

УДК 669.136.9

¹Середа Б.П., д.т.н., професор, ¹Чернета О.Г. к.т.н., доцент, ²Середа Д.Б., аспірант.

¹Днепродзержинский государственный технический университет,

²Запорожская государственная инженерная академия

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА

В работе рассмотрены методы получения хромоалитированных покрытий и представлена новая технология формирования защитных слоев на сталях в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. С применением методов математического моделирования, при получении износостойких покрытий на деталях машин в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, разработаны оптимальные составы СВС смесей. Исследование износостойкости интерметаллидных слоев, на сталях 50 и У8А, легированных бором и кремнием позволяет говорить об увеличении износостойкости деталей машин и механизмов в 2-3 раза.

Ключевые слова: математическое моделирование, износостойкость, синтез.

Постановка проблемы. От правильного выбора твердости поверхности деталей машин в большой степени зависит эффективность конечного результата - долговременная их работоспособность при минимальных затратах. Алгоритмы испытаний должны формировать технология таким образом, чтобы определить, что и как необходимо применять в технологии получения защитных покрытий. Технология должна предусматривать спектр различных режимов химико-термической обработки, контрольно-диагностических приборов - от ручного до автоматизированного исполнения при рациональном соединении их применения в процессах производства, испытаний и эксплуатации деталей машин. Она должна иметь широкий спектр алгоритмов и программ, которые применяются к конкретным деталям, операциям и задачам повышения износостойкости стальных деталей, работающих в условиях трения скольжения. Применение новой технологии формирования износостойких покрытий в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза требует досконального ее изучения и исследования.

Анализ последних источников исследований и публикаций. Известно много методов упрочнения поверхности сталей, некоторые из них применяются в нескольких вариантах. Их разделяют на две большие группы [1]:

– процессы формирования защитных покрытий, к которым можно отнести: нанесение электролитических покрытий, гальванизация, осаждение покрытий из газовой фазы методами PVD и CVD, лазерное наплавление и т.д.

– процессы, связанные с модификацией материала уже существующих поверхностей. Наиболее продвинутые методики в этой области включают упрочнение поверхности с помощью лазерной техники, электронных пучков, имплантации ионов и т.д., а также классические методы химико-термической обработки поверхности (азотирование, борирование). Способы получения защитных покрытий на металлические изделия различаются технологией нанесения покрытия, и основной целью создания является хорошая адгезия с подложкой, а также получение сплошного, беспористого и стойкого в данной среде защитного слоя. В настоящее время основными способами нанесения защитного покрытия являются: гальваническое высаживание при электролизе, газотермическое напыление или металлизация, термодиффузионное насыщение в порошке, погружение в расплавленный металл, плакирование. По типу соединения защитного слоя с подложкой различают адгезионные и диффузионные металлические покрытия.

Поверхностное насыщение стали алюминием, хромо, цинком и другими элементами называют диффузионным насыщением металлами [2]. Изделие, поверхность которого обогащена этими элементами, приобретает ценные свойства, к числу которых относятся высокая жаростойкость, коррозионная стойкость, повышенная износостойкость и твердость.

В связи с этим, актуально применение технологий, позволяющих получать покрытия при ограниченном или минимальном времени их формирования. Одной из таких технологий является метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза [3-5].

Вопросами повышения износостойкости деталей машин занимаются многие ученые. В последнее время получает распространение применение хромоалитированных покрытий. Хромоалитирование – одновременное или последовательное насыщение металлов и сплавов хромом и алюминием – применяют преимущественно для повышения износа, жаро- и коррозионной стойкости деталей. К основным методам хромоалитирования относятся: твердый, из паровой фазы, газовый и жидкий. В свою очередь насыщение из паровой фазы делятся на контактный и неконтактный, газовый – одновременный и последовательный, твердый – одновременный и из шликера. [11-15]

К твердому методу относится насыщение в порошковых средах. Данный метод заключается в том, что деталь, на которой создается покрытие, помещают в контейнер и засыпают порошкообразной смесью. Смесью обычно содержит: порошок металла или сплава, являющегося собственно покрытием, активатор, в качестве которого чаще всего применяются галоидные соли, и нейтральное вещество, порошок которого вводится в смесь для предотвращения спекания металлической составляющей. Особенность метода состоит в том, что в состав смеси входит активатор, и в результате взаимодействия его с металлом образуется газообразное соединение.

Легирование хромоалитированных покрытий титаном кремнием и бором позволяет резко повысить эксплуатационные характеристики и наряду с высокой коррозионной и жаростойкостью получать более универсальные слои с высокими показателями поверхностной твердости, окислительной стойкости и коррозионной стойкости за счет образования дополнительных оксидов кремния и титана.

При содержании в смеси < 25% формируется хромосилицированный слой, при 25-40% Al – хромоалюмосилицированный слой, а при содержании > 40% Al – алитированный слой [16-18,20].

Хромоалитирование можно проводить последовательным способом, хромировать, а затем алитировать. Диффузионное хромирование – один из прогрессивных технологических процессов химико-термической обработки, что позволяет получать материал со специальными физико-механическими свойствами и в тоже время сократить затраты дорогих и тяжело обрабатываемых сталей через использование более экономных углеродистых сталей. [19] С повышением содержания алюминия в слое скорость диффузии хрома увеличивается, а концентрация – уменьшается. Последовательный способ насыщения железа позволяет получать слой с более высокой концентрацией хрома и алюминия. Одновременное насыщение в порошковых смесях с применением нагрева ТВЧ резко ускоряет процесс хромоалитирования при отсутствии в поверхностном слое хрупкой фазы FeAl [20-24].

Одновременное насыщение хромом и алюминием происходит в алюминиотермических смесях при соотношении Cr₂O₃:Al = 75-60:25-40. При содержании в смеси > 40 % Al формируется преимущественно алитированный слой.

При концентрации < 10 Al на поверхности слоя механические свойства стали не отличаются от свойств исходной, а при большем содержании алюминия характеристики прочности, пластичности и ударной вязкости снижаются.

Цель работы. *Целью работы является поиск оптимальных порошковых СВС-смесей, позволяющих формировать интерметаллидные защитные слои на стали 50 и У8А в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, исследования структуры защитных слоев и их износостойкость в условиях трения скольжения.*

Материалы исследований. В работе для нанесения покрытий использовали стали 50 и У8А. Химико-термическую обработку осуществляли в реакторе открытого типа (P=10⁵ Па) в интервале температур 900-1050 °С и общей продолжительности изотермической выдержки до 60 мин. В качестве насыщающей среды использовали смесь порошков дисперсностью 100-400 мкм следующих материалов:

1. Cr₂O₃ — оксид хрома (III) (ТУ 6-09-4272-84) — источник хрома в покрытие.
2. Al₂O₃ — оксид алюминия (III) (ТУ 6-09-426-75) — инертная добавка.
3. Al — алюминий марки АСД1 (ТУ 48-5-226-82) — восстановитель оксидов, источник алюминия в покрытие.
4. В — бор технический (ТУ 6-08-374-77) — источник бора в покрытие.
5. Si — кремний марки Кр1 (ТУ 48-4-174-77) — источник кремния в покрытие.
6. J₂ — йод металлический (ГОСТ 4159-79) — активатор процесса насыщения.
7. NH₄Cl — хлористый аммоний (ТУ 6-09-1147-79) — активатор процесса насыщения.

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

С целью поиска составов порошковых СВС-смесей, обеспечивающих высокую износостойкость, использовался полный факторный эксперимент

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, ΔG (испытание на машине терния СМТ-1, $\tau_{исп.} - 5$ ч). [6-10,25]

Параметры оптимизации:

Y_1 – показатели износостойкости, $\Delta G - \tau_{исп.} - 5$ ч, для системы легированной бором В;

Y_2 – показатели износостойкости, $\Delta G - \tau_{исп.} - 5$ ч, для системы легированной кремнием Si;

В качестве независимых переменных были выбраны: содержание в СВС-смеси хромистой составляющей, кремния, бора и алюминия. В качестве исходного материала была выбрана сталь 50. Активатором процесса являются J_2 и NH_4F 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 хром-алюминий-бор

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

Таблица 2

Исследуемые факторы для системы хром-алюминий-кремний

Характеристика	Факторы		
	В составе Al %, мас.	В составе Si %, мас.	В составе ХС %, мас.
Код	X_1	X_2	X_3
Основной уровень	10	12	20
Интервал варьирования	5	5	5
Нижний уровень	5	7	15
Верхний уровень	15	17	25

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

В результате расчетов были получены следующие уравнения:

$$Y_1 = 77,444 - 0,9X_1 + X_2 - 3,1X_3 - 0,0556X_1^2 + 3,4444X_2^2 + 1,9444X_3^2 + 0,125X_1X_2 - 0,125X_1X_3 - 1,875X_2X_3 \quad (1)$$

$$Y_2 = 107,04 - 0,3X_1 + 3,8X_2 - 3X_3 - 0,0556X_1^2 + 1,4444X_2^2 + 6,4444X_3^2 + 0,125X_1X_2 - 0,375X_1X_3 - 1,875X_2X_3 \quad (2)$$

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 представлены в таблице 3

Таблиця 3

Результаты регрессивного анализа экспериментальных данных

Параметр	Функции отклика	
	Y ₁	Y ₂
b ₀	77,444	107,04
b ₁	-0,9	-0,3
b ₂	1	3,8
b ₃	-3,1	-3
b ₄	-0,0556	-0,0556
b ₅	3,4444	1,4444
b ₆	1,9444	6,4444
b ₇	0,125	0,125
b ₈	-0,125	-0,375
b ₉	-1,875	1,875
Δb	2,028	5,58
t-критерий	2,78	2,78
F-критерий	1,51<6,59	5,61<7,70

Проверка адекватности моделей показывает, что их можно использовать для прогнозирования значений функций отклика при любых значениях факторов, находящихся между верхним и нижним уровнями. Для этого целесообразно перейти к натуральным переменным, используя формулы перевода, представленную в следующем виде:

$$X_{ij}^k = \frac{X_{ij}^n - X_{ij}^o}{\Delta_i} \quad (3)$$

где X_{ij}^k – кодированное значение изучаемого i-го фактора в j-ом уравнении; X_{ij}^n – натуральное значение изучаемого i-го фактора в j-ом уравнении; X_{ij}^o – значение изучаемого i-го фактора в j-ом уравнении на основном уровне; Δ_i – значение интервала варьирования изучаемого i-го фактора.

Путем замены в уравнения (1-2) переменных X_i на правую часть уравнения (3) и последующим приведением подобных получаем натуральные уравнения, описывающие влияния режима теплового самовоспламенения и содержания легирующих элементов на износостойкость защитных покрытий:

$$Y_1 = 77,444 - 0,9A_1 + 1B_1 - 3,1XC - 0,0556A_1^2 + 3,4444B_1^2 + 1,9444XC^2 + 0,125 A_1B_1 - 0,125A_1XC - 1,875B_1XC \quad (4)$$

$$Y_2 = 107,04 - 0,3 A_1 + 3,8 S_1 - 3 XC - 0,0556 A_1^2 + 1,4444 A_1^2 + 6,4444 XC^2 + 0,125 A_1S_1 - 0,375 A_1XC - 1,875 S_1XC \quad (5)$$

Для оценки адекватности уравнений был проведен расчет по полученным уравнениям регрессии для оптимального режима теплового самовоспламенения. Результаты расчетов были сопоставлены с экспериментальными исследованиями. Как видно из таблицы 4 погрешность между расчетными и экспериментальными значениями функции отклика не превышает 5.

Таблиця 4

Отношение расчетных и экспериментальных данных

Показатель	Расчетное значение	Экспериментальное	Погрешность
ΔG(B)	84,903	85	0,09
ΔG(Si)	105,4	105	0,4

С целью определения режима и СВС-составов, обеспечивающих получение оптимальных показателей износостойкости покрытий строили трехмерные графические зависимости (рис. 1-2).

Результаты исследований и их обсуждение. Анализ реакций, протекающих при СВС-процессе, а также результатов экспериментов и металлографических исследований позволили получить схему образования защитных покрытий. Процесс формирования защитных покрытий

в режиме теплового самовоспламенения условно можно разделить на пять стадий– инертный прогрев СВС-смеси до температуры самовоспламенения, тепловое самовоспламенение, прогрев деталей, изотермическая выдержка и охлаждение.

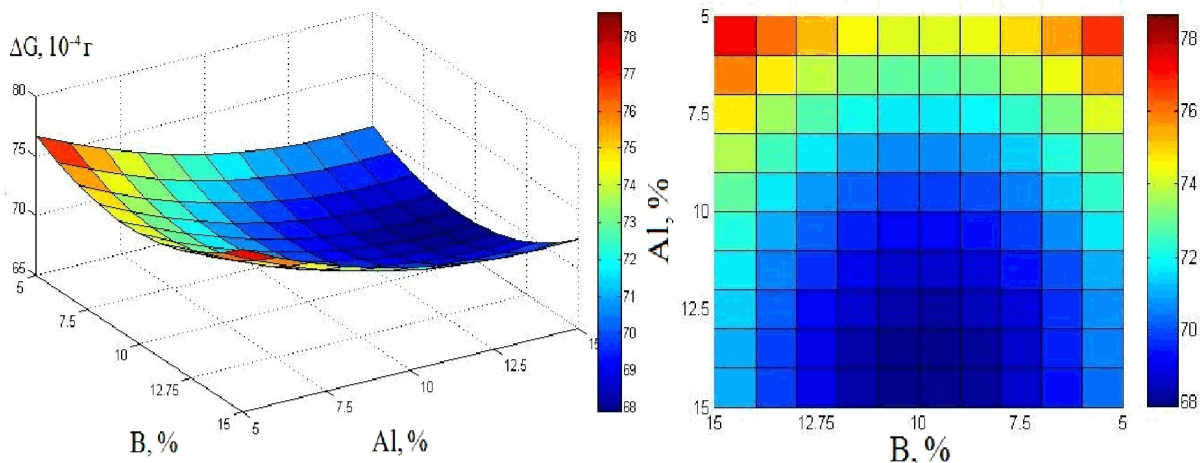


Рис. 1. Оптимизация износостойкости поверхностного слоя для системы Cr-Al-B: влияние содержание бора и алюминия на износостойкость стали 50 с защитным интерметаллидным покрытием

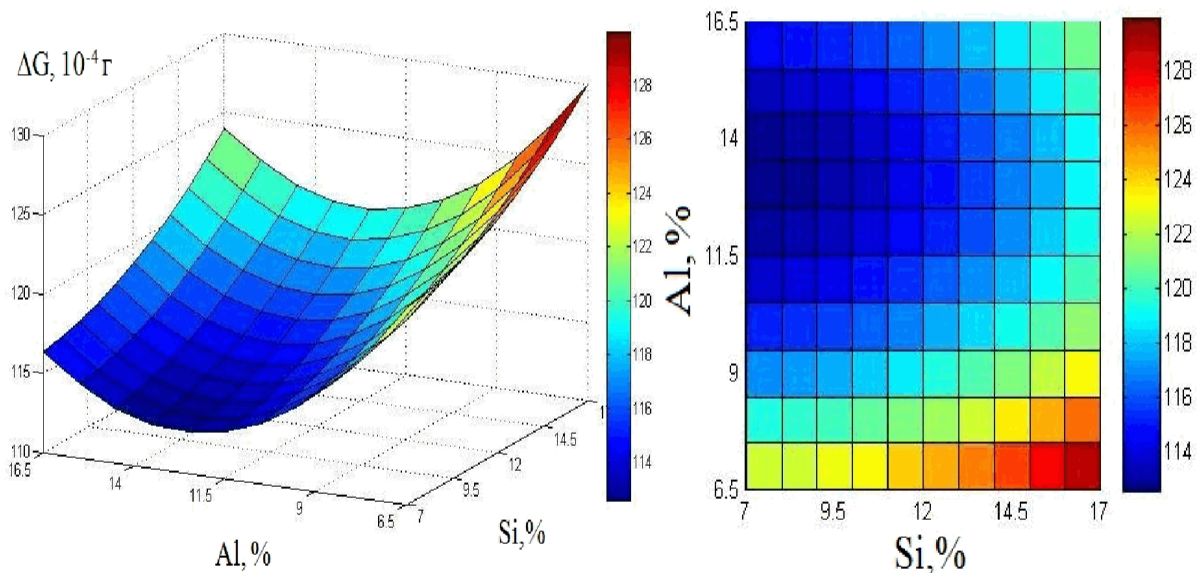


Рис. 2. Оптимизация износостойкости поверхностного слоя для системы Cr-Al-Si: влияние содержание бора и хромистой составляющей на износостойкость стали 50 с защитным интерметаллидным покрытием

На начальной стадии (стадия 1) происходит инертный прогрев смеси. При использовании в качестве поставщика диффундирующего элемента – бора или кремния – наблюдается формирования борированного или силицированного слоя.

На стадии 2 – стадии теплового самовоспламенения, происходит подъем температуры самовоспламенения со скоростью 200-400 °C/c до максимального значения. На этой стадии наряду с образованием активных атомов бора и кремния происходит протекания реакций образования элементарного хрома и их соединения с носителями (фтором, хлором и йодом), 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 образования галогенидов происходит лишь на стадии нестационарного роста температуры. При достижении максимальной температуры, превращающей температуру пиролиза диiodида хрома, кремния, происходит его быстрый распад.

На 3 стадії – стадії прогрєва изделий , происходит падєние температуры до температуры процесса T_n за счет приема выделившегося тепла изделиями. Активные атомы, начинают диффундировать в подложку и происходит легирование карбидных фаз бором и кремнием. Начинают формироваться легированные боридные и силицидные фазы.

На 4 стадії – стадії изотермической выдержки , происходит формирования постоянного диффузионного потока образующихся активных атомов хрома, алюминия, кремния и бора. Диффузионный слой увеличивается и происходит легирование хромоалитированных слоев бором и кремнием. С увеличением изотермической выдержки происходит увеличение толщины слоя. Рост слоя подчиняется параболическому закону.

На 5 стадії – стадії охлаждения, происходит формирования диффузионного слоя с меньшей интенсивностью за счет уменьшения коэффициента диффузии кремния и бора из-за падения температуры. Слой состоит из двух фаз: внешней, представляющей собой бориды и силициды хрома, и внутренней – карбидной фазы.

Исследования показали, что такую высокую скорость формирования покрытий можно объяснить тем, что аустенит образующийся при скоростном нагреве из-за стадии самовоспламенения, характеризуется высокой дефектностью строения и мелкозернистостью, что резко увеличивает его диффузионную восприимчивость насыщаемыми элементами. Таким образом, можно управлять как скоростью роста слоев так и их фазовым составом и структурой. Основными факторами влияющими на кинетику формирования защитных слоев оказывают состав СВС-шихты, количество хромистой составляющей, время изотермической выдержки, состав обрабатываемой стали, а также вид СВС-процесса проходящий в режиме горения или в режиме теплового самовоспламенения. На рис. 3 приведены микроструктуры хромоалитированных покрытий легированных бором, титаном и кремнием, полученные в режиме теплового самовоспламенения в оптимальных смесях. По результатам металлографического исследования, на микроскопе Neophot-21, и рентгеноструктурного анализа (осуществляли на рентгеновском микроанализаторе INCA, ОАО Днепроспецсталь и дифрактометре Дрон-3) установлено, что хромоалитированные покрытия легированных бором, кремнием, титаном содержат в своем составе помимо основной фазы $(Fe_3Al, (FeCr)_{23}C_6, (FeCr)_7C_3, (FeCr)_3C, Cr_3C; Fe_2Al_5,$ При нанесении хромоалитированных слоев легированных бором покрытие состоит из однофазных легированных слоев типа $(FeCrAl)_2B$.

При нанесении хромоалитированных слоев легированных кремнием на поверхности образуется слой $(FeCrAl)_3C$ на материалах с высоким содержанием углерода (сталь 50, У8А), образуются карбиды $(FeCr)_{23}C_6$. Непосредственно к слою примыкает богатая углеродом переходная зона, образующаяся за счет встречной диффузии углерода, а за ней обедненная углеродом – ферритная зона.

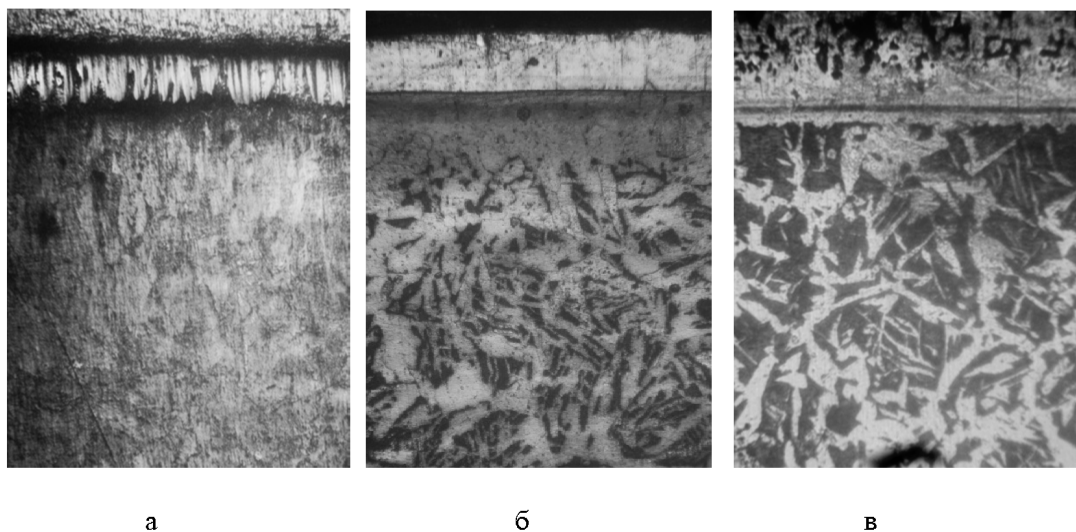


Рис. 3. – Микроструктуры многокомпонентных хромоалитированных покрытий полученных в режиме теплового самовоспламенения СВС – систем, легированных: а – бором; б – титаном; в – кремнием, при температуре насыщения – $t_n = 950^\circ C$ и времени выдержки - $\tau_b = 30$ мин, материал подложки – сталь 50, x150

Результаты испытания стальных образцов на износ в условиях трения скольжения на машине трения СМТ-1 представлены на рис. 4. Здесь износостойкость обработанных образцов в 2-3 раз превышает износостойкость необработанных.

Полученный результат коррелирует с твердостью упрочненных зон. С увеличением твердости повышается износостойкость. Твердость измеряли на поперечных шлифах на приборе ПМТ-3, по стандартной методике. С увеличением содержания углерода в сталях микротвердость поверхностного слоя возрастает. Микротвердость поверхностного слоя при хромоалюмоборировании составляет 15000 МПа, а на стали У8А 16000 МПа (фазы $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{Al})_2\text{B}$). При хромоалюмосилицировании $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{Al})_3\text{Si} = 13500$, а на стали У8А 14500 МПа.

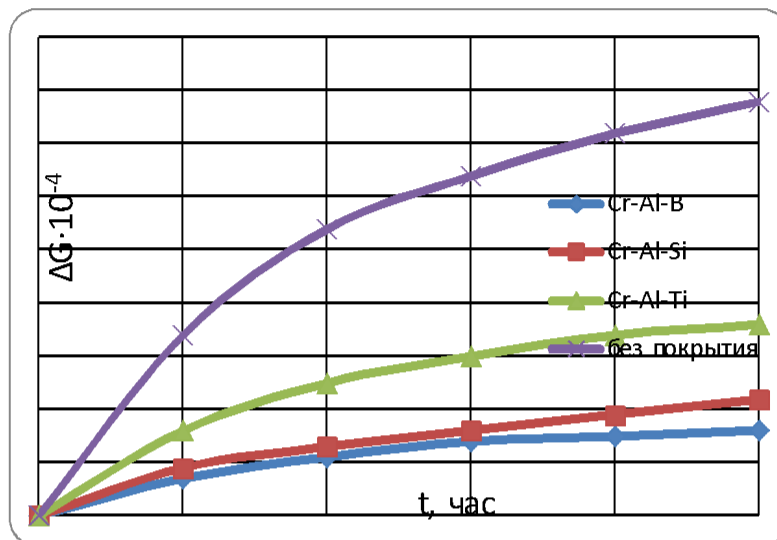


Рис. 4. Влияние времени испытания на износостойкость интерметаллидных покрытий на стали 50 при испытании на машине трения СМТ-1

При испытаниях в условиях трения скольжения, наилучшую износостойкость, среди рассматриваемых покрытий имеют хромоалюмоборированные покрытия. Их износостойкость в 4,8-5 раз выше чем у образцов без покрытия, хромоалюмосилицированные и хромоалюмотитанированные в 2,1-3,5. Как видно из рисунка 4 износостойкость для рассматриваемых пар трения зависит от микротвердости слоя.

Выводы. Проведено моделирование по поиску оптимальных порошковых СВС-смесей, для получения интерметаллидных износостойких защитных покрытий на стали 50 и У8А с использованием технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Исследованы структуры защитных слоев и их износостойкость в условиях трения скольжения. Наилучшую износостойкость, среди рассматриваемых покрытий имеют хромоалюмоборированные покрытия. Их износостойкость в 4,8-5 раз выше чем у образцов без покрытия, хромоалюмосилицированные и хромоалюмотитанированные в 2,1-3,5раза.

Информационные источники

1. Трефилова Н.В. Анализ современных методов нанесения защитных покрытий// Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 10. – С. 67-67
2. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов. / Ю.М. Лахтин // – М.: Металлургия, 1993. – 448 с.
3. Мержанов А.Г. Процессы горения и синтез материалов/Под ред. И.Т. Телепы, А.П. Хачояна. Черноголовкам ИСМАН, 1998. 512с.
4. 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.
5. Середа Б.П. Поверхневе зміцнення матеріалів: Монографія / Середа Б.П., Калініна Н.Є., Кругляк І.В. – Запоріжжя: РВВ ЗДІА, – 2004. – 230 с.
6. 11.Хусаинов М.А. Химическая газофазно-диффузионная кристаллизация и структура покрытий из карбидов переходных металлов IVa – Va подгрупп на графите / М.А. Хусаинов, Г.М. Демяшев, М.М. Мышляков // Изв. АН СССР. Металлы. – 1991. – №4. – С. 152-157.

7. Защитные покрытия конструкционных углеродистых материалов / В.С. Дергунова, Г.А. Кравецкий, А.В. Емяшев [и др.] // Защитные покрытия. – Л.: Наука, 1978. – С. 114-117.
8. Дзяди́кевич Ю.В. Шляхи захисту графітових матеріалів від окислення (Оглад) / Ю.В. Дзяди́кевич, В.Е. Олійник // Порошковая металлургия. – 1996. – № 3/4. – С. 41-47.
9. Серета Б.П., Палехова И.В., Белоко́нь Ю.А., Серета Д.Б. Получение интерметаллидных соединений и покрытий при нестационарных температурных условиях. Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении: Научный журнал № 2, 2014. ЗНТУ, Запорожье., С.67-71
10. Серета Б.П., Белоко́нь Ю.А., Кругляк И.В., Серета Д.Б., Получение хромоалитированных покрытий на углеродистых материалах в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. трудов. Вып. 80 - Дн-вск., ПГАСА, 2015.- С.296-301.
11. Ягодкин Ю.Д. Жаростойкие покрытия (обзор) / Ю.Д. Ягодкин, В.С. Терентьева // Итоги науки и техники. Сер. Металловедение и термическая обработка. – 1991. – №25. – С. 183-254.
12. Изучение жаростойкости и фазового состава композиции ZrB_2-Si / Г.Н. Горбатова, И.Б. Баньковская, Н.С. Юрицын [и др.] // ЖПХ. – 2001. – Т.74, № 7. – С. 1048-1050.
13. Змий В.И. Карбоборосилицидные и оксидные композиционные покрытия / В.И. Змий, Г.Н. Картмазов, Н.Ф. Карцев // Порошковая металлургия. – 2006. – № 3/4. – С. 21-27.
14. Химико-термическая обработка металлов и сплавов. Справочник. Борисенок Г.В., Васильев Л.А., Ворошнин Л.Г. и др. М.: Металлургия, 1981. 424 с.
15. Бялік О.М., Кондратюк С.Є., Кіндрачук М.В., Черненко В.С. Структурний аналіз металів. Металографія. Фрактографія: Підручник. – К.:ВПІ ВПК «Політехніка», 2006. – 328с.
16. Серета Д.Б. Исследования структуры интерметаллидных покрытий полученных в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Международная молодежная научно-практическая конференция “Человек и космос”: Сборник тезисов-Днепропетровск, 2015.-С. 294
17. Серета Б.П., Серета Д.Б. Отримання багатоконпонентних алітованих покриттів в умовах СВС. Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій: Тези доповідей. Львів, 2014-110с., С.65
18. Серета Б.П., Бабаченко Є.В., Серета Д.Б. Утворення жароміцних сплавів на основі інтерметалічних сполук, отриманих в умовах СВС. Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. трудов. Вып. 74 - Дн-вск., ПГАСА, 2014.- С.29-33.
19. Серета Б.П., Серета Д.Б. Отримання алітованих покриттів на сталях при нестационарних температурних умовах. Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій: Тези доповідей. Львів, 2014-110с., С.66
20. Ткаченко С.Н. Математическое моделирование получения силицированных покрытий на чугунах в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / Б.П.Серета, И.В.Кругляк, С.Н.Ткаченко // Науковий журнал – Запоріжжя, ЗНТУ, 2009. – С.118-125.
21. Sereda B., Sereda D. Kinetiks formation of aluminized multifunctional coating on steel in SHS condition. Material science and technology 2011. Conference and Exhibition. Columbus, Ohio USA. 2011-1741p.-P.1667-1671
22. Sereda B., Belokon' Y., Zherebtsov , A. Sereda D. The Reseaching and Modeling of Physical-Chemical Properties of Ni-Base Alloys in SHS Conditions. Material science and technology 2012. Conference and Exhibition. Pittsburgh. Pennsylvania USA. 2012-1550p.-P.494-498
23. Sereda B., Sereda D. Aluminized Multifunctional Coating on Steel in SHS Condition. Material science and technology 2014. Conference and Exhibition.Pittsburgh. Pennsylvania USA. 2224p. P.482-486
24. Sereda B., Sereda D. Modeling Deformation in Material Processing and Laws of Phasic by SHS Pressing Intermetallics Alloys. Material science and technology 2015. Conference and Exhibition. Columbus, OH,USA. 1821p. P.611-617
25. Серета Б.П. Теорія будови рідкого, кристалічного та аморфного стану речовини. Навчальний посібник з грифом МОНУ, гриф № 1.4/8-Г-80.-Запоріжжя РВВ ЗДІА, – 2008. – 238 с.

¹Серета Б.П., д.т.н., професор, ¹Чернета О.Г. к.т.н., доцент, ²Серета Д.Б., аспірант

¹Дніпродзержинський державний технічний університет

²Запорізьська державна інженерна академія

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОТРИМАННЯ СТІЙКИХ ДО УШКОДЖЕНЬ
ПОКРИТТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО**

СИНТЕЗУ

У роботі розглянуто методи отримання хромоалітованих покриттів та представлена нова технологія формування захисних шарів на сталях в умовах саморозповсюджувального високотемпературного синтезу. Із застосуванням методів математичного моделювання, при отриманні зносостійких покриттів на деталях машин в умовах саморозповсюджувального високотемпературного синтезу, розроблені оптимальні склади СВС сумішей. Дослідження зносостійкості інтерметалідних шарів, на сталях 50 і У8А, легованих бором та кремнієм дозволяє збільшити зносостійкість деталей машин та механізмів в 2-3 рази.

Ключові слова: математичне моделювання, зносостійкість, синтез.

В.¹Sereda, O.¹Cherneta, D.²Sereda

¹Dniprodzerzhynskyy State Technical University

²Zaporizhska State Engineering Academy

MATHEMATICAL MODELING FOR DAMAGES COATINGS RESISTANT TO USING TECHNOLOGY

The paper discusses methods for chromoaluminizing coatings and introduced a new technology of forming protective layers on steels in a self-propagating high-temperature synthesis. Using mathematical modeling methods in the preparation of wear-resistant coatings to parts of machines under SHS designed by optimal compositions SHS mixtures. Study of wear resistance of intermetallic layers on steels 50 and U8A doped with boron and silicon suggests an increase in the wear resistance of machine parts and mechanisms by 2-3 times.

Key words: mathematical modeling, wear resistance, synthesis