

## Глава 6. МОДЕЛИРОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДОВ ИНДУКЦИОННОЙ И ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ НАПЛАВКИ ПОРОШКОВЫХ ИЗНОСОСТОЙКИХ И АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ

<sup>1</sup>Белявин К.Е., <sup>2</sup>Сосновский И.А., <sup>3</sup>Кузнечик О.О.

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,  
г. Минск, Беларусь, E-mail: sos3@tut.by

<sup>3</sup>Институт порошковой металлургии, г. Минск, Беларусь

### Введение

В машиностроении уделяется постоянное внимание [1–4] развитию и совершенствованию технологий получения деталей узлов трения и сопряжения, работающих в условиях повышенных удельных механических и тепловых нагрузок, в том числе при ограниченной смазке или ее полного отсутствия, включая абразивный износ. Такие детали узлов трения и сопряжения считаются высоконагруженными. Начиная с шестидесятых годов прошлого столетия, для изготовления таких деталей на предприятиях машиностроения достаточно широко применяют [4–15] технологии, основанные на методах газопламенной, плазменной, электродуговой, лазерной, индукционной и электроконтактной наплавки порошковых износостойких и антифрикционных покрытий. При этом технологии получения высоконагруженных деталей узлов трения и сопряжения, основанные на методах индукционной и электроконтактной наплавки, считаются наименее энергоемкими. Для придания покрытиям высоких износостойких свойств, в качестве исходного сырья, в этих технологиях, как правило [3,8–15], используют порошки самофлюсующихся сплавов на основе никеля (Ni-Cr-B-Si) и железа (Fe-Cr-B-Si), включая твердые сплавы, в том числе карбида вольфрама и кобальтовой связки.

Если контактными поверхностям высоконагруженных деталей узлов трения и сопряжения следует придать повышенные антифрикционные свойства, то в вышеуказанных технологиях в качестве исходного сырья используют порошки самофлюсующихся сплавов на основе меди (Cu-Sn-P-B, Cu-Sn-Zn, Cu-Sn-Pb-Zn, включая их комбинации), а также алюминия (например, Al-Sn-Cu) [8,12,14–21].

Развитию и совершенствованию технологий получения высоконагруженных деталей узлов трения и сопряжения, основанных на методах индукционной и электроконтактной наплавки, может способствовать разработка соответствующей феноменологической модели, моделирование и реализация этих методов с использованием параметрической стабилизации технологических режимов. Целью данной работы является решение этой задачи.

### 1. Анализ методов индукционной и электроконтактной наплавки порошковых износостойких и антифрикционных покрытий

В машиностроительном производстве для реализации этих методов, в основном [8–11,13], используются установки индукционного нагрева и контактной сварки переменным током, имеющими мощность свыше 10 кВт. Использование такого технологического оборудования позволяет обеспечивать при индукционной и электроконтактной наплавке достаточно высокие (102–105 К/с) скорости нагрева, а также способствовать протеканию в наплавляемом порошковом материале высокотемпературного химического синтеза, способствующего образованию в наплавляемом покрытии ультрадисперсной (наноразмерной) упрочняющей фазы. Технологические схемы реализации методов индукционной и электротермической наплавки износостойких и антифрикционных материалов с использованием такого технологического оборудования представлены на рисунке 1.

Из анализа работ [8–11,13,14] следует, что в основе методов индукционной и электротермической наплавки лежат модели, отражающие определенные стадии (рис.2) перехода в твердотельное состояние дисперсно-порошковых сред. При составлении этих моделей используются два подхода, позволяющие рассматривать индукционную и электроконтактную наплавку порошковых материалов как

разновидность спекания под давлением [10,13,22] или сварки давлением [9,11,23]. Причем начальное давление в дисперсно-порошковой среде задается, как правило, механизмами сжатия электродов-пуансонов или за счет действия центробежных сил. Величина этого давления на начальной стадии спекания вызывает упругое сжатие частиц порошка.

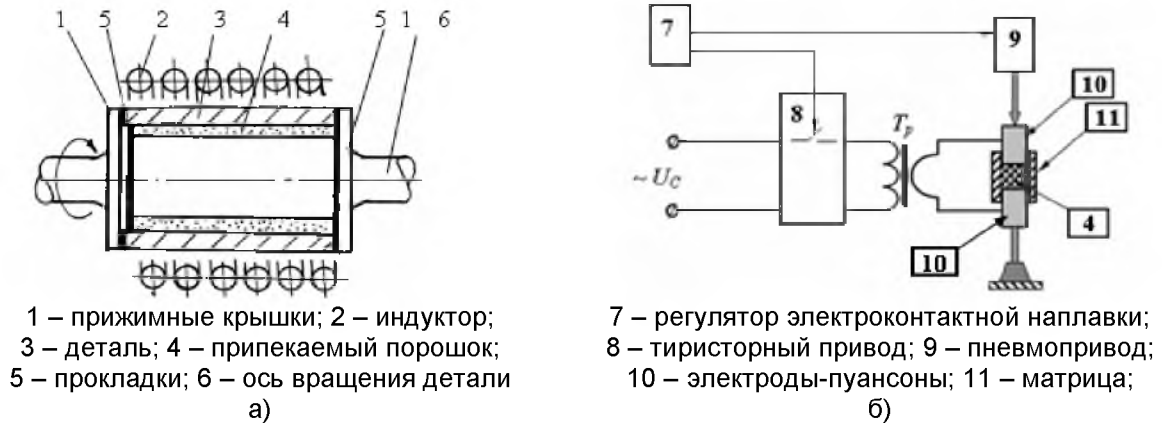
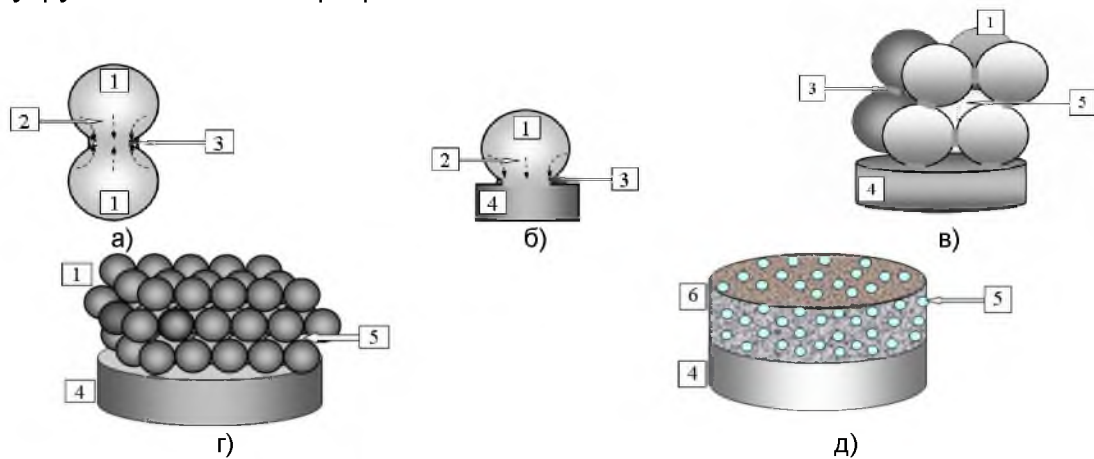


Рисунок 1 – Схемы индукционной (а) и электроконтактной (б) наплавки

Из анализа работ [8–11,13,14] следует, что в основе методов индукционной и электротермической наплавки лежат модели, отражающие определенные стадии (рис.2) перехода в твердотельное состояние дисперсно-порошковых сред. При составлении этих моделей используются два подхода, позволяющие рассматривать индукционную и электроконтактную наплавку порошковых материалов либо как разновидность спекания под давлением [22,10,13,], либо сварки давлением [9,11,23]. Причем начальное давление в дисперсно-порошковой среде задается, как правило, либо механизмами сжатия электродов-пуансонов, либо за счет действия центробежных. Величина этого давления на начальной стадии спекания вызывает лишь упругое сжатие частиц порошка.



а) – зона контакта двух частиц; б) – зона контакта частицы с основой;  
в) – порошковый материал на начальной стадии формирования;  
г) – элементарная ячейка пористого порошкового материала;  
д) – сфероидизация пор порошкового материала на завершающей стадии формирования;  
1 – порошковая частица; 2 – направление переноса материала порошковой частицы;  
3 – контактная зона; 4 – основа; 5 – пора; 6 – порошковый материал

Рисунок 2 – Стадии перехода в твердотельное состояние дисперсно-порошковых сред при формировании покрытий

К недостаткам существующих моделей следует отнести следующее:

- отсутствие учета влияния, на модуль упругости материала частиц порошка и формирование контактных зон этих частиц, сил электростатического взаимодействия между атомами, как тех, что находятся в узлах кристаллической решетки, и тех, что

вместе с электронами внешней оболочки составляют двойной электрический слой [23] на стадии упругого сжатия;

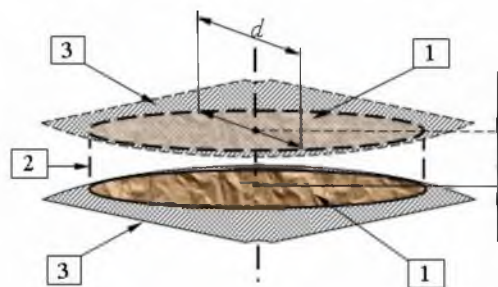
- отсутствие определения характера порошковой усадки при появлении жидкой фазы в зонах контактирующих поверхностей частиц;

- использование в описании процесса контактообразования менее точных усредненных значений температуры, рассчитываемой исходя из теплового воздействия квазипостоянного тока на материал частицы порошка.

## 2 Моделирование процессов индукционной и электроконтактной наплавки порошковых материалов

Известно [3,10,11,22,23], что в состоянии свободной насыпки или упругого сжатия порошковая композиция представляет дисперсно-порошковую среду (ДПС), в которой дисперсной фазой являются твердотельные частицы (в дальнейшем – частицы), а дисперсионной – окружающие эти частицы пустоты, которые могут заполняться газом, смесью газов, а в естественных условиях – воздухом с давлением порядка 100 кПа. По границам раздела фаз, а также в зонах соприкосновения частиц дисперсной фазы, межфазная поверхность имеет множество локальных искривления, что делает ее развитой. Следствием этого является то, что в зонах соприкосновения частиц возникают градиенты избыточных давлений и концентраций атомов с максимумами, лежащими в центрах контактных пятен частиц дисперсной фазы. Несмотря на это, в естественных условиях и при упругом сжатии, у большинства частиц дисперсной фазы крупной, средней, мелкой и тонкой фракции, не наблюдается их соединение, способствующее переходу ДПС в твердотельное состояние.

В естественных условиях на поверхности твердых тел имеется прочный двойной электрический слой [23]. Его появление обусловлено электродинамическим взаимодействием атомов кристаллических решеток поверхностей, в том числе и контактных пятен (рис.3), а также электродинамическим взаимодействием между ядрами атомов и валентными электронами. В зависимости от типа взаимодействия (ковалентного, ковалентно-полярного, ионного или металлического), поверхностный потенциал двойного электрического слоя может быть (рис.4) либо отрицательным (например, у чистых металлов), либо положительным (например, у оксидов). В состоянии свободной насыпки или упругого сжатия, приводящего к сближению контактных зон на расстояния ближе, чем  $10^{-9}$ – $10^{-7}$  м, в которых из-за сил отталкивания кулоновского типа формируется расклинивающее давление, способствующее появлению между контактными пятнами межчастичного зазора (рис.3).

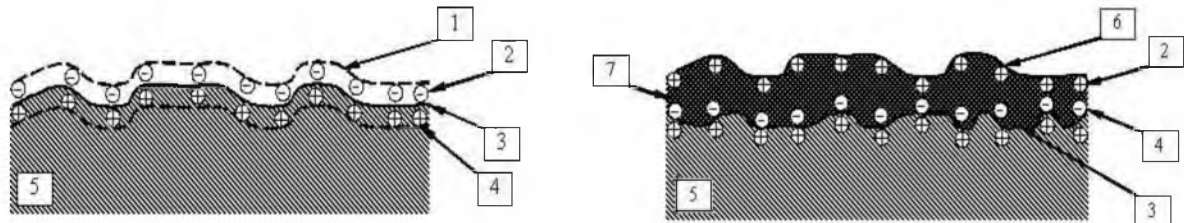


1 – контактное пятно; 2 – межчастичный зазор; 3 – фрагмент поверхности частицы;  
 $d$  – диаметр контактного пятна;  $l$  – величина межчастичного зазора  
 Рисунок 3 – Модель зоны соприкосновения частиц дисперсной фазы

Для количественного описания принятых модельных допущений (рис. 3,4) учтем механизм отталкивания контактных пятен, имеющих поверхностный заряд одного знака, а также гипотезу о несплошности твердого тела. При этом будем полагать, что пока межчастичный зазор превышает период кристаллической решетки, расклинивающее давление совпадает с контактным. Расклинивающее давление ( $p$ ) можно определить исходя из величин поверхностного заряда ( $q_2$ ) двойного электрического слоя одного контактного пятна, поверхностного потенциала ( $\phi_1$ )

двойного электрического слоя другого контактного пятна, их площади ( $S_k$ ) и межчастичного зазора ( $l_n$ ):

$$p = -\frac{q_2}{S_k} \frac{\partial \varphi_1}{\partial l_n} \quad (1)$$



а) – металлическая поверхность; б) – окисная поверхность;  
 1 – двойной электрический слой; 2 – электроны; 3 – граница поверхности;  
 4 – ионы; 5 – материал частицы; 6 – внешняя граница окисного слоя;  
 7 – окисный слой

Рисунок 4 – Модель двойного электрического слоя

При усилиях сжатия ДПС, обеспечивающих сближение контактных пятен на расстояние, сопоставимое с периодом кристаллической решетки происходит их сращивание из-за перекрытия внешних электронных оболочек атомов (молекул), находящихся в узлах кристаллических решеток. При сращивании расклинивающее давление перестает существовать.

Учитывая модуль упругости металлов, составляющих основу вышеприведенных порошковых композиций для получения на контактных поверхностях высоконагруженных деталей узлов трения и сопряжения износостойких и антифрикционных покрытий, следует ожидать, что размеры контактных пятен в состоянии свободной насыпки или упругого сжатия состоящих из такого вещества частиц дисперсной фазы, будут не менее, чем на два–три порядка меньше их линейных размеров. Поэтому для частиц дисперсной фазы крупной, средней и тонкой фракции размеры контактных пятен будут лежать в определенных (10–7–10–5 м) пределах, позволяющих при рассмотрении влияния сил отталкивания кулоновского типа на расклинивающее давление использовать переход от гипотезы сплошности к учету межатомных сил взаимодействия в кристаллической решетке. Возможность такого перехода обосновывается электростатической природой модуля упругости ( $E_M$ ) твердых тел, связанной с действием сил кулоновского взаимодействия атомов, исходя из их размеров ( $r_0$ ), теплоемкости ( $c_A$ ) в постоянном объеме и периода кристаллической решетки ( $a_0$ ). Преобразование этой зависимости с учетом возможного полморфизма кристаллических решеток, позволяет представить  $E_M$ , как некоторую функцию, зависящую не только от таких параметров, как  $a_0$ ,  $r_0$ , но также от валентности ( $z_B$ ) атомов и температуры ( $T$ ):

$$E_M(T) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{z_B e}{r_0 a_0 \beta_i} \right)^2 \left( 1 - \frac{T}{T_A - T} \right)^2, \quad (2)$$

где  $T_A = \frac{(z_B e)^2}{\pi \epsilon_0 a_0 c_A}$

$\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная вакуума ( $\approx 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м);

$e$  – элементарный заряд ( $1,6 \cdot 10^{-16}$  Кл);

$\beta_i$  – плотность упаковки, связанная с типом кристаллической решетки.

Используя вышеуказанный пример перехода от гипотезы сплошности к межатомному взаимодействию, выражение (1) можно также преобразовать в подобную с (2), устанавливающую связь между  $l_n$ , с такими параметрами, как  $p$ ,  $z_B$ ,  $r_0$  и  $n_{sk}$  (поверхностной концентрацией):

$$l_n(p) = 2z_e \varphi_e r_0 \sqrt{\frac{\pi \varepsilon \varepsilon_0 n_{sk}}{p}} \quad (3)$$

где  $\varphi_e$  – электрический потенциал валентного электрона;  
 $\varepsilon$  – электрическая проницаемость поверхностного слоя.

Устанавливаемая зависимостью (3) характер изменения величины межчастичного зазора в зависимости от сжимающего давления частиц порошка с модулем юнга порядка 100 ГПа, представлен на рисунке 5.

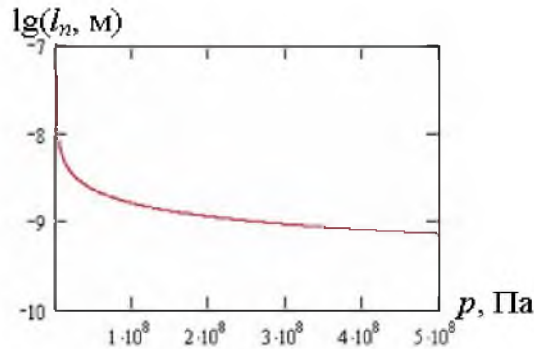


Рисунок 5 – Характер изменения межчастичного зазора в зависимости от сжимающего давления

Согласно квантово-механическим представлениям о строении и проводимости твердых веществ, межчастичный зазор (рис.2) является определенным барьером для перехода электронов или атомов с одного контактного пятна на другое. Если такой барьер считать прямоугольным, то его проницаемость ( $D_B$ ) оценивается по энергии связи  $\Delta W_i$  электронов и атомов (молекул) с поверхностным слоем контактных пятен:

$$D_B(p) = \exp\left(-\frac{4\pi l_n(p)}{h_p} \sqrt{2m_i \Delta W_i}\right) \quad (4)$$

где  $h_p$  – постоянная Планка;

$m_i$  – масса электрона или атома (молекулы);

$$\Delta W_i = W_{oi} - W_a \quad (5)$$

$W_{oi}$  – глубина потенциальной ямы;

$W_a$  – энергия активации, причем:

$$W_a(T) = \Delta \mu_i(T) \quad (6)$$

$\mu_i$  – химический потенциал.

Для определения  $\Delta W_i$  в зависимости (4) необходимо знать величины  $W_{oi}$  и  $W_a$ . Установить  $W_{oi}$  можно для электронов по работе выхода с поверхности известных веществ, для атомов поверхностного слоя – исходя из их общего количества ( $N_i$ ) в веществе контактного пятна, массы ( $m$ ) этого вещества, либо его молярной массы ( $M_1$ ). Как следует из работ [10,11,13], последнее возможно, если известны значения энтальпии ( $H_{mi}$ ) возгонки (при твердофазном спекании) или (при жидкофазном спекании) теплового баланса ( $Q$ ), обеспечивающего нагрев и плавление вещества контактных пятен при заданных удельных значениях теплоемкости ( $c_i$ ), теплоты плавления вещества  $\Lambda_b$ , моля вещества ( $\Lambda_m$ ):

$$W_{oi} = \frac{H_{ii}}{N_a} = \mu_{s0} \quad ; \quad W_{oi} = \frac{Q_a}{N} = \frac{m_a}{N} \left( \Lambda_a + \int_T^{T+\Delta T} c_i T \right)_P = \mu_{oi} \quad W_{oi} = \frac{Q_m}{N_a} = \frac{M_i}{N_a} \left( \Lambda_m + \int_T^{T+\Delta T} c_i dT \right)_P = \mu_{oi} \quad (7)$$

где  $N_a$  – число Авогадро.

Необходимые для выражения (5) величины  $W_a$  можно устанавливать (6) по изменению химического потенциала либо электронов проводимости ( $\mu_e$ ), либо ( $\mu_i$ ) атомов (молекул) кристаллической решетки:

$$\mu_e(\dot{O}) = W_F \left[ 1 - \frac{\pi^2 (k_B T)^2}{12 W_F^2} \right], \quad (8)$$

где  $W_F$  – энергия Ферми  
 $k_B$  – постоянная Больцмана;  
 $T$  – температура;

$$\mu_i = \frac{\hat{O}}{N_i} = \frac{H_w - TS_{\dot{y}}}{N_i} = \frac{W_u + W_s - TS_{\dot{y}}}{N_i} = \frac{W_u + \sigma_S S_{\dot{e}} - TS_{\dot{y}}}{N_i} = W_a - \frac{TS_{\dot{y}} - \sigma_S S_{\dot{e}}}{N_i}, \quad (9)$$

где  $\Phi$  – свободная энергия Гиббса;  
 $S_s$  – энтропия;  
 $W_u, W_s$  – внутренняя и поверхностная энергия атомов контактных пятен;  
 $S_k$  – площадь контактных пятен;  
 $\sigma_s$  – удельная поверхностная энергия, причем:

$$\sigma_S = \left( \frac{d\hat{O}}{dS_{\dot{e}}} \right)_{P,T,n=\frac{N}{S_{\dot{e}}}} = \left( \frac{dF_W}{dS_{\dot{e}}} \right)_{V,T,W_u} = \left( \frac{dW_u}{dS_{\dot{e}}} \right)_{S,V,n} = \left( \frac{dH_w}{dS_{\dot{e}}} \right)_{P,T,n}, \quad (10)$$

где  $F_W$  – свободная энергия Гельмгольца.

В выражении (4) на  $\Delta W_i$  влияет не только химический состав, но также и форма поверхностного слоя контактных пятен. Последнее учтем исходя из соотношения площади ( $S_k$ ) к объему поверхностного слоя ( $V_k$ ) этих пятен, то есть через  $\phi_i = S_k/V_k$ . Это соотношение позволяет обобщить зависимости (6) и (9), представив их следующим равенством:

$$\mu_k = \frac{n_s(k) \sum_i \mu_i n_s(i)}{\sum_i n_s(i)} S_k \quad \mu_i = \mu_0 + \frac{1}{n_s} \left( \frac{R_g T}{S_k} \ln(\alpha_k) + \sigma_S \right) = \mu_0 + \frac{1}{n_v} \left( \frac{R_g T}{V_k} \ln(\alpha_k) + \sigma_S \phi_i \right) \quad (11)$$

где  $n_s, n_v$  – поверхностная и объемная концентрации атомов;  
 $\alpha_k$  – коэффициент термодинамической активности:

$$\alpha_k = \frac{D_i}{D_n},$$

причем

где  $D_n, D_i$  – начальный и текущий коэффициенты диффузии в твердом теле.

Используя значения энтальпии  $H = H_{\mu}(T_x)$  для фазового перехода моля вещества в газообразное (при твердофазном спекании) или жидкое (жидкофазное спекание) состояние, а также  $k_B$  и  $R_g$  (газовую постоянную), зависимости (6) и (7) можно выразить через линейную функцию температуры:

$$T_{xi} = \frac{W_{0i}}{k_B} T_{xi} = \frac{H_{mi}(\text{возгонка})}{R_g} T_{xi} = \frac{H_{oi} + c_i M_i \Delta T}{R_g} \quad T_i = \frac{\Delta \mu_i}{k_B} = \frac{\Delta H_m}{R_g} \quad (12)$$

где  $T_x, T_i$  – температуры фазового перехода и активации.

Выражение (12) позволяет рассматривать проницаемость (4) межчастичного зазора, как барьерную функцию, зависящую не только от контактного давления, но и от температуры:

$$D_A(p, T) = \exp \left( - \frac{4\pi l_i(\delta)}{h_p} \sqrt{2i_i R_g (T_{xi} - T_i)} \right) = \exp \left( - \frac{4\pi l_i(\delta)}{h_p} \sqrt{2m_i k_B (T_{xi} - T_i)} \right). \quad (13)$$

Для случая, связанного с работой выхода электрона с поверхности ( $W_{0e}$ ) контактного пятна, в качестве  $T_{xi}$  для (13) можно использовать  $T_e = W_{0e}/k_B$ .

Рассмотрим, как проницаемость межчастичного зазора влияет на вероятность возникновения диффузионных потоков атомов и электронов между контактными пятнами. Принимая во внимание, что основу вышеприведенных порошковых композиций для наплавки на контактирующие поверхности высоконагруженных

деталей узлов трения и сопряжения износостойких и антифрикционных покрытий составляют металлы, отнесем вещество частицы дисперсной фазы к проводникам первого рода. Тогда, учитывая зависимости (7)–(9), а также закон Фика, диффузионные потоки ( $J_i$ ) электронов и атомов будут зависеть от коэффициента самодиффузии ( $D_k$ ) этих частиц, а также их градиентов либо химического потенциала ( $\mu_i$ ), либо объемной концентрации ( $n_i$ ):

$$J_i = -\frac{n_i D_k}{R_g T} \text{grad}(\mu_i) = -D_k \cdot \text{grad}(n_i) \quad (14)$$

Используемый в выражении (14) коэффициент самодиффузии, с учетом модели Верта-Зинера и устанавливаемой (4) и (13) проницаемости межчастичного зазора для электронов и атомов, можем определить определяться с помощью уравнения Аррениуса, имеющего следующий вид:

$$D_k = D_B \varepsilon_i a_0^2 v_{0i} \exp\left(-\alpha_{zi} \beta_i \frac{kT_{xi}}{\Delta\mu_i}\right) = D_B D_{ni} \exp\left(-\alpha_{zi} \beta_i \frac{T_{xi}}{T_i}\right), \quad (15)$$

где  $\gamma_i$  – число степеней свободы колебаний в кристаллической решетке;  
 $a_0$  – период кристаллической решетки;  
 $v_{0i}$  – частота колебаний атома (молекулы) в кристаллической решетке;  
 $\alpha_i$  – коэффициент Зинера-Кёстера;

$$v_{0i} = \sqrt{\frac{kT_{xi}}{2\pi m_{0i} a_0^2}} = \sqrt{\frac{R_g T_{xi}}{2\pi i a_0^2}} \quad \alpha_i = -\frac{T_{xi}}{E_M} \frac{dE_M}{dT}$$

причем

Величина межчастичного зазора в условиях свободной насыпки или упругого сжатия ДПС, не менее чем на один – два порядка превосходит размеры кристаллической решетки, но не менее чем на порядок меньше размеров контактных пятен. Исходя из этого, попадания в межчастичный зазор определенного количества атомов или электронов не приведет к существенному изменению концентраций этих частиц на поверхности контактных пятен. Причина поддержания в этих условиях постоянной концентрации атомов и электронов на поверхности контактных пятен ( $n_v(0,t) = n_{0i} = N/V = \text{const}$ ) заключается в действующем внутри твердого тела атомно-вакансионном механизме замещения. Из-за меньшей по отношению к электрону подвижности, атомы, оказавшиеся в межчастичном зазоре в конце своего движения, в основном, способны только прилипнуть к одной из поверхностей контактных пятен, образуя на ней определенный слой ( $x$ ). Из-за непрерывного попадания атомов внутрь межчастичного зазора, их концентрация с течением времени изменяться ( $n_v = n_v(x,t)$ ). Связь между  $n_v(x,t)$  и  $n_0$  может устанавливаться с использованием функции ошибок:

$$n_v(x,t) = n_{0i} \cdot \text{erf}\left(\frac{x_i}{2\sqrt{D_k t}}\right) \quad (16)$$

В условиях свободной насыпки или упругого сжатия ДПС возможно одновременное прилипание атомов к двум контактным пятнам, то  $0 \leq x \leq 0,5 \cdot l_p$ . Тогда, определяемый выражениями (14) и (15) поток, интегрируемый во временном промежутке с учетом выражения (16), позволяет связать количество прилипших атомов к поверхностям контактных пятен в пересчете на единицу площади ( $n_{si}$ ) со значением  $n_{0i}$ :

$$n_{si} = \int_0^{t_x} J_i dt = -D_k \int_0^{t_x} \text{grad}(n_{vi}) dt = \frac{4n_{0i}}{\sqrt{\pi}} \sqrt{D_k t} \quad (17)$$

Провести оценку необходимого времени ( $t_x$ ) для формирования путем прилипания к контактным пятнам внутри межчастичного зазора вновь создаваемых слоев определенной толщины ( $x$ ) с концентрацией атомов ( $n_i$ ) близкой к  $n_0$ , можно после следующего преобразования уравнения (17):



$$t_x = \frac{\pi}{16D_k} \left( \frac{n_i}{n_0} x \right)^2, \quad t_x = \frac{\pi}{16D_k} \left( \frac{n_i}{n_0} l_i \right)_{x=l_p}^2 \quad (18)$$

Полученные зависимости (2), (3), (14), (16) и (18), совместно с (7), (8), (11), (12), позволяют оценить вероятность и длительность заполнения прилипающими атомами контактных зон твердотельных частиц дисперсной фазы и образования в результате этого твердого пористого тела, как правило, представляющего в порошковой металлургии формовку. За счет использования в этих зависимостях безразмерных коэффициентов ( $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ ) и относительных величин ( $\phi_i = S_k/V_k$ ), при вынесении такой оценки учитывается не только полиморфное состояние кристаллических решеток поверхностных слоев контактных пятен, но также и их химический состав атомов, включая геометрию этих поверхностей.

При моделировании кинетических процессов зависимости (2), (3), (14), (16) и (19), совместно с (7), (8), (11), (12), позволяют оценить вероятность и длительность перехода в твердотельное состояние без упрочнения ДПС, находящуюся в условиях не только свободной насыпки или упругого сжатия, но и индукционного и электроконтактного нагрева. Вышеизложенное модельное допущение устанавливает связь с общепринятой [8,10,11,22,23] моделью перехода ДПС в твердотельное состояние, согласно которым вязкости ( $\eta_s$ ) вещества частиц дисперсной фазы зависит от размеров кристаллической решетки ( $a_0$ ), зерна ( $L_a$ ) поверхностного слоя и коэффициента самодиффузии ( $D_a$ ), который совпадает с  $D_{KB}$  выражении (16) для случая, когда  $D_B=1$ , а также температуры ( $T$ ):

$$\eta_s = \frac{kL_a^2}{a_0^3 D_a} T \quad (19)$$

Рассмотрим, как влияет на кинетику перехода в твердотельное состояние ДПС для электроконтактной наплавки, в ходе которой ток протекает непосредственно через упруго деформированные частицы дисперсной фазы. Началом этого процесса является появление между контактными пятнами (рис.3) разности потенциалов ( $\Delta\phi$ ), приводящих к формированию напряженности ( $E_w$ ) электрического поля в межчастичном зазоре: Учитывая (3), следует считать, что в определенной степени  $E_w$  и  $\Delta\phi$  также зависят от давления ( $p$ ) сжатия ДПС:

$$E_w(p) = \frac{\Delta\phi_l(p)}{l_n(p)} \quad (20)$$

Так как электроны и атомы обладают определенным зарядом ( $qi$ ), то, как следует из выражений (4), (14), (5), (6), появление  $E_w$  должно способствовать повышению проницаемости межчастичного зазора для этих частиц:

$$D_{wi}(p, T) = \exp \left( - \frac{4\pi l_n(p)}{h_p} \sqrt{2m_e [W_i(T) - q_i E_w l_n(p)]} \right) \quad (21)$$

Если известен коэффициент температурного сопротивления ( $\alpha_{TKC}$ ) материала частиц дисперсной фазы, а поверхности контактных пятен (рис.3) являются ювенальными, то выражение (2.30) позволяет следующим образом оценить удельное сопротивление ( $\rho_k$ ) ДПС:

$$\rho_k(p, T) = \rho_m \frac{(+\alpha_{TKC} T)}{D_{wi}(p, T)} \quad (22)$$

В рамках рассматриваемой модели выражение (21) также позволяет оценить вероятность проницаемости межчастичного промежутка для атомов, в том числе с учетом их возможной ионизации. В количественном выражении эта способность может определяться с учетом выражения (4) для случая, когда  $l_p=r_0$  (радиус атомного ядра):



$$q_i(T) = \epsilon_e e \exp\left(-\frac{4\pi r_0}{h_p} \sqrt{2m_i \Delta W_i(T)}\right) \quad (23)$$

Исходя из предполагаемых размеров (10–9–10–7 м) межчастичного зазора, следует полагать, что его удельное сопротивление ( $\rho_k$ ) будет зависеть от проницаемости ( $D_{wi}$ ), удельного сопротивления ( $\rho_m$ ), их коэффициента температурного сопротивления ( $\alpha_{TKC}$ ) материала поверхностей контактных пятен и температуры:

$$\rho_k(p, T) = \rho_m \frac{1 + \alpha_{TKC} T}{D_{wi}(p, T)} \quad (24)$$

Учитывая единую природу механизмов электропроводности и теплопроводности материалов частиц дисперсной фазы, связь между их удельным сопротивлением и коэффициентом теплопроводности, позволяет восстановить закон Видемана-Франца-Лоренца:

$$\lambda \rho = L_0 T = \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{k}{e}\right)^2 T \quad (25)$$

Устанавливаемый зависимостью (24) характер изменения величины удельного сопротивления дисперсно-порошковой среды с частицами дисперсной фазы, имеющими модуль Юнга порядка 100 ГПа, в зависимости от давления и температуры представлен на рисунке 6.

После срачивания в результате диффузии и налипания атомов контактных пятен, вызванной индукционным или электротермическим нагревом, а также сфероидизацией пор, дальнейший переход дисперсно-порошковой среды в твердотельное состояние, в окончательном виде представляющее износостойкие и антифрикционные покрытия, может описываться как вязкое течение, при котором происходит уменьшение радиуса эквивалентной поры. Если предположить, что при таком вязком течении число Рейнольдса  $Re \ll 1$ , а само течение обладает вязкостью ньютоновской среды, определяемой (2), то на количественном уровне этот процесс, как показано в работах [10,11,13], может быть описан при помощи следующих зависимостей:

$$Re = \frac{v_R R_f \gamma_m (1 - \Pi)}{\eta} \quad (26)$$

$$\left(\frac{4}{3}\eta + \tau \cdot t_0\right) \operatorname{div}(v_R) = -\Delta p \quad (27)$$

$$\Delta p = -\frac{2\sigma}{R_f} + p_{\text{ддс}} \quad (28)$$

$$\frac{4}{3}\pi R_f^3 = \Pi V_{\text{дл}} \quad (29)$$

где  $R_f$  – радиус поры;

$\gamma_m$  – плотность материала частиц дисперсной фазы;

$\Pi$  – пористость;

$v_R = \frac{R_f}{t_0}$  – критическая скорость;

$t_0$  – время наплавки.

$\tau$  – касательные напряжения;

$\Delta p$  – избыточное давление лапласовского типа;

$\sigma$  – удельная поверхностная энергия;

$V_{\text{дл}}$  – объем наплавляемого порошкового материала.

С учетом зависимостей (26)–(28), время наплавки ( $t_0$ ) рассчитывается:

$$t_0 = \frac{4 \eta}{3 \sigma} R_f \quad (30)$$

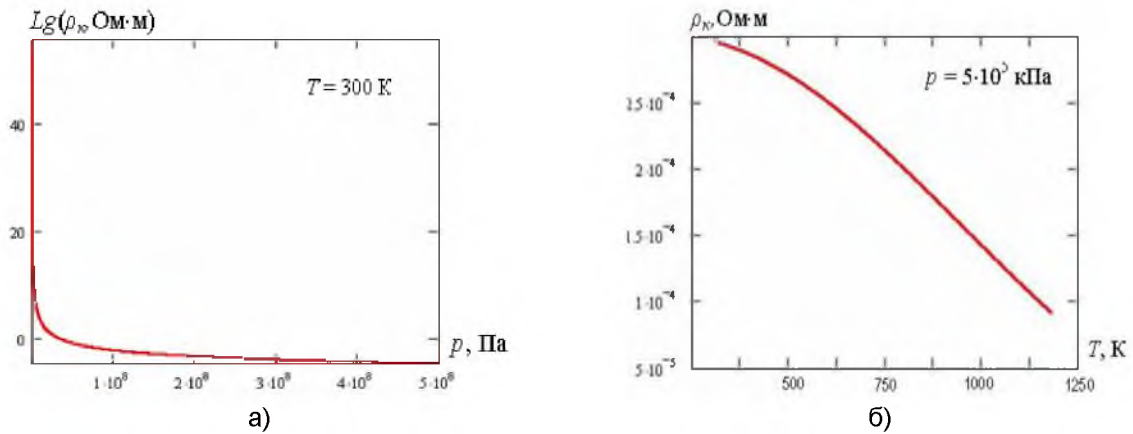


Рисунок 6 – Характер изменения удельного сопротивления дисперсно-порошковой среды в зависимости от сжимающего давления (а) и температуры (б)

При этом:

$$\sigma \ll \frac{q_a R_f}{2} \frac{\dot{\epsilon} - \dot{\epsilon}_c}{\dot{\epsilon}_c}; \quad \eta \ll \eta_0 \exp\left(\frac{W_a}{kT}\right) = \frac{kT_0}{r_a D_a} \exp\left(\frac{W_a}{kT}\right), \quad (31)$$

где  $T, T_k, T_0$  – текущая, критическая (например, кипения) и начальная температуры;

$\eta_0$  – начальная сдвиговая вязкость;

$W_a$  – энергия активации;

$q_a$  – удельная к объему энергия активации.

Используя зависимости (20), (27)–(29) и принимая во внимание, что

$$\chi = \frac{dh}{h_{di}} = \frac{1}{3} \frac{dV}{V_{di}} = \frac{p}{\eta} dt, \quad (32)$$

где  $h_{tm}$  – толщина наплавляемого покрытия,

на примере упругого сжатия ДПС, состоящей частиц дисперсной фазы с модулем Юнга порядка 100 ГПа, можно оценить (рис.7) характер изменения пористости образующегося материала покрытия в зависимости от давления сжатия.

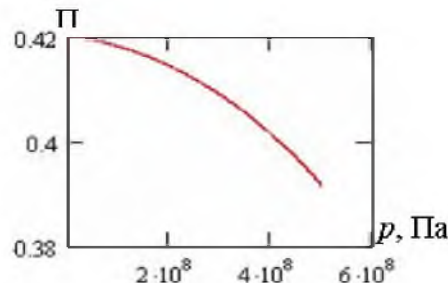


Рисунок 7 – Изменение пористости образующегося покрытия в зависимости от давления сжатия

С учетом анализа работ [10,11,23], для оценки возникающих в ДПС механических радиальных ( $\tau_r$ ) или осевых ( $\tau_z$ ) напряжений, обусловленных действием сил ( $F$ ) сжатия, включая центробежные, а также для оценки создаваемых электрическим током температурных полей в образующемся порошковом материале покрытия, можно использовать следующие модельные допущения:

$$\frac{\partial \tau_r}{\partial r} + \frac{\tau_r - \varepsilon_z}{r} + \frac{F}{V_{ii}} = 0 \quad (33)$$

$$\tau_r(T) = \left[ \psi v + 2\eta(T, \Pi) \frac{\partial v_r}{\partial r} \right] \quad (34)$$

$$\tau_z(T) = \psi v + 2\eta(T, \Pi) \frac{v_z}{z} \quad (35)$$

$$\dot{O}_{yi} = \xi \dot{I} \dot{U} = \int_V w dV \quad (36)$$

$$\frac{\partial T_1(\mathbf{r}, z, t)}{\partial t} = a_1 \left[ \frac{\partial^2 T_1(\mathbf{r}, z, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1(\mathbf{r}, z, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_1(\mathbf{r}, z, t)}{\partial z^2} \right] + \frac{w_1(\mathbf{r}, z, t)}{c\gamma_1} \quad (37)$$

$$\frac{\partial T_2(\mathbf{r}, z, t)}{\partial t} = a_2(\Pi) \left[ \frac{\partial^2 T_2(\mathbf{r}, z, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2(\mathbf{r}, z, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_2(\mathbf{r}, z, t)}{\partial z^2} \right] + \frac{w_2(\mathbf{r}, z, t)}{c(\Pi)\gamma_2(\Pi)} \quad (38)$$

$$\gamma_2(\Pi) = (-\Pi) \gamma_m, \quad a_2(\Pi) = (-\Pi) a_m, \quad c_2(\Pi) = (-\Pi) c_m \quad (39)$$

где  $V_{\text{пм}}$  – объем порошкового материала;

$\psi$  – вязкий аналог параметра Ламе;

$v$  – скорость уплотнения, которая может определяться с учетом (32);

$\Phi_{\text{эм}}$  – создаваемый электрическим и магнитным полями тепловой поток;

$\xi$  – коэффициент полезного действия;

$I, U$  – действующие значения силы и напряжения электрического тока;

$w$  – плотность генерируемой энергии;

$a_1, a_2(\Pi)$  – коэффициенты теплопроводности основы и дисперсно-порошковой среды;

$\gamma_1, \gamma_2(\Pi)$  – плотности стальной основы и дисперсно-порошковой среды;

$c, c(\Pi)$  – удельная теплоемкость основы и дисперсно-порошковой среды;

$\gamma_m, a_m$  – плотность и теплопроводность материала частиц дисперсной фазы.

Граничные условия для выражений (37), (38) могут устанавливаться из равенства тепловых и температурных потоков:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(\mathbf{r}, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=0} = \alpha_1 [T_1(\mathbf{r}, 0, t) - T_C(\mathbf{r}, 0, t)] \quad (40)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(\mathbf{r}, z, t)}{\partial r} \Big|_{r=r_1} = \alpha_1 [T_1(\mathbf{r}, z, t) - T_C(\mathbf{r}, z, t)] \quad (41)$$

$$\lambda_2(\Pi) \frac{\partial T_2(\mathbf{r}, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=0} = \alpha_2(\Pi) [T_2(\mathbf{r}, 0, t) - T_N(\mathbf{r}, 0, t)] \quad (42)$$

$$\lambda_2(\Pi) \frac{\partial T_2(\mathbf{r}, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=r_2} = \alpha_2(\Pi) [T_2(\mathbf{r}, z, t) - T_N(\mathbf{r}, z, t)] \quad (43)$$

Причем

$$\lambda_2(\Pi) = (-\Pi) \lambda_m \quad (44)$$

$$\xi = \frac{m \epsilon_m \Delta T + \Lambda}{IU \Delta t} \quad (45)$$

где  $\lambda_m$  – удельная теплопроводность материала частиц дисперсной фазы;

$m$  – общая масса частиц дисперсной фазы;

$\Lambda$  – удельная теплота плавления материала частиц дисперсной фазы.

Рассмотрим случай, когда частицы дисперсной фазы состоят из материалов, обладающих различной тепло- и электропроводностью. Тогда, с учетом выражения (36), протекающий через частицу такой системы тепловой поток, в обобщенном виде можно представить разделить на два параллельных потока, протекающих через параллельно подключенные тепловое или электрическое сопротивления.

Если в качестве примера дисперсно-порошковой среды, состоящей из частиц дисперсной фазы, каждая из которых сама состоит из двух различных по проводимости материалов, выбрать твердые сплавы типа ВК6 и ВК8 (ГОСТ3882-74), то характер изменения удельной поверхностной энергии и сдвиговой вязкости материала поверхности этих частиц, согласно результатам вычисления с помощью выражений (30)–(36) будет таким, как показано на рисунках 8,9. При этом характер изменения электрического и термического сопротивления сформированного после срачивания контактных поверхностей этих частиц пористого твердотельного покрытия в процессе индукционной и электроконтактной наплавки, обеспечивающей в таком материале формирование теплового потока порядка  $10^6$  Вт/м<sup>2</sup>, будет таким, как показано на рисунках 11–13.

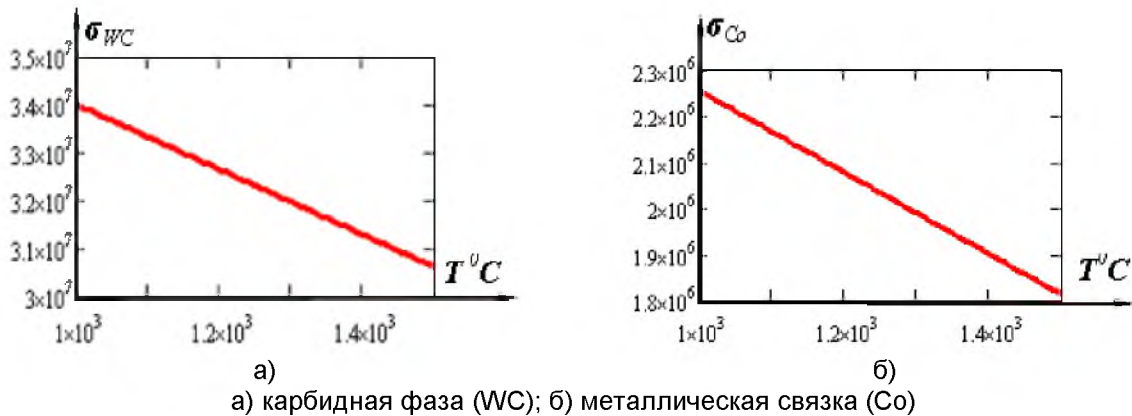


Рисунок 8 – Изменение удельной поверхностной энергии карбидной фазы и металлической связки в интервале температур 1000–1500 °С

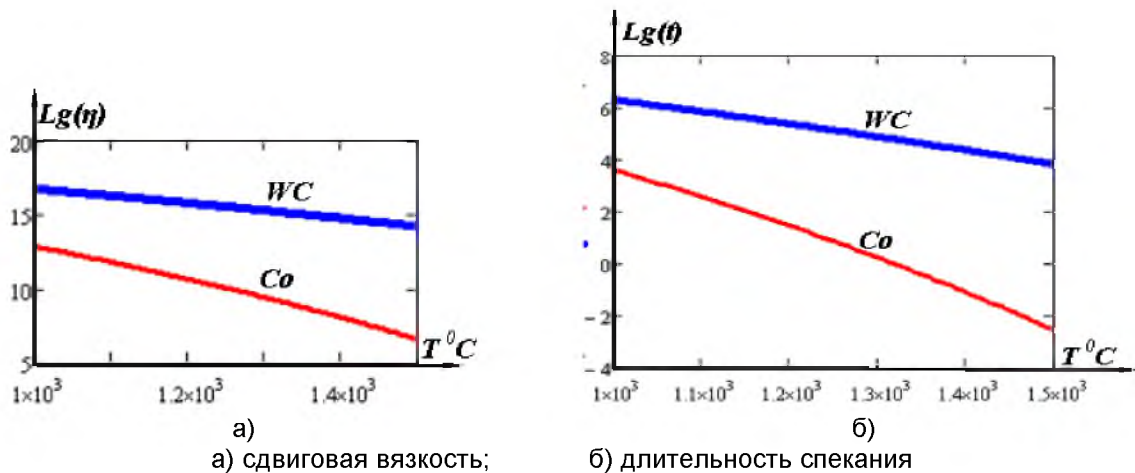
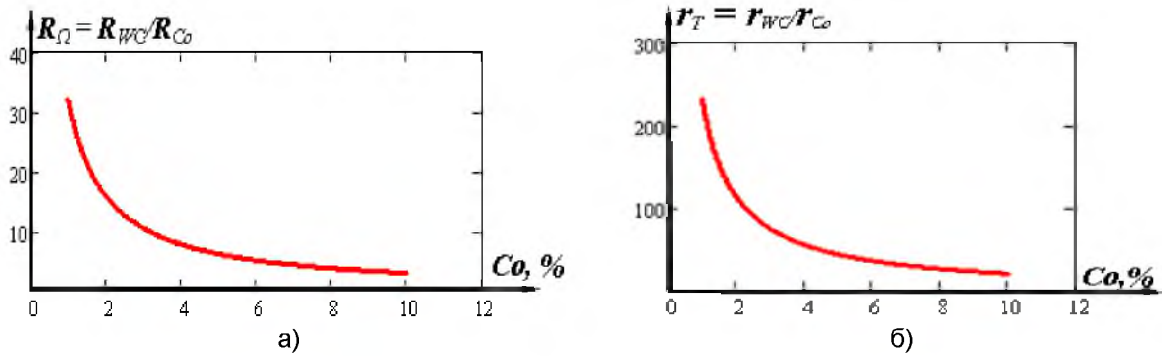
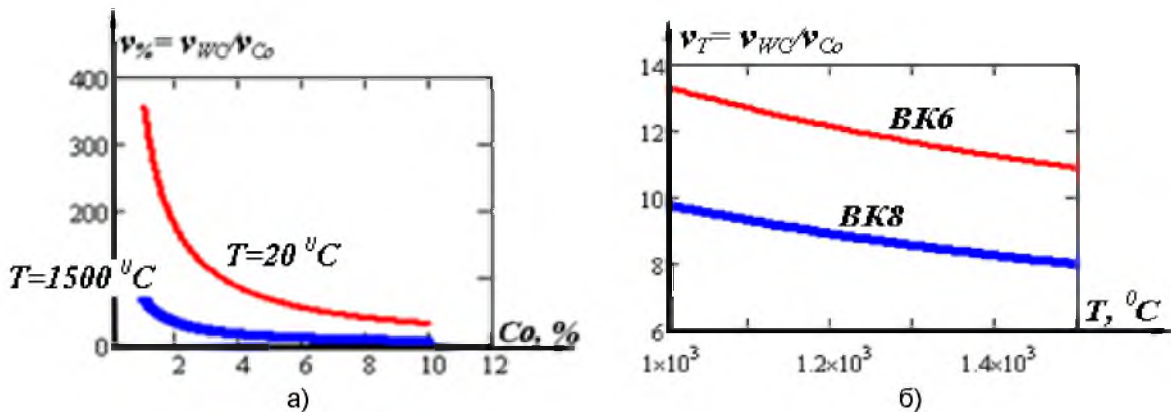


Рисунок 9 – Изменение сдвиговой вязкости и длительной спекания в шкале десятичного логарифма в интервале температур 1000–1500 °С



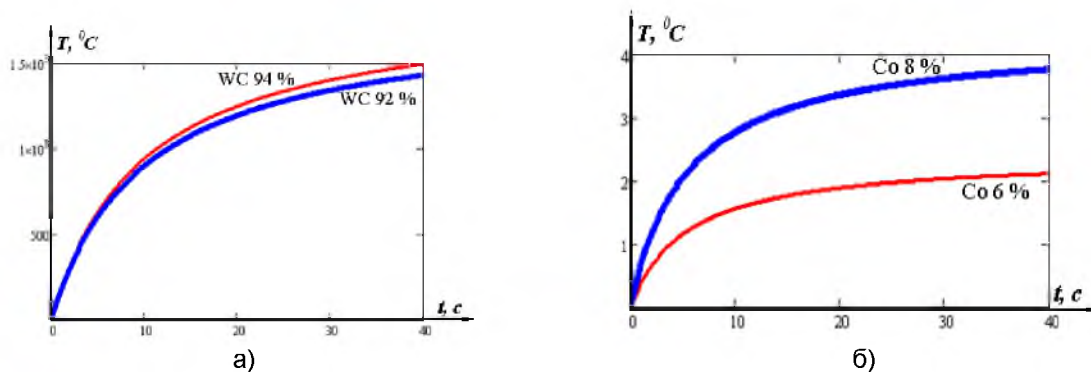
а) относительное электрическое сопротивление; б) относительное термическое сопротивление  
 Рисунок 10 – Характер изменения относительных величин электрического и теплового сопротивления в зависимости от соотношения фаз карбида вольфрама и металлической связи



а) влияние металлической связи на относительную скорость нагрева;  
 б) влияние температуры на относительную скорость нагрева  
 Рисунок 11 – Характер изменения относительной скорости нагрева в зависимости от содержания металлической связи

Полученные с помощью разработанной модели и представленные на рисунках 5–12 результаты моделирования хорошо согласуются с теоретическими и экспериментальными данными, приведенными в работах [8,10,11,13,23].

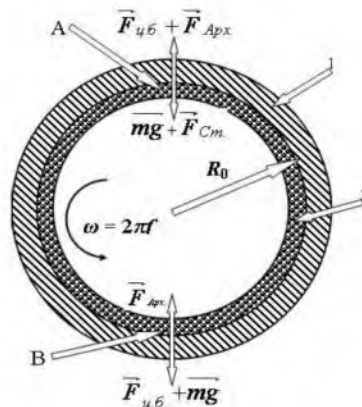
Учтем в разрабатываемой модели влияние седиментации на распределение дисперсно-упрочняющей фазы в образующемся покрытии при кристаллизации расплава, образующегося при индукционном нагреве ДПС в поле центробежных сил. При этом отметим, что седиментация происходит, если направленное движение частиц под действием силы тяжести или центробежной силы преобладает над хаотическим тепловым движением частиц. Скорость седиментации зависит от массы, размера и формы частиц, вязкости и плотности среды, а также ускорения, возникающего при действии на частицы сил поля.



а) нагрев электрическим током твердой фазы (карбида вольфрама);  
 б) нагрев металлической фазы (кобальта).

Рисунок 12 – Характер изменения температуры карбидной фазы (а) и металлической связи (б) в зависимости от длительности нагрева

В исходном состоянии дисперсно-порошковой среды частицы упрочняющей фазы, представленной ультрадисперсными включениями тугоплавких оксидов или карбидов, распределены равномерно. Плотность этих частиц в два – три раза меньше плотности наплавляемого металла, составляющего основу порошковой композиционной системы, формирующей износостойкие и антифрикционные покрытия. Исходя из анализа работ [22,10,11,23], можно предположить, что до перехода дисперсно-порошковой среды в расплавленное состояние существенного перераспределения частиц упрочняющей фазы в ней не произойдет. При образовании расплава на эти частицы могут действовать силы тяжести, выталкивания, сопротивления, а также центробежные силы. Предположим, что эти силы уравновешены, тогда в определенных точках цилиндрической заготовки они будут направлены так, как показано на рисунке 13.



1 – заготовка; 2 – расплавленный слой покрытия;  
 $F_{ц.б.}$  – центробежная сила;  $F_{Арх.}$  – сила выталкивания (Архимеда);  
 $F_{Ст.}$  – сила сопротивления (Стокса);  $mg$  – сила тяжести;  
 $\omega$  – угловая скорость, рад./с;  $f$  – частота, Гц

Условие равновесия в точках:

$$A: 0 = \vec{F}_{о.а.} + \vec{F}_{\dot{A}\dot{\alpha}\dot{\beta}} + \vec{mg} + \vec{F}_{\dot{N}\dot{\delta}} \quad B: 0 = \vec{F}_{о.а.} + \vec{F}_{\dot{A}\dot{\alpha}\dot{\beta}} + \vec{mg}$$

Рисунок 13 – Схема действия сил в предполагаемых точках равновесия

Если пренебречь силами смачивания и поверхностного натяжения расплава, то минимальная угловая скорость, обеспечивающая удержание в верхней точке (A) вращения цилиндрической заготовки при центробежной наплавке, может определяться по формуле:

$$\omega \geq \sqrt{\frac{g}{R_0 - h}}, \tag{46}$$

где  $\omega$  – угловая скорость;  
 $g$  – ускорение свободного падения;  
 $R_0$  – внутренний радиус цилиндрической заготовки;  
 $h$  – толщина покрытия.

В этом случае для стальных цилиндрических заготовок с радиусами порядка ~0,01–0,1 м с толщинами наплавляемых покрытий порядка ~1 мм, минимальные угловые скорости будут иметь значения в пределах от 10 (для  $R_0 \sim 0,1$  м) до 33 (для  $R_0 \sim 0,01$  м) рад/с или 96–318 об./мин. При таких угловых скоростях центробежное ускорение меньше 10 g, поэтому состояние равновесия в выбранных точках на рисунке 13 будет определяться зависимостями:

$$\omega^2 (R_0 - X) = \frac{9}{2} \frac{\eta v}{r^2 \gamma_m} - \left( \frac{\gamma_0}{\gamma_m} - 1 \right) g, \tag{47}$$

$$\omega^2(R_0 - X) = \left( \frac{\gamma_0}{\gamma_m} - 1 \right) g, \quad (48)$$

где  $R_0$  – внутренний радиус цилиндрической заготовки;

$X$  – глубина, на которой в расплаве достигается состояние равновесия;

$r$  – радиус частицы упрочняющей фазы;

$\gamma_0$  – плотность расплава;

$g$  – ускорение свободного падения.

Из анализа свойств зависимостей (47), (48), схемы действия сил в выбранных точках равновесия (рис.14), а также результатов действия центробежной силы расплава на ультрадисперсные частицы упрочняющей фазы, следует, что в точке А на глубине погружения в расплав  $X$  эти частицы могут покоиться, в то время как в точке В они будут двигаться к поверхности расплава с некоторой постоянной скоростью. С учетом уравнения (48) скорость движения будет определяться зависимостью [13]

$$v = \frac{2r^2}{9\eta} \left[ \rho_0 - X \gamma_m + \rho_0 - \gamma_x \right] \omega^2. \quad (49)$$

Исходя из зависимости (49) глубина, на которой в расплаве частицы будут переходить в состояние покоя при достижении точки А (рис.13), может определяться как

$$X(\omega) = R_0 - \left( \frac{\gamma_0}{\gamma_m} - 1 \right) \frac{g}{\omega^2}. \quad (50)$$

Так, например, в жидкофазных бронзовых сплавах плотностью 8,3–8,9 г/см<sup>3</sup> и динамической вязкостью 3,0–3,3 мПа·с при температуре 1100–1200 О С, в которых равномерно распределены ультрадисперсные частицы корунда, угловые скорости, обеспечивающие переход этих частиц в состояние покоя в точке А (рис. 13), приведены на рисунке 14.

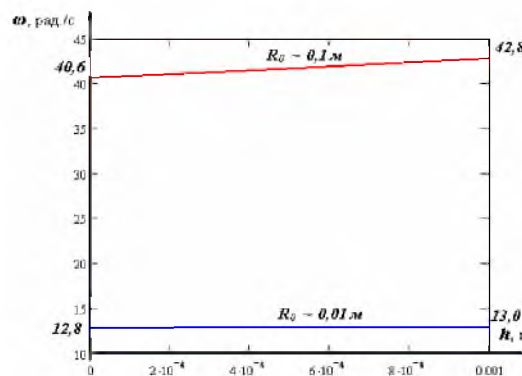


Рисунок 14 – Диапазон угловых скоростей и толщин наплаваемых покрытий, обеспечивающих состояние покоя частицам упрочняющей фазы в нижней точке вращения

Зависимость значений максимальной скорости частиц упрочняющей фазы, находящихся в верхней точке вращения расплава, от их размеров приведена на рисунке 15.



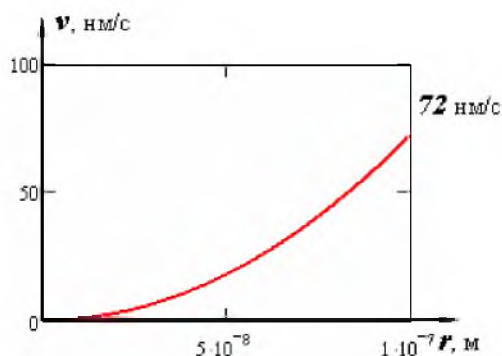


Рисунок 15 – Изменение значений максимальной скорости частиц упрочняющей фазы в зависимости от их размеров

Характер изменения скоростей движения удаленного на один миллиметр от поверхности цилиндрической заготовки фронта частиц упрочняющей фазы в течение одного оборота при угловой скорости  $\omega=42,8$  рад./с, полученных в рассматриваемом примере с использованием зависимостей (48) и (50), приведен на рисунке 16. Для этого примера скорости движения рассматриваемых частиц изменяется в пределах от нуля (верхняя точка вращения цилиндрической заготовки) до 72 нм/с (нижняя точка вращения заготовки).

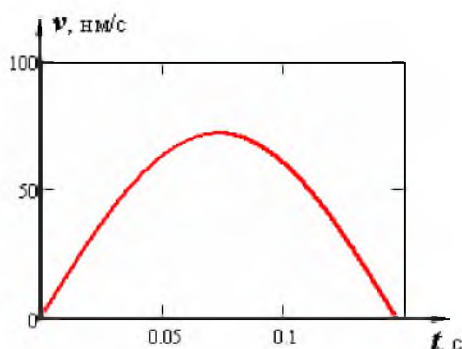


Рисунок 16 – Характер изменение скорости движения частиц упрочняющей фазы в течение одного оборота при угловой скорости  $\omega = 42,8$  рад./с

Если центробежное ускорение вращающихся цилиндрических заготовок с внутренними радиусами порядка 0,01–0,1 метра превысит 10 g, то скорость ультрадисперсных частиц упрочняющей фазы следует рассчитывать по формуле [13]:

$$v = \frac{d(R_0 + X)}{dt} = \frac{2 r^2 (\rho_0 - \rho_x) \omega^2 (R_0 + X)}{9 \eta} \quad (51)$$

Тогда, в рассматриваемом примере, согласно проводимым расчетам с использованием формулы (51), характер изменения скоростей и положения частиц упрочняющей фазы в зависимости от их размеров показано на рисунках 17 и 18.

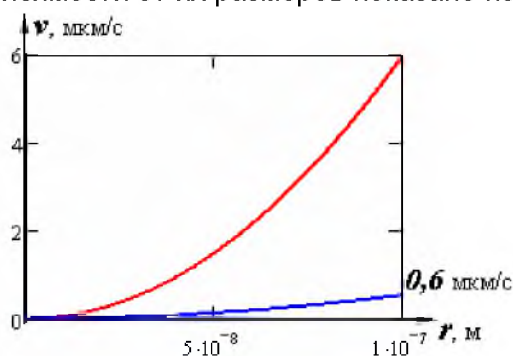


Рисунок 17 – Характер изменения скоростей частиц упрочняющей фазы в зависимости от их размеров при центробежном ускорении 16 g

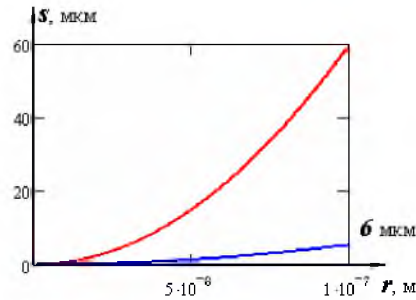


Рисунок 18 – Характер смещения от первоначального положения частиц упрочняющей фазы в зависимости от их размеров при центробежном ускорении 16 g

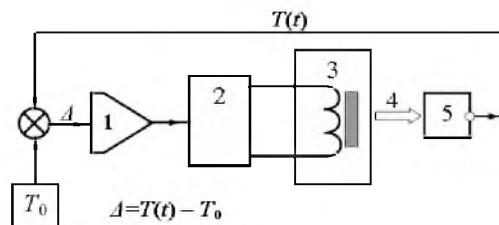
Полученные на основе разработанной модели и представленные на рисунках 15–19 результаты согласуются с теоретическими и экспериментальными данными, приведенными в работах [10,11,13–15,23]. Исходя из этого, а также представленных на рисунках 5–12, 14–18 результатов моделирования, с учетом анализа работ [10,22,23], можно сделать следующие выводы.

1. Разработанная модель индукционной и электроконтактной наплавки порошковых материалов позволяет рассчитывать режимы этих процессов с учетом особенностей дисперсно-порошковых сред, которые по своему композиционному составу соответствуют металлическим и твердым сплавам, а также металломатричным композитам, которые могут использоваться для нанесения износостойких и антифрикционных покрытий на контактные поверхности высоконагруженных деталей узлов трения и сопряжения.

2. В отличие от известных, в данной модели учтено влияние двойного электрического слоя на формирование контактных промежутков между частицами дисперсной фазы при упругом сжатии и влияние этого промежутка на характер перехода дисперсно-порошковой среды в твердотельное состояние. С помощью этой модели также возможно подбирать режимы, при которых в условиях действия центробежных сил, перераспределение частиц упрочняющей фазы в расплаве будет минимальным.

#### 4. Осуществление и применение индукционной и электроконтактной наплавки износостойких и антифрикционных порошковых материалов

Разрабатываемая модель индукционной и электроконтактной наплавки позволяет рассчитать эталонные режимы этих процессов, включающие в себя, в том числе, значения температуры ( $T_{0i}$ ) и скорости ее изменения на различных этапах нагрева порошковых материалов. С помощью этой модели также можно вычислять необходимую длительность изотермической выдержки на том или ином этапе нагрева, обеспечивающей выполнение условий, определяемых выражениями (37), (38), (40)–(45). Используя это можно осуществлять параметрическую стабилизацию требуемых режимов, используя при этом систему адаптивного управления [24], схема которой приведена на рисунке 19.



1 – регулятор; 2 – источник тока;  
3 – электропривод установок индукционного и электроконтактного нагрева;  
4 – температурное излучение; 5 – пирометр

Рисунок 19 – Схема адаптивного управления индукционной наплавкой

Для повышения устойчивости такой системы, в ее цепи обратной связи следует использовать последовательный интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор

для формирования управляющего сигнала источника тока установки индукционного нагрева или машине контактной сварки. Формирование управляющего сигнала ( $u=u(t)$ ) в регуляторе происходит с учетом суммирования трёх основных составляющих, первое из которых пропорционально входному сигналу, второе – является интегральной, а третье – производной от входного сигнала, поступающего в электрическую цепь от первичных преобразователей физических величин (датчиков). Если сигнал  $u(t)$  является детерминированным, тогда:

$$u(t) = P + I + D = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de}{dt}, \quad (52)$$

а если является цифровым, то:

$$U(n) = K_p E(n) + K_p K_{ip} T \sum_{i=0}^n E(n) + \frac{K_p K_{ip}}{T} [E(n) - E(n-1)], \quad (53)$$

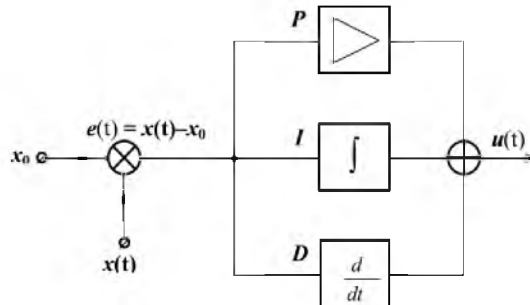
$$E(n) = x_0 - x_i$$

где P,I,D – пропорциональная, интегральная и дифференциальная составляющие;

$K_p, K_i, K_d$  – коэффициенты усиления пропорциональной, интегральной и дифференциальной слагаемых, соответственно;

Функциональная схема ПИД-регулятора приведена на рисунке 20.

Применение ПИД-регулятора в цепи способно обеспечить повышение устойчивости стабилизации режимов индукционной и электроконтактной наплавки за счет снижения восприимчивости приведенной на рисунке 20 системы адаптивного управления к случайным помехам, возникающим в электрической цепи, содержащей датчики, а также из-за воздействия электромагнитных полей. Появление таких полей, в частности, обусловлено электромагнитным излучением индуктора и работой источника высокочастотного тока в установке индукционной наплавки порошковых материалов.



$x_0$  – задаваемое значение уставки;  $x(t)$  – текущее значение уставки;  
 $e(t)$  – рассогласование

Рисунок 20 – Функциональная схема ПИД-регулятора

Параметрическая стабилизация режимов с помощью системы адаптивного управления, реализованной согласно схемам, приведенным на рисунках 19 и 20, осуществляется следующим образом.

С помощью источника тока, входящего в установку индукционного нагрева или машину контактной сварки формируется вектор внешнего воздействия  $\bar{X} = \bar{X}(x_j, t)$ , где  $t$  – время. На определяющие этот вектор параметры ( $x_i$ ) оказывает влияние формируемый регулятором вектор управления  $\bar{U} = \bar{U}(u_k, t)$ . Воздействие  $\bar{X} = \bar{X}(x_j, t)$  на объект управления, которым является наплавляемый порошковый материал, вызывает изменение его векторов состояния  $\bar{Y} = \bar{Y}(y_j, t)$  и возмущения  $\bar{r} = \bar{r}(r_j, t)$ . Предварительно, исходя из требуемого комплекса структурных и физико-механических свойств покрытий, производится оптимизация параметров  $\bar{Y} = \bar{Y}(y_j, t)$ . Затем, по результатам этой оптимизации, производится следующая, касающаяся параметров

$\bar{X} = \bar{X}(x_i, t)$ . Данная оптимизация производится на стадии расчетов и определения технологических режимов с использованием соответствующих функционалов:

$$\bar{Y}(y_i, t) = \bar{F}_1 \left[ \bar{Y}(x_j), t \right] \Big|_{Y(y_b)}^{Y(y_f)}, \quad (54)$$

$$\bar{X}(x_i, t) = \bar{F}_2 \left[ \bar{Y}(u_k), t \right] \Big|_{Y(y_b)}^{Y(y_f)}. \quad (55)$$

При выполнении этих операций, в частности при оптимизации режимов индукционной наплавки, функционал (55) можно определить через векторный магнитный потенциал (A), плотность тока (J) и удельное сопротивление (ρ) материала, в котором индуцируется ток:

$$\bar{F}_1^0 = \iiint_V \left( \frac{\partial}{\partial r} \frac{1}{\mu(r)} \frac{\partial}{\partial r} \vec{A} \right) j \omega \rho |A|^2 + \vec{A} \vec{A} \Big|_r, \quad (56)$$

где j – мнимая единица;

ω – циклическая частота электромагнитного излучения.

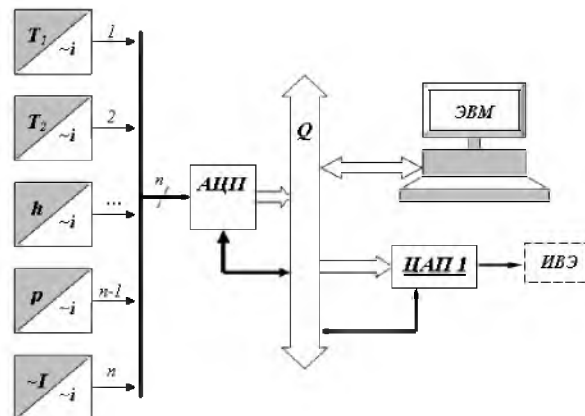
Использование выражения (56) для оптимизации режимов электроконтактной наплавки допускается с учетом следующего:

$$\vec{E} = - \left\{ \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right\} - \text{div}(U), \quad (57)$$

где EЭ – напряженность электрического поля;

U – напряжение на вторичной обмотке сварочного трансформатора.

Приведенная на схеме (рис.19) система адаптивного управления решает задачу оптимизации параметров  $\bar{U} = \bar{U}(u_k, t)$  исходя из текущего рассогласования (см. выражение 51) между эталонными и текущими параметрами вектора  $\bar{Y} = \bar{Y}(y_j, t)$ . Параллельно с этим, по величине рассогласования, регулятором этой системы выполняется стабилизация работы установки индукционного нагрева или машины контактной сварки. Конструктивная схема системы адаптивного управления, реализующей вышеизложенный алгоритм работы, на основании которой ее можно реализовать, представлена на рисунке 21.



ЭВМ – электронно-вычислительная машина; Q – внешняя шина обмена данными;

T1, T2 – датчики температур; h – датчик перемещения; p – датчик давления;

I – датчик тока; i – унифицированный токовый выход с датчика;

АЦП – цифро-аналоговый преобразователь с селектором мультиплексором;

ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; ИВЭ – источник внешней энергии

Рисунок 21 – Конструктивная схема системы адаптивного управления

Для стабилизации режимов индукционной и электроконтактной наплавки порошковых материалов адаптивная система управления может, например, использоваться разработанный ГНУ «Объединенный институт машиностроения» НАН Беларуси и ГНУ «Институт порошковой металлургии» микропроцессорный модуль из конструктивных элементов ООО «Спецприбор» (г. Минск) с характеристиками,

приведенными в таблице 1. В качестве унифицированных датчиков этой системы могут использоваться изделия ГНУ «Института твердого тела и полупроводников» НАН Беларуси с характеристиками, приведенными в таблице 2, включая пирометр АПИР-С производства ООО «НПО «Спектр»» (г. Новочеркасск, РФ).

Схема расположения приведенных в таблицах 1 и 2 конструктивных элементов системы адаптивного управления на машине контактной сварки МТ 2201 приведена на рисунке 22.

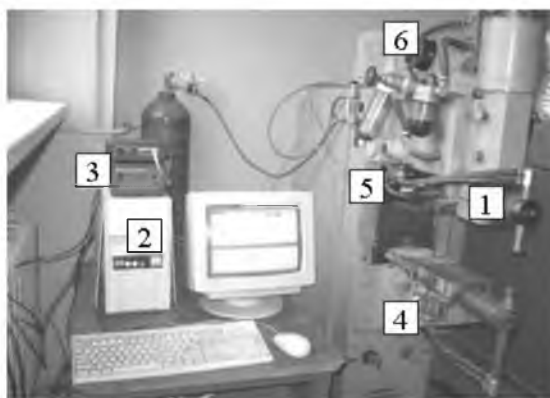
На рисунке 23 показан процесс нанесения износостойких и антифрикционных порошковых покрытий на созданном производственном участке ЭРУП «Центр механизации путевых работ Белорусской железной дороги» (г. Пинск, РБ), на разработанной ГНУ «Объединенный институт машиностроения» НАН Беларуси установке индукционной наплавки с встроенной системой адаптивного управления.

Таблица 1 – Микропроцессорные модули и их характеристики

Составные элементы	Характеристики
ADC 100K-12-8	12 разрядов; 8 каналов; время преобразования – 10 мкс; входной диапазон измеряемых напряжений + 5 (+10) В; 4 линии цифрового (ТТЛ) ввода/вывода; ОЗУ 64 К слов (одно слово – 16 бит); шина ISA
ADCS5K-12-8	12 разрядов; 8 каналов; время преобразования – 200 мкс, входной диапазон измеряемых напряжений + 5 В; интерфейс RS 232
DAC 12-4	4 канала ЦАП: 12 разрядов; время установки 100 мкс; выходное напряжение + 5 (+10) В; выходной ток до 20 мА; 8 линии цифрового (ТТЛ) ввода/вывода; ОЗУ 64 К слов; шина ISA
AMP-8	8 дифференциальных каналов; коэффициент усиления от 5 до 1000; верхняя полоса пропускания в канале зависит от усиления и составляет от 500 Гц до 200 кГц
PSL-80	Стабилизированные выходные напряжения: + 5 В (ток нагрузки до 0,8 А), + 15 В; 12 В (ток нагрузки до 1,0 А); диапазон регулируемого напряжения 0 – 40 В (ток нагрузки до 0,1 А).
ПЭВМ	Операционная система – не ниже DOS, Windows 95/98. Процессор PI-166\RAM 128Mb\HDD 4 Gb\GF2 32 Mb

Таблица 2 – Унифицированные датчики и их характеристики

Тип датчика	Характеристики
ДТХ-25	Диапазон измерения тока 0 – 25 кА; частота измеряемого тока до 300 кГц; точность измерения 1%
ДДХ-600	Диапазон измерения давления воздуха 0 – 600 кПа; время установки – 1 мс; точность измерения 1,5%
ДПХ-10	Диапазон измерения перемещения 0 – 5 мм, точность измерения – 0,5%
LT(DL2, SC)	Диапазон измерения температуры 250 – 1500 К, диапазон волн ИК излучения 8 – 14 мкм.



1 – машина точечной сварки; 2 – управляющий ПК; 3 – микропроцессорный модуль; 4 – датчик перемещения; 5 – датчик тока; 6 – датчик усилия сжатия  
Рисунок 22 – Схема расположения на машине контактной сварки конструктивных элементов системы адаптивного управления



Рисунок 23 – Процесс индукционной наплавки

Микропроцессорный модуль системы адаптивного управления также использовался в составе машины шовной контактной сварки и установки индукционной наплавки производственного участка ГНУ «Объединенный институт машиностроения» НАН Беларуси для стабилизации режимов разработанных [14,15] технологических процессов наплавки износостойких и антифрикционных покрытий на контактные поверхности высоконагруженные детали (рис.24) узлов трения и сопряжения.



а)

а) индукционная; б) электроконтактная

б)

Рисунок 24 – Детали узлов трения и сопряжения с наплавленными износостойкими и антифрикционными порошковыми покрытиями

Исходным материалом в разработанных технологических процессах являлись порошки БрОФ10-1, БрОЦ5-5-5, БрАЖ9-4, БрОС1-22, ПМС-1, ПР-Х4Г2Р4С2F, ПГ-СР1, ПГ-СР2, ПГ-СР3, ПГ-СР4, ПГ-УС25, ПГ-10Н-01, ПГ-10Н-02. На стадии проектирования этих технологических процессов, при определении необходимых технологических режимов, использовались [14,15] элементы изложенной в этой работе математической модели индукционной и электротермической наплавки порошковых материалов.

### Заключение

1. На основе анализа методов и используемых в них моделей индукционной и электроконтактной наплавки порошков металлических сплавов, применяемых для получения износостойких и антифрикционных покрытий, разработана феноменологическая модель, отличающаяся тем, что учитывает влияние двойного электрического слоя на поверхности частиц дисперсной фазы на их соединение при электротермическом и термомеханическом воздействии. Отличительной особенностью данной модели является то, что в ней процесс индукционной и электроконтактной наплавки рассматривается как переход дисперсно-свободной порошковой среды в дисперсно-связанное состояние в виде покрытия.

2. В разработанной феноменологической модели обоснованы зависимости, отражающие влияние температуры, периода и упаковки кристаллической решетки на

модуль упругости материала порошка, а также влияния существующего в контактных зонах его части двойного электрического слоя на процесс формирования межчастичных металлических контактов, включая функциональную зависимость для оптимизации режимов индукционной и электроконтактной наплавки.

3. На основе моделирования определены алгоритмы оптимизации режимов, осуществления и управления процессами индукционной центробежной и электроконтактной наплавки порошковых антифрикционных и износостойких покрытий, при которых обеспечивается параметрическая стабилизация технологических режимов.

4. Полученные результаты использованы:

- при выполнении заданий Т15-СО-055 БРФИИ-СО РАН, 2.3.03 ГПНИ «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении» и др.;

- при внедрении на опытно-экспериментальном производстве Института порошковой металлургии, ЭРУП «Центр механизации путевых работ Белорусской железной дороги» и др. технологии получения высоконагруженных деталей узлов трения и сопряжения с использованием методов индукционной и электроконтактной наплавки порошковых износостойких и антифрикционных покрытий.

#### Список литературы:

1. Современная трибология: Итоги и перспективы / под ред. К.В. Фролова. – М.: Издательство ЛКИ, 2008. – 480 с.
2. Гаркунов, Д.А. Триботехника: Учебник. - 4-е изд., перераб. и доп. / Д.А. Гаркунов. – М.: Издательство МСХА, 2001. – 616 с.
3. Федорченко, И.М. Композиционные спеченные антифрикционные материалы / И.М. Федорченко, Л.И. Путина. – Киев: Наукова думка, 1980. – 404 с.
4. Ли, Р.И. Технология восстановления и упрочнения деталей автотракторной техники: учеб. Пособие / Р.И. Ли. – Липецк: ЛГТУ, 2014. – 379 с.
5. Гладкий, П.В. Плазменная технология. / П.В. Гладкий, Е.Ф. Переплетчиков, И.А. Рябцев. – Киев: Экотехнология, 2007. – 292 с.
6. Фрумин, И.И. Автоматическая электродуговая наплавка / И.И. Фрумин. – М.: Металлургия, 1961. – 424 с.
7. Костиков, В.И.. Плазменные покрытия. / В.И. Костиков, Ю.А. Шестерин М.: Металлургия, 1978. – 160 с.
8. Ткачев, В.Н. Индукционная наплавка твердых сплавов / В.Н. Ткачева, Б.М. Фиштейн, Н.В. Казинцев и [др.] – М.: Металлургия, 1970. – 183 с.
9. Клименко, Ю.В. Электроконтактная наплавка / под ред. Э.С. Каракозва. – М.: Металлургия, 1978. – 128 с.
10. Дорожкин, Н.Н. Получение покрытий методом припекания. / Н.Н. Дорожкин, Т.М. Абрамович, В.И. Жорник. – Минск: Наука и техника. – 1980. – 176 с.
11. Дорожкин, Н.Н. Электрофизические методы нанесения металлических покрытий из металлических порошков / Н.Н. Дорожкин, В.А. Миронов, В.А. Верещагин и [др.] – Рига: Зинатне, 1985. – 131 с.
12. Григорьянц, А.Г. Основы лазерной обработки материалов / А.Г. Григорьянц. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
13. Дорожкин, Н.Н. Центробежное припекание порошковых покрытий при переменных силовых воздействия / Н.Н. Дорожкин и [др]. – Минск.: Навука і тэхніка, 1993. – 159 с.
14. Белявин К.Е. Импульсные электрофизические технологии получения покрытий и модифицирования поверхности материалов / К.Е. Белявин, Д.В. Минько, О.О. Кузнечик, В.В. Макеев //Металлургия. Респ. межвед. сб. науч. трудов. – Вып. 34. ч. 2. – 2013 – С. 58–71.
15. Белявин, К.Е.. Индукционный нагрев в процессах центробежного нанесения покрытий / К.Е. Белявин, И.А. Сосновский, А.Л. Худолей. – Минск: // Вестник фонда фундаментальных исследований, 2013. – № 3(36) – С. 70–87.
16. Энциклопедия машиностроения: Технология сварки, пайки и резки. / под ред. Б.Е. Патона. – М.: Машиностроение, 2006,. – т . Т. III-4. – 768 с.



17. Хрущев, М.М. Износ и износостойкость. Антифрикционные материалы. – М.: Книга по требованию, 2013. – 278 с.
18. Шпагин, А.И. Антифрикционные материалы. – М.: Metallurgy, 1956. – 326 с.
19. Федорченко, И.М. Композиционные спеченные антифрикционные сплавы. / И.М. Федорченко, Л.И. Пугина. – Киев: Наук. думка, 1980. – 404 с..
20. Курганова, Ю.А. Конструкционные металломатричные композиты: учебное пособие. / Ю.А. Курганова, А.Г. Колмыков. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – 141 с.
21. Бабкин, В.Г. Литые металломатричные композиты / В.Г. Бабкин, Н.А. Тереньтев, А.И. Перфильева //Журнал Сибирского Федерального университета: Материаловедение и технологии. Т. 4 - 2014. - № 7). – С. 416 – 423.
22. Бальшин М.Ю. Основы порошковой металлургии / М.Ю. Бальшин, С.С. Кипарисов. – М.: Metallurgy, 1978. – 184 с.
23. Белявин, К.Е. Теория и практика электроимпульсного спекания пористых порошковых материалов. / К.Е. Белявин [и др.]. – Минск: ООО «Ремико», 1997. – 180 с.
24. Хиров, М.В. Идентификация и адаптивное управление технологическими процессами с нестационарными параметрами / М.В. Жиров, В.В. Макаров, В.В. Солдатов. – М.: МГТУ, 2011. – 203 с.