

ПОЛУЧЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СИЛИЦИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ В РЕЖИМЕ ГОРЕНИЯ СВС - СИСТЕМ

В работе рассмотрены методы получения силицированных покрытий и представлена новая технология формирования защитных покрытий на сталях в условиях горения, проходящего при самораспространяющемся высокотемпературном синтезе. С применением методов математического моделирования, при получении коррозионностойких и жаростойких покрытий на деталях машин в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, разработаны оптимальные составы СВС шихт. Исследование коррозионной стойкости и жаростойкости, проводили на сталях 20 и У8А, легированных титаном, хромом, алюминием, бором и вольфрамом. Получено повышение коррозионной и жаростойкости в 2-3 раза.

Ключевые слова: математическое моделирование, коррозионная стойкость, жаростойкость, синтез.

Постановка проблемы. От правильного выбора состава защитного покрытия для деталей машин в большой степени зависит эффективность конечного результата - долговременная их работоспособность при минимальных затратах. Алгоритмы испытаний должна формировать технологию таким образом, чтобы определить, что и как необходимо применять в технологии получения защитных покрытий. Она должна иметь широкий спектр алгоритмов и программ, которые применяются к конкретным деталям, операциям и задачам повышения коррозионной и жаростойкости стальных деталей, работающих в условиях высоких температур и в кислотных средах. Применение новой технологии формирования коррозионностойких покрытий, полученных в условиях горения СВС-шихт требует досконального изучения и исследования.

Анализ последних источников исследований и публикаций. Эффективным методом повышения долговечности различных деталей, в результате которого изменяются химический состав, структура и свойства поверхностных слоев металла, является диффузионное силицирование.

Анализ литературных источников [1 - 4, 8 - 10] свидетельствует, что в настоящее время существует много методов диффузионного насыщения поверхности стали кремнием. Общим для них является осуществление процесса насыщения при высоких температурах, когда запас свободной энергии системы достаточно велик для протекания диффузии в твердой фазе.

Для получения покрытий на основе кремния применяют следующие способы: в среде расплавленных электролитов, в газовой фазе, при помощи порошкообразных масс в нейтральной или восстановительной атмосфере [5 - 8,10].

Газовое силицирование осуществляется разными способами [4]: при непрерывном пропускании хлора через реакционное пространство с деталями и ферросилицием; с использованием вместо хлора хлористого водорода; в смеси H_2+SiCl_4 или $N_2+H_2+SiCl_4$; в смеси $Ar+SiCl_4$ или N_2+SiCl_4 ; в смеси H_2+SiH_4 (моносилан), NH_3+SiH_4 . Газовое силицирование сталей проводится в герметически закрытых ретортах, в которые помещают детали, и засыпают их порошком ферросилиция, карборунда, чистого кремния или другими веществами, содержащими кремний. Кремний, содержащий газ $SiCl_4$, образуется в результате взаимодействия этих веществ с хлором, который подается в реторту в чистом виде, в смеси с водородом или вводится другим способом. При соприкосновении газообразного хлористого кремния с железом выделяется свободный кремний, который диффундирует в обрабатываемую деталь [19]. Химизм процесса заключается в том, что при обработке образцов $SiCl_4$ кремний поступает к образцам вследствие реакции обмена, а также восстановления тетрахлорида кремния атомарным водородом, растворенным в железе. Образование силицированных слоев в смеси паров $SiCl_4$ и инертного газа определяется в основном реакцией типа (1,2):

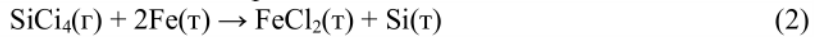


Хлорный метод силицирования имеет следующие недостатки: требуется сварка реторт и проверка их герметичности; после проведения процесса требуется дополнительная подготовка смеси для дальнейшего ее использования. Большим недостатком процессов насыщения, проводимых в атмосфере водорода, а также в смеси водорода с хлористым

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

водородом, является взрывоопасность, токсичность и агрессивность применяемых газообразных смесей, что ограничивает широкое применение этих методов в промышленности.

Диффузионное силицирование в тлеющем разряде проводится газовым прямоточным методом в среде из паров четыреххлористого кремния и водорода. Четыреххлористый кремний и ректификационный водород применяется без дополнительной очистки [11]. Силицирование стали в тлеющем разряде, происходит по обменной реакции:



После установки образца, из системы откачивают воздух до давления 1-0,1 мм. рт. ст., затем всю систему прокачивают водородом под давлением 20 мм рт. ст. Тлеющий разряд включается после достижения динамического равновесия газов. Образец нагревается за счет бомбардировки его ионами газа. Для этого способа не требуются высокотемпературные печи, скорость силицирования значительно больше, чем при обычном газовом [15].

Недостатками процесса являются то, что он пригоден только для образцов и для его проведения требуются сложные и нетехнологичные установки.

В современных технологиях химико-термической обработки (ХТО) широко используются концентрированные источники энергии, локально воздействующие на обрабатываемый материал. Наряду с лазерной, ионно-лучевой и другими обработками поверхности заслуживает внимания применение тлеющего разряда при атмосферном давлении ($1,01 \cdot 10^5$ Па). Этот метод отличается высокой плотностью мощности ($10^2 - 10^3$ Вт/см²) в катодном пятне, что способствует ускорению процесса обработки [12, 13].

В работе [14] изучены возможности бескамерного ХТО углеродистых и легированных сталей в среде из защитных газов, получаемых разложением карбида (мочевины) в плазме разряда.

Получение диффузионных покрытий в вакууме. Процесс насыщения одного металла другим в вакууме [20, 21] происходит достаточно интенсивно при давлении паров металла около 10^{-2} мм рт. ст. Диффузионные покрытия получают в специальных камерах, а на поверхности небольших деталей можно в обычных электрических печах сопротивления, в реторте из жароупорного материала. Контейнер с деталями и наносимым веществом помещают в вакуумный аппарат, и нагревают до температур, не превышающих 850 - 900⁰С, так как более высокие температуры приводят к быстрому коррозионному разрушению внешней поверхности цилиндра.

К недостаткам процесса можно отнести сложность установки, высокую стоимость и небольшие размеры реакционного пространства.

В настоящее время можно считать наиболее отработанным методом – *жидкостное силицирование*. Процесс проводят в тигельных печах-ваннах. В качестве насыщающей среды используют расплавы на основе силикатов щелочных металлов с добавками кристаллического кремния, ферросилиция, карбида кремния и других восстановителей [11, 22]. Детали загружают в расплав в связках, выдерживают при 900 – 1100⁰С в течение 2 – 10 ч, после чего подвергают закалке и охлаждению на воздухе. Влияние восстановителей и условий насыщения (температуры и времени) на интенсивность роста диффузионных слоев и их оптимальное содержание обеспечивает получение слоя максимальной глубины.

Оптимальным считается состав расплава, содержащего 20-30 вес. % промышленного карборунда, 20-50 вес. % двуокиси кремния и до 50 вес. % фторидной эвтектики системы NaF (60 мол. %) – KF [23].

Недостатками метода являются небольшая производительность, быстрый выход из строя тиглей, а также сравнительно резкая смена нагрева и охлаждения покрываемых деталей, что приводит к возникновению деформаций, особенно в деталях крупных размеров.

Электролизное силицирование проводят в специальных установках, состоящих из печи-ванны, системы питания постоянным и переменным током. В качестве насыщающей смеси служат силикаты щелочных металлов с добавками хлоридов и фторидов щелочных и щелочноземельных металлов, которые повышают жидкотекучесть силикатов [11]. При силицировании этим методом катодом служит силицированная деталь, анодом – графитовый стержень.

При насыщении в расплавах с большим содержанием фтористого натрия на железе и высоколегированных сталях получают диффузионные слои, состоящие из силицидов FeSi₂ и FeSi и α- твердого раствора кремния в железе.

Преимуществами этого метода силицирования являются высокая производительность, простота технологии, равномерность покрытия. Однако из-за невозможности обработки изделий сложной формы, высокой температуры процесса, электролизное силицирование не

находит практического применения.

Силицирование в порошковых смесях. При силицировании деталей этим методом в качестве источника кремния применяют ферросилиций, карбид кремния, силикокальций и др. Для предотвращения спекания чистых металлов или сплавов и их прилипания к поверхности покрываемого металла добавляют инертные добавки - измельченный шамот, окись алюминия, кварцевый песок или пемзу и др. [11].

Процесс диффузионного насыщения осуществляют в заваренных ретортах в металлических ящиках или контейнерах. Реторту с деталями, равномерно засыпанными реакционной смесью, помещают в предварительно нагретую или холодную печь и нагревают. При применении сварной реторты к ее крышке приваривают трубу, конец которой закрывают клапаном, позволяющим регулировать давление газов внутри реторты при ее нагреве. Выделяющиеся при нагреве аммиак и хлористый водород, вытесняют воздух из реторты через клапан, в результате устраняется окисление образцов. После окончания процесса диффузионного насыщения, реторту выгружают из печи, и охлаждают на воздухе.

Большим преимуществом этого способа является простота выполнения процесса, что особенно ценно для внедрения в производство, а также невысокая стоимость оборудования и простота контроля. В отличие от жидкостного метода, силицирование в порошкообразных смесях осуществляется при медленном нагреве и охлаждении, поэтому обрабатываемые детали не подвержены деформации.

Поверхностное насыщение сталей кремнием, титаном, вольфрамом и другими элементами приобретает ценные свойства, к числу которых относятся высокая жаростойкость и коррозионная стойкость. В связи с этим, актуально применение технологий, позволяющих получать покрытия при минимальном времени их формирования. Одной из таких технологий является, получение защитных покрытий в условиях горения при самораспространяющемся высокотемпературном синтезе [16-18, 24].

Цель работы. *Целью работы является поиск оптимальных порошковых СВС-шихт, позволяющих формировать защитные покрытия на стали 20 и У8А в условиях горения СВС-систем. Провести исследования жаростойкости и коррозионной стойкости, полученных покрытий.*

Материалы исследований. В работе для нанесения покрытий использовали стали 20 и У8А. Химико-термическую обработку осуществляли в реакторе открытого типа в интервале температур 900-1050 °С. 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. Ti - титан марки ПТХ5-1 (ТУ 113-12-132-83) - источник титана в покрытии;
7. W- порошок вольфрама, источник вольфрама в покрытии;
8. J₂ - йод металлический (ГОСТ 4159-79) - активатор процесса насыщения.
9. NH₄Cl - хлористый аммоний (ТУ 6-09-1147-79) - активатор процесса насыщения.

С целью поиска составов порошковых СВС-шихт, обеспечивающих высокую коррозионную и жаростойкость износостойкость, использовался полный факторный эксперимент.

Выбор оптимального состава порошковой смеси для проведения СВС – процессов в условиях горения проводили на основании исследований физико-механических свойств защитных покрытий, таких как коррозионная стойкость, Δm₁ - 10% H₂SO₄, τ_{исп.} = 100 ч.; износостойкость, ΔJ₁ (испытание на машине трения СМТ-1, τ_{исп.} - 5ч); коррозионная стойкость, Δm₂ - 30% HCl, τ_{исп.} - 100 ч. И жаро-стойкость, ΔG₁ - t_{исп.} = 800⁰С, τ_{исп.} = 20 ч. Матрица планирования экспериментов и расчетные уровни интервалов варьирования для получения порошковых СВС - смесей, используемых в режиме горения приведены в табл. 1. Выбор основного уровня и интервалов варьирования проводился исходя из того, что введение ХС меньше 75% мас. приводит к срыву волны горения. Содержание кремния в смеси менее 3% мас. приводит к резкому снижению толщины слоя, при увеличении скорости горения свыше 2-3 мм/мин. покрытия не формируются. Количество бора менее 3% масс., титана и вольфрама менее 2-3% мас. приводит к тому, что легирование силицированных слоев не происходит. Для

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

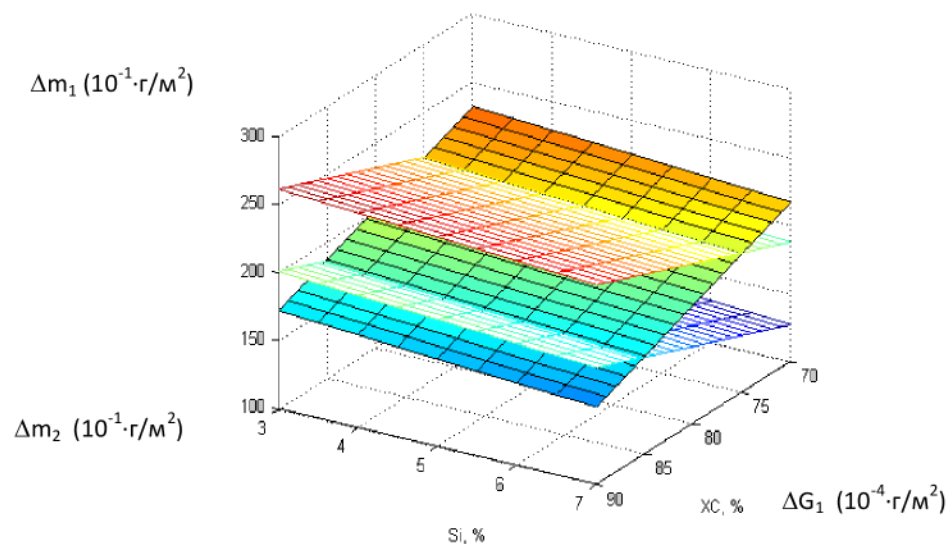
получения стопроцентного состава порошковых СВС - смесей в качестве конечного продукта добавлялся Al_2O_3 .

Таблица 1

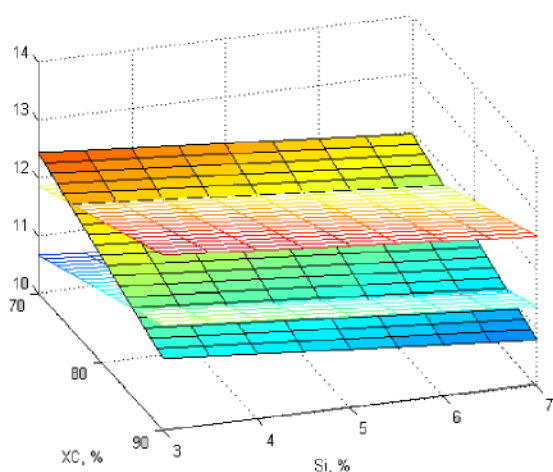
Расчетные уровни, интервалы варьирования факторов матрицы 2^3

Характеристика	Исследуемый фактор (% , мас.)								
	ХС	Si в составах				Al	В	Ti	W
Код	X ₁	X ₂				X ₃			
	1..4	1	2	3	4	1	2	3	4
Основной уровень	80,0	5,0	7,0	5,0	5,0	3,0	2,0	5,0	4,0
Интервал варьирования	5,0	2,0	3,0	2,0	2,0	2,0	1,0	2,0	2,0
Верхний уровень (+)	85,0	7,0	10,0	7,0	7,0	5,0	3,0	7,0	6,0
Нижний уровень (-)	75,0	3,0	4,0	3,0	3,0	1,0	1,0	3,0	2,0

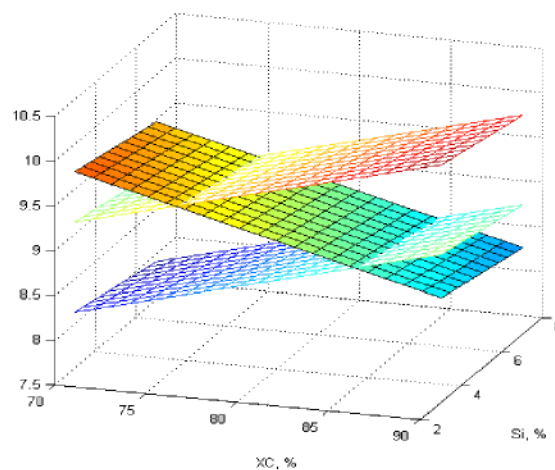
Численные значения коэффициентов регрессии и их значимость, определенные с учетом различия дисперсий для каждой функции отклика, а также проверка значимости по критерию Стьюдента и оценка адекватности модели по критерию Фишера.



а



б



в

Рис. 1. Оптимизация состава многокомпонентных силицированных покрытий для режима горения: а) влияние ХС, Si, Al на коррозионную стойкость Δm_1 ($10^{-1} \cdot \text{г}/\text{м}^2$) при испытании в 10% H_2SO_4 ; б) влияние ХС, Al, Ti на коррозионную стойкость Δm_2 ($10^{-1} \cdot \text{г}/\text{м}^2$) при испытании в 30% HCl; в) влияние ХС, W, Al на жаростойкость ΔG_1 ($10^{-4} \cdot \text{г}/\text{м}^2$) при $t_{исп} = 800$ °С,

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

В результате регрессионного анализа, были получены ряд уравнений, показывающие зависимость физико-механических свойств защитных покрытий от содержания кремния, хромистой составляющей, бора, титана, вольфрама. Без учета статически незначимых коэффициентов, были получены следующие уравнения:

$$Y_1 = 9,1350 - 0,255x_1 - 0,105x_2 - 0,0675x_3 \quad (1)$$

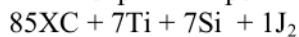
$$Y_3 = 11,786 - 0,2938x_1 - 0,2363x_2 - 0,1987x_3 \quad (2)$$

$$Y_4 = 209,125 - 14,875x_1 - 7,375x_2 - 15,375x_3 \quad (3)$$

Проверка адекватности моделей показывает, что их можно использовать для прогнозирования значений функций отклика при любых значениях факторов, находящихся между верхним и нижним уровнями.

С целью определения составов порошковых СВС-шихт, используемых в режиме горения, обеспечивающих получение оптимальных физико-механических свойств: коррозионная стойкость, жаростойкость, с использованием полученных регрессионных уравнений, строили трехмерные графические зависимости: «содержание элементов – свойства» (рис. 1). Из рисунка следует, что значение коррозионной стойкости и жаростойкости тем выше, чем больше количество хромистой составляющей, вольфрама, титана. Плоскости, отсекающие данные графические представления функций отклика, построены исходя из температурной области формирования защитных покрытий. Нижняя плоскость характерна для температуры 900 °С, а верхняя для 1100 °С. Наилучшее сочетание эксплуатационных характеристик защитных покрытий, получены в смесях, содержащих % мас.: 85,0 XC; 7,0 – 10,0 Si; 3,0 B; 7,0 Ti; 6,0 W; 5,0 Al.

Результаты исследований и их обсуждение. ормирование титанохромоалюмосилицированных покрытий в режиме горения проводилось в смеси следующего состава:

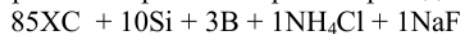


Увеличение темпа охлаждения (рис.2) больше, чем $V_i = 3$ не позволило сформировать защитный слой, что объясняется невысокой диффузионной подвижностью титана, а также малым временем, в течении которого происходит насыщение титаном, кремнием, хромом и алюминием.

Введение в смесь более 2% газотранспортного агента приводит к сильному растравливанию поверхности образца.

Микроструктура титанохромоалюмосилицированного покрытия приведена на рис. 2, а. Титанохромоалюмосилицированный слой состоит из силицида (Ti, Fe₅Si₃) и α- твердого раствора титана, кремния, алюминия и хрома. Содержание титана в поверхности составляет 47,3 - 49,2% и кремния 8,4 - 9,6%.

Борохромоалюмосилицирование в режиме горения проводили в смесях:



Борированный слой имеет характерное игольчатое строение (рис. 2, б) и состоит из легированного хромом борида Fe₂B, равномерно распределенного в слое кремнистого феррита.

Полученные данные рентгеновского микроанализатора позволяют заключить, что кремний в процессе насыщения образует кремнистый феррит, а хром преимущественно располагается в верхней области диффузионного слоя. Содержание хрома в поверхности составляет 1,8-2,2% масс. Увеличение темпа охлаждения приводит к уменьшению толщины слоя.

Хромоалюмосилицирование проводили в СВС – смеси, следующего состава:

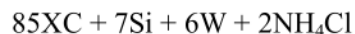


Зависимость толщины h силицированного слоя от температуры детали после стадии прогрева приведена на рис. 4, которая, как видно, подчиняется экспоненциальной зависимости.

С увеличением темпа охлаждения реактора толщина слоя уменьшается. Это объясняется уменьшением времени насыщения.

Микроструктура силицированного покрытия, легированного алюминием и хромом приведены на рис. 2, в. Защитный слой имеет фазы: Fe₃Al и α-фаза (Fe₃Si). С увеличением содержания углерода в подложке толщина слоя уменьшается. Содержание кремния на поверхности составляет 6,2%, содержание алюминия 12,7 – 13,4%.

Формирование вольфрамохромоалюмосилицированных покрытий в режиме горения проводилось в смеси следующего состава:



Влияние содержания кремния, вольфрама и температуры детали после стадии прогрева на толщину защитного слоя приведено на рис. 5.

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

Микроструктура вольфрамхромоалюмосилицированного слоя приведена на рис. 2, г. Защитный слой представляет собой фазу W_2C , под которой находится зона твердого раствора вольфрама, кремния, алюминия и хрома в железе (α -фаза). Содержание вольфрама на поверхности 5,2 – 6,4%, а кремния 0,6 – 0,8%.

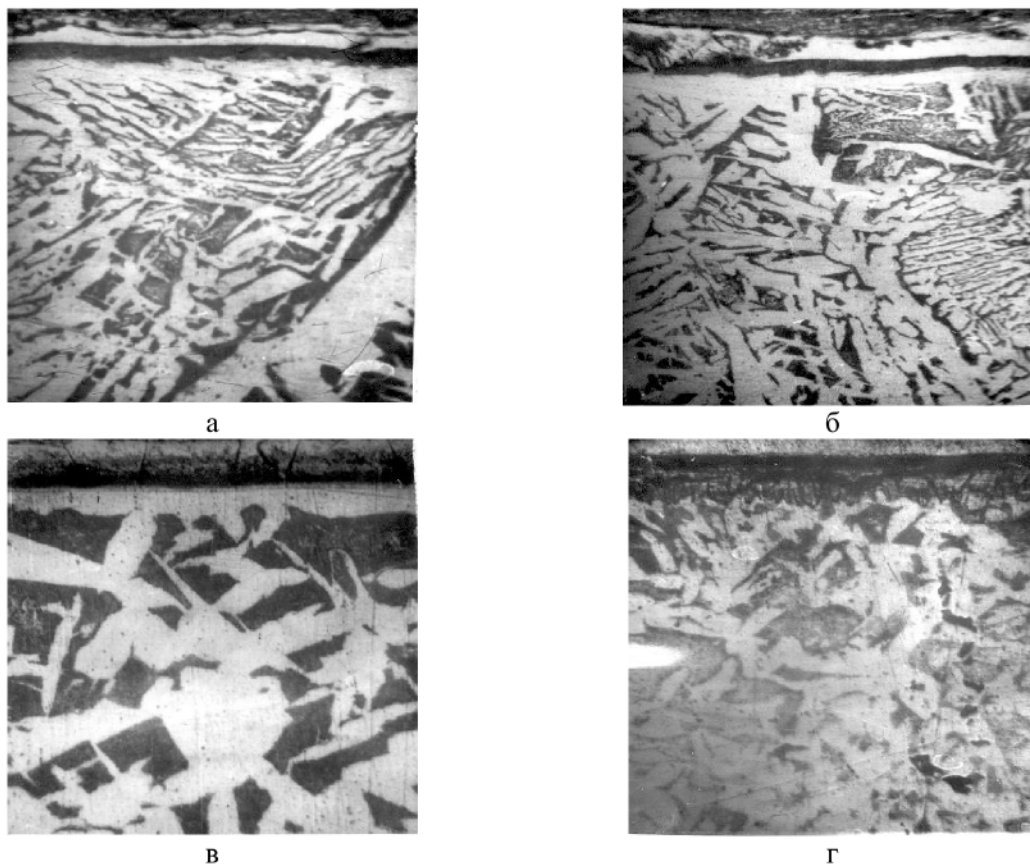


Рис. 2. Микроструктуры многокомпонентных силицированных покрытий, полученных в режиме горения: а) титанохромоалюмо-силицирование $\times 250$; б) борохромоалюмосилицирование. $\times 250$; в) алюмохромосилицирование. $\times 340$; г) вольфрамхромоалюмосилицирование. $\times 250$

Микротвердость титанохромоалюмосилицированных покрытий на поверхности образцов составляет $H_{50} = 9500 - 9800$ МПа; борохромоалюмо-силицированных $H_{50} = 13200 - 15400$ МПа; хромоалюмосилицированных покрытий $H_{50} = 7100 - 6400$ МПа и вольфрамхромоалюмосилицированных покрытий $H_{50} = 11600 - 12800$ МПа.

После проведения процесса горения по получению защитных покрытий проводили термическую обработку, заключающуюся в закалке и низком отпуске, для предотвращения «продавливания» слоев. С увеличением содержания углерода в подслое микротвердость увеличивается. Значение максимальных остаточных напряжений слоев, полученных на образцах с различным содержанием углерода приведено в табл. 1.

Таблица 1

Материал подложки				
	CrAlSi	BCrAlSi	TiCrAlSi	WCrAlSi
Температура процесса, °C	1000	1000	1100	1100
Сталь 20	1,6	2,2	1,8	1,9
Сталь У8А	2,3	6,8	2,7	3,1

Коррозионная стойкость защитных покрытий определялась испытанием 4-5 образцов в течение 10 суток. Результаты коррозионных испытаний (гравиметрический метод) в 3% NaCl, 10% водном растворе H_2SO_4 , HNO_3 и 30% HCl приведены в табл. 1.

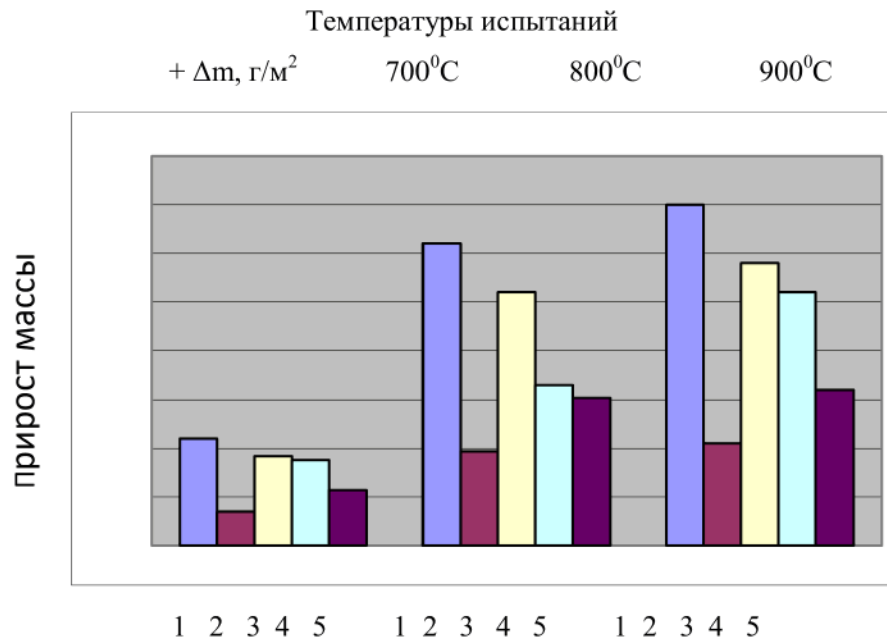


Рис. 3. Сравнительные данные жаростойкости защитных покрытий ($t_n = 1000^0\text{C}$; $\tau_{исп} = 20\text{ч}$): 1 - БП; 2 – CrAlTi; 3 – CrAlB; 4 – CrAl; 5 – CrAlW.

Наиболее эффективной защитой при испытаниях в рассматриваемых средах являются силицированные покрытия, легированные титаном, хромом и алюминием. Так по сравнению с материалом, не подвергнутом ХТО коррозионная стойкость увеличивается в 3 - 7 раз.

Как видно из результатов эффективную защиту показали силицированные слои, легированные титаном, хромом, алюминием и вольфрамом.

Сравнительная жаростойкость покрытий при испытании в течение 20 часов, при температуре 700, 800 и 900⁰С приведена на рис. 3. Жаростойкость повысилась в 1,2 - 3,5 раза. Наилучшая жаростойкость наблюдается для многокомпонентных силицированных слоев, легированных

Cr-Al-W и Cr-Al-Ti, что можно объяснить малой пористостью покрытий и образованием защитных окисных пленок: SiO₂, Cr₂O₃, Al₂O₃, WO₃ TiO₂.

Выводы. Проведено моделирование по поиску оптимальных порошковых СВС-шихт, для получения защитных коррозионностойких и жаростойких защитных покрытий на стали 20 и У8А с использованием технологии горения в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Исследованы структуры защитных покрытий, их коррозионная при испытании в 3% водном растворе NaCl и 10% водном растворе H₂SO₄, HNO₃, 30% водном растворе HCl и жаростойкость при температурах 700, 800 и 900⁰С. Наиболее эффективную защиту, при испытаниях в рассматриваемых средах, показали силицированные покрытия, легированные Cr-Al -Ti, Cr-Al -W. Так по сравнению с базовым покрытием, полученным при ХТО в изотермических условиях, коррозионная стойкость увеличивается в 2,1 - 3 раза. Жаростойкость повысилась в 2-3 раза.

Информационные источники

1. Химико-термическая обработка металлов. Лахтин Ю.М., Арзамасов Б.Н. //М.: Металлургия, 1985. – С. 256.
2. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов. //М.: Металлургия, 1994. – С. 494.
3. Сыркин В.Г. CVD - метод. Химическое парофазное осаждение. //М.: Наука, 2000. – С. 496.
4. Борисенко Г.В., Васильев Л.А., Ворошнин Л.Г. и др. Химико-термическая обработка металлов и сплавов. //Справочник. М.: Металлургия, 1981. – С. 424.
5. Sereda B. Obtaining of Boride Coatings under SHS Conditions for Car Parts / Sereda D., Sereda B. //Material science and technology- 2016. Salt Lake City, Utah USA 2016-1339p.-P.945-948
6. Sereda B. Development of Protective Coatings Formulations Based on Boron for Units

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

- Operating at High Temperatures in Metallurgy / Sereda D., Sereda B. // Material science and technology- 2016. Salt Lake City, Utah USA 2016-1339p.-P.931-934
7. Sereda B. Corrosion Resistance and Mechanical Properties Zinc Coating Sheet Steels, Received in Conditions of Self-propagating High Temperature Synthesis / Sereda D., Sereda B. // Material science and technology- 2016. Salt Lake City, Utah USA 2016-1339p.-P.825-829
 8. Лахтин Ю.М. Поверхностное упрочнение сталей и сплавов //Металловедение и термическая обработка металлов, 1988. -№11. - С. 14 - 25.
 9. Коган Я.Д. Перспективы развития технологий поверхностного упрочнения материалов деталей машин и инструмента. //Металловедение и термическая обработка металлов. - 1993.- № 8. - С. 5 - 9.
 10. Ворошнин Л.Г. Борирование промышленных сталей и чугунов //Справочное пособие/ - Мн.: Беларусь, 1981. – 205с.
 11. Ляхович Л.С. и др. Силицирование металлов и сплавов. //Минск: «Наука и техника», 1972. – С. 280.
 12. Пат. РБ №3952. Устройство для локализованной химико-термической обработки металлических изделий в тлеющем разряде при атмосферном давлении. Заявл. 11.01.01.
 13. Zhdanok S.A., Silenkov M.A., Shushkov S.V. Effect of Glow Discharge at Atmospheric Pressure on the Metal Surface //4th Intern. Semin 'Nonequilibrium Processes and their Applications' Minsk. - 1998.- P. 101-104.
 14. Кухарева Н.Г., Силенков М.А., Шушков С.В. Химико-термическая обработка в тлеющем разряде атмосферного давления. //Металловедение и термическая обработка металлов. - 2003. - № 1.- С. 36 - 41.
 15. Босяков М.Н., Величко О.И., Витенчик С.Н. и др. Моделирование процесса ионно - плазменного азотирования // Физика плазмы и плазменные технологии. Материалы конференции. Минск, 1997. - Т. 3. - С. 499 - 500.
 16. Sereda D.Advanced Chromoaluminizing Coatings for Wear and Heat-resistance on Composite Materials under SHS. / Sereda D., Sereda B. //Material science and technology- 2015.. Columbus, OH,USA.- 1821p., P.229-232.
 17. Sereda D. Aluminized Multifunctional Coating on Steel in SHS Condition./ Sereda D., Sereda B. //Material science and technology -2014. Pittsburgh. Pennsylvania USA. 2224p. P.482-486.
 18. Sereda D. Obtaining of Boride Coatings under SHS Conditions for Car Parts./ Sereda D., Sereda B. //Material science and technology- 2016. Salt Lake City, Utah USA 2016-1339p.-P.945-948.
 19. Удовицкий В.И. Антифрикционное пористое силицирование углеродистых сталей. М.: Машиностроение, 1977. – С. 192.
 20. Дэшман С. Научные основы вакуумной техники. М.: Мир, 1964. – С. 673.
 21. Смирнов А.В., Переверзев В.И. Вакуумное силицирование электро-технической стали. //Защитные покрытия на металлах. Киев. «Наукова думка». - 1968. – Вып.2.- С. 202 - 203.
 22. Ляхович Л.С. и др. Силицирование железной металлокерамики. //Известия АН СССР, 1971. - № 2. - С. 66 - 72.
 23. Вегер Р.А., Гейдерих В.А., Герасимов Я.И. «Изв. СССР - Неорганические материалы, 1965. - Т.1.- № 10.
 24. Удовицкий В.И. Долговечность диффузионного насыщения кремнием деталей машин. М.: Машиностроение, 1983. – С. 240.

УДК 669.136.9

Кругляк І.В., к.т.н., Кругляк Д.О., к.т.н., Середя Д.Б., аспірант

Запорізька державна інженерна академія

ОТРИМАННЯ БАГОТОКОМПОНЕНТНИХ СИЛІЦІЙОВАНИХ ПОКРИТІВ В РЕЖИМІ ГОРІННЯ СВС - СИСТЕМ

У роботі розглянуто методи отримання силіційованих покриттів та представлена нова технологія формування захисних покриттів на сталях в умовах горіння, що відбувається при саморозповсюджувальному високотемпературному синтезі. Із застосуванням методів математичного моделювання, при отриманні корозійностійких та жаростійких покриттів на деталях машин в умовах саморозповсюджувального високотемпературного синтезу, розроблені оптимальні склади СВС- шихт. Дослідження корозійної стійкості та жаростійкості, проводили на сталях 20, 45 і У8А, легованих титаном, хромом, алюмінієм, бором та вольфрамом. Отримано підвищення корозійної стійкості та жаростійкості в 2-3 рази.

Ключові слова: математичне моделювання, корозійна стійкість, жаростійкість, синтез.

I. Krygljak, D. Krygljak, D. Sereda

Zaporizhska 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.*