет углерод вглубь стали и способствует перестройке решетки из  $\alpha \rightarrow \gamma$ , тем самым облегчая проникновение хрома в сталь.

Одновременно с этим, кремний оттесняется вглубь образца хромом, так как хром повышает термодинамическую активность кремния.

Алюминий, диффундируя в сталь, при более низких температурах по сравнению с хромом, оттесняет углерод от поверхности и способствует перестройке кристаллической решетки железа из  $\gamma \rightarrow \alpha$ , облегчая таким образом последующую диффузию хрома.

Углерод, мигрируя навстречу карбидообразующему элементу хрома, через легированный кремний феррит образует химическое соединение хрома  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ,  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ .

Исследование физико-механических свойств защитных покрытий показали, что микротвердость силицированных слоев, легированных алюминием и хромом на техническом железе и стали 20 находится в пределах 7100-8200 МПа, на стали 45 и У8А микротвердость достигает 15000-16800 МПа.

Испытания на износостойкость проводили на машине трения СМТ-1, время испытания 5 часов, при скорости вращения 500 об/мин. (ролика) нагрузка на испытуемый образец составляла  $P = 500$  Н. Силицированные слои, легированные хромом имеют износостойкость в 2,8-3 раза, чем образцы без покрытия.

Жаростойкость образцов повысилась в 2,5 – 3 раза за счет того, что на поверхности образуются защитные пленки окислов  $(\text{Cr}, \text{Fe})_2\text{O}_3$ ,  $(\text{Al}, \text{Fe})_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ . Результаты испытания при температуре нагрева  $800^{\circ}\text{C}$  и длительности 20 часов для различных покрытий, полученных в условиях СВС приведены на рис. 3.

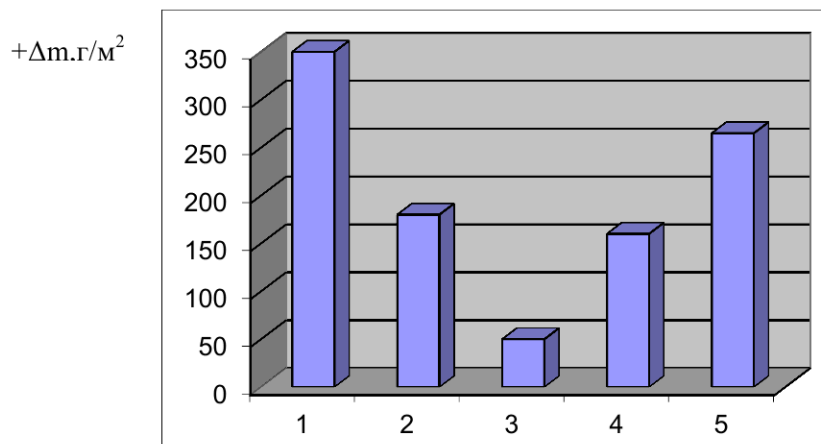


Рис. 3 – Сравнительная жаростойкость слоев на стали 45, полученных в режиме теплового самовоспламенения.  $T_n = 1100^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau_b = 60$  мин. 1) без покрытия, 2) V, легированный Si, Al, Cr; 3) Cr-Al -Si; 4) Ti - Si; 5) W - Si

## ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

Покрyття наносились на деталі кривошипно-шатунного механiзму, и газораспределительного механiзму автомобилей ГАЗ – 322132, БОГДАН А092 (городской). Проведенные исследования показывают, что СВС технология получения хромоалюмосилицированных покрытий позволяет получать качественные защитные покрытия при ограниченном времени их формирования.

### Інформаційні джерела

1. Мержанов А.Г. Процессы горения и синтез материалов /Под ред. В.Т.Телепы, А.В.Хачояна. Черногoловка: ИСМАН, 1998. 512с.
2. Мержанов А.Г., Юхвид В.И., Боровинская И.П. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез литых тугоплавких неорганических соединений. Докл. АН СССР, 1980, т.255, №1, с.120-124
3. Merzhanov A.G., Yukhvid V.I. The self-propagating high-temperature synthesis in the field centrifugal forces. In:Proc. Of the First US-Japan. Workshop on Combust. Synth., Jan.11-12, 1990. Tokyo: Nat. Res. Inst. Metals Publ., 1990, p.1-21.
4. Коган Я.Д., Середя Б.П., Штессель Э.А. Высокоинтенсивный способ получения покрытий в условиях СВС//Металловедение и термическая обработка металлов. – 1991.-№6.-с.39-40
5. Середя Б.П., Скачков В.О., Иванов В.И., Усенко Ю.И. Хромирование сталей методом газотранспортных СВС - реакций //Металознаство та обробка металів.-1999.-№ 4. с.25-27
6. Середя Б.П., Кругляк И.В. Моделирование процессов хромирования и силицирования в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза //Металловедение и термическая обработка металлов –2002, № 4-с.29-33
7. Середя Д.Б. Получение хромоалитированных покрытий на углеродистых материалах в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / Середя Б.П., Середя Д.Б., Белоконь Ю.А., Кругляк И.В. // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. трудов. Вып. 80 - Дн-вск.,ГВУЗ ПГАСА, 2015.-380с., С.296-301.
8. Середя Д.Б. Повышение износостойкости деталей газотурбинных двигателей в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза XIII международная научно техническая конференция „АВИА-2015”. –К.: НАУ, 2015.-С. 1172-1175
9. Sereda B., Sereda D. Advanced Chromoaluminizing Coatings for Wear and Heat-resistance on Composite Materials under SHS. Material science and technology- 2015.. Columbus, OH,USA.- 1821p., P.229-232.
10. Sereda B., Sereda D. Aluminized Multifunctional Coating on Steel in SHS Condition. Material science and technology -2014. Pittsburgh. Pennsylvania USA. 2224p. P.482-486.
11. 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.

**Бейгул О.А., д.т.н., Середя Д.Б., аспірант, Кругляк И.В., к.т.н., Шиллер А.Г., магістр, Токаев В.Н, магістр, Чернета О.Г., к.т.н.**

Дніпровський державний технічний університет,

### ОТРИМАННЯ ЗАХИСНИХ ЖАРОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБІЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

*В роботі представлені результати досліджень процесу силікування з використанням явища самораспространеної високотемпературної синтезу в режимі теплового самозаймання. Вивчено вплив складу реакційних шихти на теплові характеристики процесу та покриття покриття. Проведені дослідження показують, що СВС технологія отримання хромоалюмосилицированих шарів дозволяє отримувати якісні захисні покриття при обмеженому часі їх формування.*

**Ключові слова:** зносостійкість, синтез, жаростійкість, сталь.

**O. Beigyl, D. Sereda, I. Krygljak, A. Shiller, V. Tokaev, O. Cherneta**

Dniprovskyy State Technical University

### OBTAINING PROTECTIVE HEAT RESISTANCE COATINGS FOR AUTOMOBILE PARTS

*The paper presents the results of studies of the silicization process using the phenomenon of self-propagating high-temperature synthesis in the regime of thermal autoignition. The influence of the composition of the reaction charge on the thermal characteristics of the process and the coating thickness was studied. The conducted researches show that the SHS technology for obtaining the chromoaluminosilated layers allows obtaining high-quality protective coatings with limited time of their formation.*

**Key words:** wear resistance, synthesis, heat resistance, steel.