

УДК 621.793.6:669.35

С.Н. Ткаченко*Классический частный университет***МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ И ИНСТРУМЕНТА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ МЕТОДОМ СВС**

В данной статье представлены результаты исследования моделирования скорости химической реакции для повышения эксплуатационных свойств поверхности деталей, механизмов, узлов, агрегатов, используемых в сельском хозяйстве, модифицированных методом СВС. Установлено, что метод СВС позволяет получить показатели качества материалов путем подбора соответствующего состава шихты и иницирования реакции горения с выделением большого количества теплоты при управлении временем химической реакции процесса при формировании поверхности достаточно высокого качества.

Ключевые слова: самораспространяющийся высокотемпературный синтез, шихта, скорость химической реакции, поверхностное упрочнение, поверхностный слой, микроструктура.

С.М. Ткаченко**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ХІМІЧНОЇ РЕАКЦІЇ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ТА ІНСТРУМЕНТА СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ПРИЗНАЧЕННЯ МЕТОДОМ СВС**

У даній статті представлені результати дослідження моделювання швидкості хімічної реакції для підвищення експлуатаційних властивостей поверхні деталей, механізмів, вузлів, агрегатів, які використовуються в сільському господарстві, модифікованих методом СВС. Встановлено, що метод СВС дозволяє отримати показники якості матеріалів шляхом підбору відповідного складу шихти та ініціювання реакції горіння з виділенням великої кількості теплоти при керуванні часом хімічної реакції процесу при формуванні поверхні досить високої якості.

Ключові слова: саморозповсюджуваний високотемпературний синтез, шихта, швидкості хімічної реакції, поверхневе зміцнення, поверхневий шар, микроструктура.

S. Tkachenko**MATHEMATICAL MODELING OF THE CHEMICAL REACTION RATE TO INCREASE OPERATIONAL PROPERTIES OF PARTS AND TOOLS OF AGRICULTURAL APPOINTMENT BY SHS METHOD**

The issue of increasing the service time of parts due to surface hardening is actual. One of the most effective technological direction of increasing the reliability of the operation of the serviceability of high-carbon materials used in the industry is the application of various coatings on their working surfaces. The coating is a surface layer that can be exposed to the environment on the surface of the part and is characterized by a finite thickness, as well as chemical composition and structural-phase state, qualitatively different from those of the base material. The low material cost of the coating and the high surface characteristics of the part provide an increased interest in the development of new coating methods for a specific purpose and the widespread introduction of coatings into the industry. An effective (with respect to the substrate) method of surface improvement is chemical-thermal treatment (CTT) under conditions of self-propagating high-temperature synthesis (SHS). This article presents the results of the study of the operability of the surface of parts, mechanisms, units of aggregates used in agriculture, modified by the SHS method, and the effect of subsequent heat treatment on wear resistance. It is established that the SHS method makes it possible, by selecting the appropriate composition of the charge and initiating the combustion reaction with the release of a large amount of heat, to control the duration of chemical reaction of the process when forming a surface of sufficiently high quality.

Keywords: self-propagating high temperature synthesis, burden, chemical reaction rate, surface hardening, surface layer, microstructure.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими задачами. Актуальным является вопрос повышения эксплуатационного срока службы деталей, за счет поверхностного упрочнения. Одним из наиболее эффективных направлений технологического повышения эксплуатационной стойкости деталей из высокоуглеродистых материалов, которые используют в индустрии, является нанесение на их рабочую поверхность различных покрытий. Покрытие представляет поверхностный слой, который целенаправленно создается на поверхность детали, и характеризуется конечной толщиной, а также химическим составом и структурно-фазовым состоянием, качественно отличающимся от аналогичных характеристик материала основы. Не значительная затрата материала для покрытия и высокие характеристики поверхности детали обеспечивают повышенный интерес к разработке новых

методов нанесения покрытий и широкое внедрение деталей с такими покрытиями в промышленность.

Эффективным методом улучшения поверхности является химико-термическая обработка (ХТО) в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). СВС является эффективным энерго- и ресурсосберегающим методом получения тугоплавких и композиционных материалов [1-2] и порошков для газотермического напыления [3].

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

- 1) формирование активных химических и термических зон, что позволяет интенсифицировать превращения реагентов и приводит к образованию нужных продуктов;
- 2) использование менее дорогой химической энергии (тепловыделение при экзотермических реакциях) вместо электрической для достижения высоких температур, требуемых при получении продуктов;
- 3) использование относительно простого оборудования (вместо печей и других нагревательных устройств);
- 4) использование в процессе быстрого послойного нагрева больших объемов реагентов вместо медленного прогрева через стенки от внешних источников тепла.

В зависимости от условий реализации СВС можно получать диффузионные слои в режиме горения или теплового самовоспламенения при времени процесса от нескольких минут до 1-1,5 ч. При этом формируется прочное тонкое покрытие с регулируемой толщиной в пределах 5 — 150 мкм [34]. При диффузионном насыщении можно получать равномерные по толщине покрытия на изделиях сложной формы [35].

СВС обладает рядом специфических черт, которые выгодно отличают его от существующих способов получения неорганических соединений. К ним следует отнести высокие температуры и малое время проведения синтеза, относительно малые внешние энергетические затраты, простота оборудования, и что самое главное возможность управления процессом синтеза, и, как следствие, получение материалов с заданным сочетанием свойств [20, 21].

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

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

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

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

Повышение эксплуатационных свойств деталей машин и механизмов представлены в работах [4-13], связанные с применением новых составов электродных материалов и современного оборудования, обеспечивающих развитие технологии электроискрового легирования (ЭИЛ). Показано, что для улучшения свойств необходим подбор соответствующих электродных материалов. Рекомендуется для обеспечения защитных свойств в зависимости от условий

эксплуатации покрытий применяют синтетические твердосплавные инструментальные материалы (СТИМ), полученные по технологии СВС. В качестве основы этих материалов применяется карбид титана, бора или хрома, который обеспечивает твердость и износостойкость. Для обеспечения высокой когезии и пластичности формируемых покрытий служат добавки Ni; NiAl; TiAl; ХН70Ю и др.

В процессе ЭИЛ ударно-тепловое воздействие искрового разряда приводит к формированию мелкозернистой структуры на рабочей поверхности материала электрода. Идет усталостное разрушение зерен карбида титана, взаимодействие с воздухом, в канале разряда, и уже в структуре покрытия размер зерен составляет 100-500 нм. Анализ микроструктур покрытий на титановой подложке ОТ4-1, полученных с использованием электрода на основе TiC-Ti₃AlC₂ и из этого же сплава, но модифицированного нанодобавкой W, позволил [9, 10] установить позитивное влияние нанодобавок. Электроискровые покрытия с нанодобавками имеют повышенные значения толщины, сплошности, микротвердости, жаростойкости, при этом снижается коэффициент трения [4, 5, 10, 11]. Добавки нанопорошков обеспечивают значительное модифицирование структуры электродных материалов от 2 до 7 раз и повышение их физико-химических свойств [6-13]. По данным работы [11] по технологии горячего прессования из нанодисперсного порошка 92% WC - 8% Co получен наноструктурный электродный материал с размером зерна карбида вольфрама 100 нм. Применение такого электрода по сравнению с обычным электродом ВК8 (размер зерен WC=1-2 мкм), способствовало повышению характеристик покрытия, а именно твердости (H_ц) модуля упругости, сплошности, толщины и др.

Постановка задачи. Экспериментальные данные по исследованию процессов насыщения поверхности элементами свидетельствуют о том, что процесс насыщения ведется весьма активной поставкой насыщаемого компонента к поверхности детали. В этом случае концентрация насыщаемого элемента на поверхности будет определяться способностью материала подложки поглощать элемент среды. Это соответствует тому, что газовая среда обеспечивает высокую производительность поставки компонента, а граничные условия определяются способностью материала детали поглощать поставляемый компонент из соображений растворимости его в твердой фазе. Для решения задачи выяснения природы и причин ускорения процессов насыщения многокомпонентными упрочняющими покрытиями в условиях СВС целесообразно формализовать задачу и рассмотреть ее в рамках математической модели.

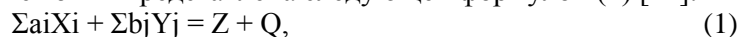
Математическая модель. Задачей данного вида ХТО является придание поверхности упрочняемых материалов высоких поверхностных физико-механических характеристик при минимальном времени проведения процесса, а также минимальных экономических затратах. Сущность процесса заключается в том, что после локального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

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

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

- 1) на стадии подготовки шихты;
- 2) на стадии проведения процесса, включая термический подогрев системы;
- 3) при охлаждении готовых продуктов, а именно изменение температурного режима охлаждения и типа используемой атмосферы.

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



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

Благодаря тому, что коэффициенты диффузии в твердой фазе всегда намного меньше коэффициента температуропроводности, в тепловой зоне находится много реакционных ячеек, которые можно рассматривать как точечные источники тепла. Это позволяет задачи о распространении пламени и диффузионном взаимодействии реагентов расщепить, а результаты независимого решения диффузионной задачи представить в виде кинетического уравнения.

Таким образом, в теории идеального твердого пламени (ИТП) гетерогенная среда представлена в виде гомогенной (по отношению к теплопередаче), что позволяет свести подход к описанию ИТП и использовать уравнение теплопроводности для рассмотрения ИТП в одномерной постановке, типичной для многих автоволновых процессов горения:

Уравнение теплопроводности с учетом источника от химической реакции образца детали, упрочненной методом СВС, имеет следующий вид:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q\Phi(T(x,t)). \quad (2)$$

Далее представим начальные и граничные условия протекания реакции СВС:

$$T(x,0) = T_0, \quad T(0,t) = T_a, \quad \frac{\partial T(\infty,t)}{\partial x} = 0.$$

В уравнении (1) приняты следующие обозначения: t – время, x – координата, c – удельная теплоемкость, ρ – плотность, T – температура, λ – коэффициент теплопроводности, Q – тепловой эффект реакции, $\Phi(T(x,t))$ – скорость химической реакции, T_0 – начальная температура, T_a – температура поджигающей стенки на границе $x = 0$.

Скорость химических реакций $\Phi(T(x,t))$ определяется из решения задачи химического реагирования в реакционной ячейке.

$$\frac{\partial d_1}{\partial t} = D(T) \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial d_1}{\partial r} \right) - d_1 d_2 k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (3)$$

$$\frac{\partial d_2}{\partial t} = D(T) \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial d_2}{\partial r} \right) - d_1 d_2 k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (4)$$

$$D(T) = D_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (5)$$

Начальные условия для уравнений (3) – (4).

$$d_1(x,r,0) = \begin{cases} d_{10}, 0 < r < r_m, \\ 0, r < r < r_0, \end{cases} \quad d_2(x,r,0) = \begin{cases} d_{10}, 0 < r < r_m, \\ 0, r < r < r_0, \end{cases} \quad (6)$$

Полагая, что реакционная ячейка окружена себе подобными, можно записать граничные условия для уравнений (2) – (3) в виде:

$$\frac{\partial d_1(x,0,t)}{\partial r} = \frac{\partial d_1(x,r_0,t)}{\partial r} = \frac{\partial d_2(x,0,t)}{\partial r} = \frac{\partial d_2(x,r_0,t)}{\partial r} = 0. \quad (7)$$

Из решения задачи (2)–(3) с начальными и граничными условиями (6) – (7) определяется средняя по объему ячейки скорость химической реакции $\Phi(T(x,t))$ в виде:

$$\Phi(T(x,t)) = \frac{1}{r_0^3} \int_0^{r_0} d_1 d_2 k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT(x,t)}\right) r^2 dr. \quad (8)$$

Обозначения: d_1, d_2 – плотность реагентов, r – координата сферической системы координат, E, k_0 – энергия активации и предэкспоненциальный множитель в законе Аррениуса для скорости химической реакции, $D(T)$ – коэффициент диффузии, E_d – энергия активации диффузии, D_0 – предэкспоненциальный множитель в зависимости диффузии от температуры.

Получаемая средняя по ячейкам скорость химической реакции в зависимости от температуры, зависящей от координаты и времени (8), используется в уравнении (2).

Система уравнений (2) – (8) записывалась в традиционных в теории горения безразмерных переменных и параметрах. В качестве масштабов были выбраны: $t_* = \frac{c\rho RT_a^2}{Qd_{11}d_{21}Ek_0 \exp(-E/RT_a)}$,

$x_* = \sqrt{t_* \lambda / c\rho}$, $T_a = T_0 + Qd_{11}/(c\rho)$. В реакционной ячейке в качестве масштаба по пространству принят ее радиус: $r = r/r_0$. Для газообразного пламени (ГП) система уравнений имеет два существенных отличия от аналогичной системы.

С учетом выбранных масштабов безразмерная постановка задачи (2) – (8) принимает вид:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} + \bar{\Phi}(\theta(\xi, \tau)),$$

$$\frac{\partial c_1}{\partial \tau} = \frac{Le}{R_0^2} \exp\left(E_D \frac{\theta}{1 + \beta\theta}\right) \frac{1}{\bar{r}^2} \frac{\partial}{\partial r} (\bar{r}^2 \frac{\partial c_1}{\partial r}) - \gamma c_1 c_2 \exp\left(\frac{\theta}{1 + \beta\theta}\right), \quad (9)$$

$$\frac{\partial c_2}{\partial \tau} = \frac{Le}{R_0^2} \exp\left(E_D \frac{\theta}{1 + \beta\theta}\right) \frac{1}{\bar{r}^2} \frac{\partial}{\partial r} (\bar{r}^2 \frac{\partial c_2}{\partial r}) - \gamma c_1 c_2 \exp\left(\frac{\theta}{1 + \beta\theta}\right). \quad (10)$$

Начальные и граничные условия в безразмерных переменных запишутся следующим образом:

$$\theta(\xi, 0) = \theta_0, \quad \theta(0, \tau) = 0, \quad \frac{\partial \theta(\infty, \tau)}{\partial \xi} = 0, \quad (11)$$

$$c_1(\xi, \bar{r}, 0) = \begin{cases} 1, & 0 < \bar{r} < \bar{r}_m, \\ 0, & \bar{r}_m < \bar{r} < 1, \end{cases} \quad c_2(\xi, \bar{r}, 0) = \begin{cases} 1, & 0 < \bar{r} < \bar{r}_m, \\ 0, & \bar{r}_m < \bar{r} < 1, \end{cases} \quad (12)$$

$$\frac{\partial c_1(\xi, 0, \tau)}{\partial \bar{r}} = \frac{\partial c_2(\xi, 0, \tau)}{\partial \bar{r}} = \frac{\partial c_1(\xi, r_0, \tau)}{\partial \bar{r}} = \frac{\partial c_2(\xi, r_0, \tau)}{\partial \bar{r}} = 0, \quad (13)$$

$$\bar{\Phi}(\theta(\xi, \tau)) = \frac{1}{\bar{r}_0^3} \int_0^{\bar{r}_0} c_1 c_2 \exp\left(\frac{\theta(\xi, \tau)}{1 + \beta\theta(\xi, \tau)}\right) \bar{r}^2 d\bar{r}. \quad (14)$$

Получившиеся параметры задачи характеризуют: $Le = D_0 / (\lambda / c\rho)$ – интенсивность диффузии, $R_0 = r_0 / \zeta_*$ – размер гетерогенной структуры, $E_D = E_d / E$ – энергию активации диффузии, $\gamma = \frac{c\rho}{Qd_{11}} \frac{RT_a^2}{E}$ – тепловой эффект реакции, $\beta = RT_a / E$ – энергию активации химической реакции.



Рис. 1. – Адиабатическая структура идеального твердого пламени

На рис. 1 приведена адиабатическая температура ИТП, она отражает подчеркнутые выше особенности. Для неадиабатических волн, когда имеют место теплопотери в окружающую среду, возможно сильное понижение T_m и недогорание при сохранении скорости распространения волны. Первая из вышеприведенных особенностей твердого пламени (ТП) связана с отсутствием продольного диффузионного переноса, вторая и третья – с сильным кинетическим торможением тепловыделения. Благодаря гетерогенности среды, торможение тепловыделения может быть связано со структурными факторами и зависеть от распределения частиц реагентов по размерам.

Микроструктура упрочненных деталей методом СВС для разных марок - сталь 45 и сталь 40, а также разных добавок приведена на рис. 2.

Результаты моделирования, анализ реакций, протекающих при методе СВС, а также эксперименты и металлографические исследований позволили получить схему образования

защитных покрытий. Процесс формирования защитных покрытий в режиме теплового самовоспламенения условно можно разделить на пять стадий.

На начальной стадии (стадия I – 0- τ_1) происходит инертный прогрев смеси до температуры самовоспламенения.

На стадии II – стадии теплового самовоспламенения (τ_1 - τ_2), происходит подъем температуры самовоспламенения со скоростью 200-400 °C/с до максимального значения.

На III стадии – стадии прогрева изделий (τ_2 - τ_3) происходит падение температуры до T_x за счет приема выделившегося тепла изделиями.

На IV стадии – стадии изотермической выдержки (τ_3 - τ_4), происходит формирование постоянного диффузионного потока образующихся активных атомов кремния и бора.

На V стадии – стадии охлаждения (τ_4 - τ_5), происходит формирование диффузионного слоя с меньшей интенсивностью за счет уменьшения коэффициента диффузии кремния и бора из-за падения температуры, а также из-за обеднения шихты.

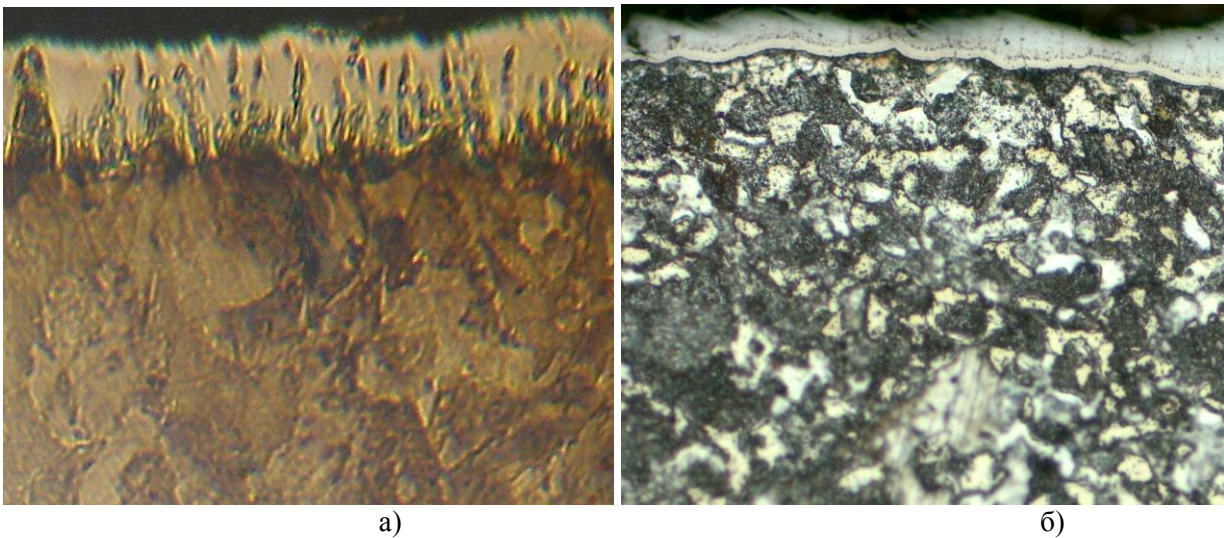


Рис. 2. – Микроструктура борированной поверхности стали 45, х 200 (а), и силицированной стали 40, х 200 (б)

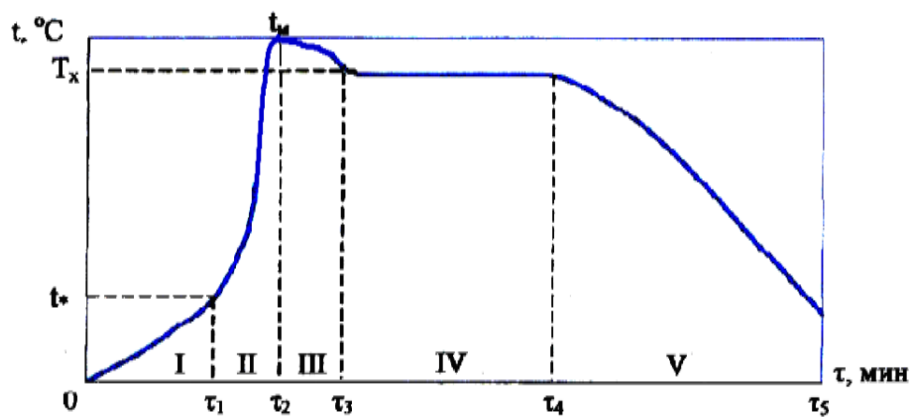


Рис. 3. – Характерный ход температурной кривой при образовании защитных покрытий в режиме теплового самовоспламенения для подложки с графитовой основой.

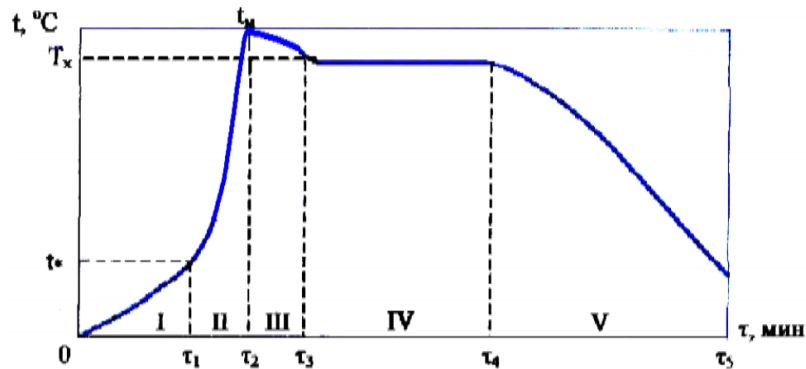


Рис. 4. – Характерный ход температурной кривой при образовании защитных покрытий в режиме теплового самовоспламенения для подложки с металлической основой

Практическое применение. Одним из потребителей использования деталей с поверхностным упрочнением является сельское хозяйство. Самой распространенной технологической операцией является: вспашка, культивация, кошение трав, уборка зерновых и технических культур, измельчение силоса, боронование, что составляет 70% от всего объема механизированных работ. При взаимодействии с грунтом детали машин и агрегатов, соприкасающиеся с грунтом подвергаются интенсивному абразивному изнашиванию. Затупившийся в процессе эксплуатации инструмент увеличивает тяговое сопротивление и поэтому снижает производительность, при этом расход топлива возрастает на 15-20 %. Для изготовления деталей, которые контактируют с грунтом, применяют сталь 45 и сталь 40.

Для упрочнения деталей из данных марок применяют термообработку, приводящую к твердости 45-50 HRC и ударной вязкости. Помимо этого, для повышения долговечности деталей, рабочих частей агрегатов, применяется индукционная наплавка, плазменное напыление, газопламенная наплавка, плакирование и др. В результате таких операций повышается износостойкость деталей, подверженных абразивному износу. В сельском хозяйстве ежегодно потребляется огромное количество (100-400 тыс.) лап культиваторов и сеялок.

Помимо интенсивного абразивного износа сельхозтехника подвергается существенной коррозии из-за эксплуатации ее в почве, которая является агрессивной средой для соприкасающихся с ней деталей. Для борьбы с коррозией методом СВС в шихту на основе кремния добавляется хром, который сам по себе входит в состав экзотермической смеси для инициации реакции.

В качестве альтернативы достижения высокой износостойкости является применение твердых сплавов, состоящих из карбидов (TiC, WC, VC, NbC, MoC) и связующей фазы, изготавливаемых методом порошковой металлургии.

Отличной альтернативой повышения твердости и износостойкости деталей является метод СВС, который за счет использования тепловой энергии экзотермических реакций и скорости проведения процесса позволяет получить результат за 30-40 мин с учетом изотермической выдержки, вместо 8-10 ч. методом ХТО.

Методом СВС улучшается скольжение подшипников на воздухе, если в шихту добавлять 1,5 - 2 масс.% масла и охлаждать спеченные детали в масляной ванне. Такой оригинальный способ уменьшает поверхностное окисление при горении, так как горящее масло образует восстановительную среду - сажу. Охлаждение в масле после спекания также уменьшает окисление и совмещает операции охлаждения и пропитки, необходимой для придания подшипникам эффекта самосмазывания. Данный эффект у материалов проявляется более четко благодаря особенностям формирования пористого каркаса. Если при обычном печном спекании количество пор зависит главным образом от усилия прессования, крупности порошка, то в случае СВС образуются дополнительные пористые каналы, упрочненные интерметаллидными слоями. Это происходит благодаря образованию в локальных очагах горения жидкой фазы, которая всасывается тугоплавкой основой, образуя равномерно распределенные включения износостойких интерметаллидов и оставляя после себя сферообразные сообщающиеся поры-каналы. В процессе эксплуатации втулок-подшипников в порах накапливается, циркулирует масло, уменьшая износ самосмазывающегося узла трения. Для образования такой системы пор необходимо соблюдение оптимальных соотношений порошковых компонентов. Пористость образуется, когда металлический каркас матрицы (медь) более тугоплавкая, чем отдельные включения легкоплавкого

металла-воспламенителя (алюминия). В этом случае дисперсное упрочнение происходит посредством пустотелых трубообразных включений интерметаллидов, образующихся по стенкам пористых каналов. Судя по одномерной направленности капилляров, можно предположить, что движение жидкой фазы ориентировано соответственно фронту распределения волны горения. По-видимому, такие структурно-направленные пористые материалы могут иметь большое значение для получения фильтров.

Наличие равномерно расположенных в материале реакционно-взаимодействующих ячеек (места контактов разноименных частиц) является причиной возникновения температурного градиента в промежутках между ними. Это способствует возникновению дополнительного капиллярного теплопереноса жидкой фазы, образующейся возле локальных источников горения и равномерно перераспределяющейся по объему пористого каркаса.

Выводы. Таким образом, в работе представлены результаты моделирования скорости химической реакции и исследование повышения эксплуатационных свойств поверхности деталей, механизмов, узлов, агрегатов, используемых в сельском хозяйстве, модифицированных методом СВС. Установлено, что метод СВС позволяет получить показатели качества материалов путем подбора соответствующего состава шихты и иницирования реакции горения с выделением большого количества теплоты при управлении временем химической реакции процесса при формировании поверхности достаточно высокого качества. Что, позволило условно разделить на пять стадий процесс формирования защитных покрытий в режиме теплового самовоспламенения в котором: на начальной стадии (стадия I) происходит инертный прогрев смеси до температуры самовоспламенения, на стадии II происходит подъем температуры самовоспламенения со скоростью 200-400 °С/с до максимального значения, на стадии III происходит падение температуры за счет нагревания изделия, на стадии IV происходит формирование постоянного диффузионного потока образующихся активных атомов примеси и на стадии V происходит формирование диффузионного слоя.

Дальнейшие перспективы применения СВС для повышения эксплуатационных свойств деталей и инструмента сельскохозяйственного назначения имеют огромный потенциал, как в плане экономия за счет использования энергии экзотермических реакций так и в результате получения конечных свойств готового продукта.

Список использованных источников

1. Мержанов, А.Г. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез / А.Г. Мержанов // Под. ред. Я.М. Колотверкина. - М.: Химия, 1983. - С. 6-45.
2. Левашов, Е.А. Физико-химические и технологические основы самораспространяющегося синтеза / Е.А. Левашов, А.С. Рогов, В.И. Юхнин. - М.: Бином, 1999. - 176 с.
3. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез порошков для газотермического напыления / А.Ф. Ильющенко, А.В. Беляев, Т.Д. Талако и др. // Технология ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки: материалы 8-й междунар. практич. конф.-выставки: в 2 ч. Часть 1. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. -С. 135-139.
4. Левашов Е.А. Перспективы применения сплава СТИМ 3Б модифицированного нанокристаллическим порошком ZrO_2 , в технологии электроискрового легирования / Е.А. Левашов, А.Е. Кудряшов, О.В. Малочкин // Изв. ВУЗов. Цветная металлургия. - 2000. - №5. - С. 68-72.
5. Об особенностях влияния нанокристаллических порошков на процессы горения и формирования составов / Е.А. Левашов, А.Е. Кудряшов, О.В. Малочкин и др. // Изв. ВУЗов. Цветная металлургия. - 2001. - №1. - С.53-59.
6. Левашов Е.А. О влиянии нанокристаллических порошков на процесс формирования, структуру и свойства электроискровых покрытий на основе титанохромового карбида / Е.А. Левашов, А.Е. Кудряшов, О.В. Малочкин // Изв. ВУЗов. Цветная металлургия. - 2001. - №3. - С. 44-51.
7. Кудряшов А.Е. Разработка и промышленное применение новых композиционных материалов и технологии электроискрового легирования / А.Е. Кудряшов // Автореф. дис. к.т.н. - М., 2001. - 19с.
8. Исследование влияния добавки нанокристаллического порошка оксида циркония различной природы на состав, структуру и физико-механические свойства твердого сплава СТИМ-3Б / Е.А. Левашов, А.Е. Кудряшов, Ю.С. Погожев и др. // Физика металлов и металловедение. - 2003. - Т. 96. - №2. - С. 87-94.
9. Особенности влияния нанокристаллических порошков на структуру и свойства сплава Ti – 40% ХН70Ю, полученного методом СВС / Е.А. Левашов, Е.С. Мишина, Б.Р. Сетулин и др. // Физика металлов и металловедение. - 2003. - Т. 96. - № 6. - С. 58-64.
10. Исследование кинетики формирования структуры, состава и свойств электроискровых покрытий на титановом сплаве ОТ4-1 из модифицированных электродных материалов на основе TiC-ХН70Ю / Е.А. Левашов, А.Е. Кудряшов, Е.С. Мишина и др. // Изв. ВУЗов. Цветная металлургия. - 2004. - №1. - С. 68-76.
11. Исследование влияния параметров импульсных разрядов на массоперенос, структуру, состав и свойства электроискровых покрытий на основе TiC-NiAl, модифицированных нанодисперсными компонентами / Е.А. Левашов, А.Е. Кудряшов, Ю.С. Погожев и др. // Изв. ВУЗов. Цветная металлургия. - 2004. - №6. - С. 39-46.

12. Особенности влияния добавок нанодисперсных тугоплавких частиц на состав, структуру и физико-механические свойства твердого СВС - сплава СТИМ-40НА (система TiC-NiAl) / Ю.С. Погожев, Е.А. Левашов, А.Е. Кудряшов и др. // Цветные металлы. - 2005. - №1. - С. 59-64.
13. Упрочнение деталей и инструмента методом электроискрового легирования и применением новых электродных материалов / Е.И. Замулаева, Е.А. Левашов, А.Е. Кудряшов и др. // Технология ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки: материалы 8-й междунар. конф.-выставки: в 2 ч. Часть 2. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. - С. 200-209.
14. Евтушенко А.Т. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез инструментальной стали / А.Т. Евтушенко, С. Пазаре, С.С. Горбунов // МИТОМ. - 2007. - №4. - С. 43-46.
15. Архипов В.Н. Повышение стойкости инструмента методом СВС / В.Е. Архипов, Г.В. Москвитин, А.П. Поляков // СТИН. -2008. -№1.- С. 19-21.
16. Покрытия на основе хрома и бора, полученные методом СВС / В.Е. Архипов, Л.И. Куксенова, Г.В. Москвитин и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. -2008.- №4.- С. 28-32.
17. Рыбакова Л.М. Рентгенографический метод исследования структурных изменений в тонком поверхностном слое металла при трении / Л.М. Рыбакова, Л.И. Куксенова, С.В. Босов // Заводская лаборатория.- 1973. -№3.- С. 293-296.
18. Борисова А.Л. Использование процессов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / А.Л. Борисова, Ю.С. Борисов // Порошковая металлургия. — 2008. — №1/2. — С. 105-125.
19. Шаривкер С.Ю. СВС-порошки и их технологическая переработка / С. Ю. Шаривкер, А. Г. Мержанов — Черноголовка, 2000. — 123 с.
20. Истин В. И. Высокотемпературный синтез интерметаллических соединений: Монография / В. И. Истин, Ю. С. Найбороденко. — Томск: Изд. ТГУ, 1989. — 214 с.
21. Евтектичні градієнтні зносостійкі матеріали / М.І. Павечко, Г.С. Ершов, К.О. Ленік та ін. // Порошковая металлургия. — 1999. — №7/8. — С. 17-21.
22. Мержанов А.Г. Твердо-пламенное горение / А.Г. Мержанов — Черноголовка: ИСМАН, 2000. — 244 с.
23. СВС дисперсных алюминидов никеля на их основе / Б.М.Вольпе, В.В.Евстигнеев, И.В.Милоков [и др.] // Физика и химия обраб. материалов. — 1996. — №1. — С. 50-54.
24. СВС дисперсных материалов Ti-Al и защитные покрытия на их основе / Б. М. Вольпе, В. В. Евстигнеев, И. В. Милоков [и др.] // Физика и химия обраб. материалов. — 1995. — №2. — С. 73-79.
25. Исследование свойств газотермических покрытий и композиционных порошков никель-карбид титана и хрома / И. Н. Горбатов, В. М. Шкиро, А. С. Терентьев [и др.] // Физика и химия обраб. материалов. — 1991. — №4. — С. 102-106.
26. Особенности структуры и свойств композиционных материалов на основе карбида титана с добавками меди / Т.А.Азарова, П.А.Витязь, Б.А.Вилаге [и др.] // Порошковая металлургия. — Минск, 2002. — Вып.25. — С. 85-89.
27. СВС-порошки для газотермических покрытий, работающих в условиях комплексного воздействия коррозии и износа / А.Ф.Илющенко, А.В.Беляев, Т.Л.Талако [и др.] // Порошковая металлургия. — Минск, 2000. — Вып.23. — С. 54-57.
28. Газотермические покрытия из композиционных порошков на основе карбида титана-хрома / И.Н. Горбатов, А.Д. Панасюк, Л.К. Шведова [и др.] // Защитные покрытия на металлах. — 1991. — №25. — С. 22-25.
29. Структура и свойства газотермических покрытий на основе карбида титана, оксидов титана и хрома, содержащих твердые смазки / А. Л. Борисова, Л. И. Адева, А. Ю. Туник [и др.] // Автомат. сварка. — 1999. — №1. — С. 22-27.
30. Амосов А.П. Порошковая технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза материалов / А. П. Амосов, И. П. Боровинская, А. Г. Мержанов — М.: Машиностроение-1, 2007. — 567 с.
31. Покрытия на основе хрома и бора полученные методом СВС / В. Е. Архипов, Л. И. Куксенова, Г. В. Москвитин [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2008. — №4. — С. 25-30.
32. Гордиенко С. П. Взаимодействие титана с нитридом бора в режиме самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / С. П. Гордиенко, Т. М. Евтушок // Порошковая металлургия. — 2001. — №1/2. — С. 76-79.
33. Зозуля В.Д. Принципы создания покрытий на антифрикционных материалах методом СВС / В.Д.Зозуля // Изв. вуз. Цвет. метал. — 1999. — №5. — С. 58-63.
34. Ткаченко С. Н. Поверхностное упрочнение деталей из высокоуглеродистых материалов в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / С.Н.Ткаченко // Восточно-европейский журнал передовых технологий, 2/5, (62), – Харьков, 2013. – С. 30-34.
35. Зозуля В. Д. Принципы создания новых трибологических СВС-материалов / В. Д. Зозуля // Трение и износ. — 1994. — 15, №3. — С. 422-428.
36. Истин В. И. Высокотемпературный синтез интерметаллических соединений: Монография / В. И. Истин, Ю. С. Найбороденко. — Томск: Изд. ТГУ, 1989. — 214 с.

Рецензенти:

Хрипко Сергій Леонідович, професор кафедри інформаційних технологій, к.ф.-м.н, доцент Класичного приватного університету;

Бриков Михайло Миколайович, професор кафедри обладнання і технології зварювального виробництва Запорізького національного технічного університету, д-р техн. наук

Стаття надійшла до редакції 04.05.2017