

УДК 536.24:621.923

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
ПРИ НАНЕСЕНИИ ПОКРЫТИЙ ФЕРРОМАГНИТНЫМИ ПОРОШКАМИ
В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ**

д-р техн. наук, проф. Л.М. КОЖУРО
(Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск)
д-р техн. наук, проф. М.Л. ХЕЙФЕЦ, Н.Л. ГРЕЦКИЙ
(Полоцкий государственный университет)

Рассмотрены явления, происходящие в рабочей зоне при нанесении покрытий. Изучено тепловое взаимодействие между покрытием и основой при электромагнитной наплавке. Проведен расчет термического цикла контакта частицы материала ферропорошка с основой. Определено, что продолжительность кристаллизации капель расплава порошка находится в степенной зависимости от величины начальной температуры основы и при кристаллизации расплава различной толщины характер этой зависимости не меняется. Установлено, что на изменение времени интервала кристаллизации капель аналогичное влияние оказывает начальная температура расплава. Показано, что, управляя параметрами интенсивности теплового потока в направлении плоскости контакта капли расплава с основой, можно получать необходимое время кристаллизации, а в результате – формировать покрытия с заданными эксплуатационными свойствами.

Введение. Модификация поверхностного слоя заготовки при наплавке происходит в рабочей зоне процесса. При электромагнитной наплавке (ЭМН) в рабочую зону непрерывно подается ферропорошок, частицы которого ориентируются вдоль силовых линий магнитного поля, образуя многоэлектродную систему токопроводящих цепочек. При наложении электрического поля на межэлектродный промежуток происходит замыкание электрической цепи «плюсый наконечник электромагнита – цепочки-микроэлектроды – заготовка», в результате чего происходит нагрев и плавление цепочек-микроэлектродов. Частицы ферропорошка под воздействием электромагнитных сил, направленного движения газов и поверхностного натяжения капель расплава переносятся на поверхность заготовки, формируя покрытие из жидкой фазы [1 – 5].

Явления, происходящие в рабочей зоне при нанесении покрытий. С момента короткого замыкания электрической цепи при ЭМН через 10^{-3} с скорость частиц составляет 15...18 м/с [2]. Если считать, что энергия одиночного разряда мгновенно выделяется вдоль его оси и переходит без потерь в энергию ударной волны, то скорость возникшей ударной волны может быть определена [6]:

$$w = \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda W}{\tau^2 \rho_0} \right)^{1/4},$$

где λ – коэффициент, зависящий от типа волны; W – энергия разряда; τ – текущее время; ρ_0 – начальная плотность среды.

Скорость движения расплавленных капель материала ферропорошка V отстает от скорости фронта ударной волны [7]:

$$V = \left(\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right) w,$$

где ρ – плотность среды после прохождения фронта ударной волны.

При ЭМН плавление цепочек-микроэлектродов, контактирующих с обрабатываемой поверхностью, происходит дискретно за счет возникновения кратковременного электрического разряда на каждой из них. Возникновение и протекание дугового разряда определяется комплексным воздействием электрических, магнитных, химических и других факторов. Дуга стремится гореть в месте наименьшего расстояния между обрабатываемой заготовкой и наконечником при минимальном сопротивлении и падении напряжения. Скорость возникновения дугового разряда и время его существования оказывают большое влияние на производительность процесса, глубину зоны термического влияния и равномерность распределения капель расплава материала ферропорошка по обрабатываемой поверхности. Частота возникновения импульсов зависит от силы разрядного тока, напряжения источника, размеров частиц ферропорошка, скорости, вращения заготовки, состава окружающей среды и других факторов [1 – 3].

Длительность и частота возникновения импульсов непостоянны. Возникновение импульса на одной из цепочек не совпадает с моментами возникновения на других. В большинстве случаев возникающий импульс подавляет течение дуговых разрядов на соседних цепочках-микроэлектродах, а при одновременном возникновении нескольких импульсов их амплитуды меньше амплитуды тока одиночного импульса. В паузах между дуговыми разрядами сила разрядного тока вначале падает до минимального значения, а затем снова нарастает. Повторный импульс может произойти в системе без замыкания, путем ионизации газов в рабочей зоне под действием дугового разряда на соседней цепочке [2 – 4].

Процесс плавления цепочек-микроэлектродов для многомикроэлектродной системы аналогичен плавлению одиночной цепочки-микроэлектрода. В то же время поведение многомикроэлектродной системы имеет некоторые особенности. Так, система может быть настроена таким образом, что в рабочей зоне будет преобладать одиночное пульсирующее горение цепочек-микроэлектродов. В этом случае процесс ЭМН идет неустойчиво, формирование наплавленного слоя осуществляется нестабильно, расход электроэнергии минимальный, производительность невысокая. Когда в рабочей зоне преобладает групповое перекрываемое горение дуги у цепочек-микроэлектродов, процесс осуществляется устойчиво, обеспечивается стабильность и хорошее формирование покрытия [1 – 5].

Температурно-временной фактор влияет на образование новых фаз в системе покрытия – основа [3, 8] и определяет физико-механические и эксплуатационные свойства поверхностного слоя (рис. 1).

При нанесении покрытия с использованием ЭМН источником теплового воздействия является энергия электрического разряда. Поскольку электрическое сопротивление цепочки переменна по длине, то плотность проходящего по ней тока не одинакова, что обуславливает различный градиент температур в зонах контакта частиц ферропорошка между собой и с поверхностью заготовки [2, 4].

В общем случае тепловая мощность q_{Σ} , расходуемая на нагрев и плавление цепочки-микроэлектрода, определяется мощностью q_{δ} , выделяющейся по ее длине от проходящего тока, и эффективной мощностью $q_{\Sigma 0}$ электрической дуги [6]:

$$q_{\Sigma} = q_{\delta} + q_{\Sigma 0} = I^2 R_{\Sigma} + \eta_{\Sigma} IU,$$

где I – сила тока; R_{Σ} – сопротивление цепочки-микроэлектрода; η_{Σ} – эффективный КПД нагрева дугой; U – напряжение дуги.

При низкой интенсивности передачи энергии электромагнитного поля и постоянном внешнем давлении, когда потери энергии в окружающую среду минимальны, составляющая тепловой мощности q_{δ} может вызвать изотермическое расплавление цепочки-микроэлектрода. Однако в реальном процессе энергия подводится так быстро, что выделяющаяся теплота не успевает отводиться и контактирующий участок заготовки оплавляется.

Рис. 1. Влияние температуры T : а – на твердость HRC (сплошные линии), прочность сцепления покрытия с основой $\sigma_{сц}$ (штриховые линии); б – на образование областей спекания (I), смешанных (II) и литых (III) структур при скоростях нагрева: 6,25° C/c (1); 12,50° C/c (2); 18,75° C/c (3)

Тепловое взаимодействие между покрытием и основой при электромагнитной наплавке. Основные недостатки упрочненных и восстановленных деталей – низкая адгезия покрытий и возникновение значительных растягивающих остаточных напряжений, отрицательно влияющих на прочность сцепления покрытия с основой [4]. При ЭМН основной вклад при образовании остаточных напряжений вносят термические напряжения, величина которых зависит от температурных полей в системе покрытие – основа. Для анализа температурных полей рассмотрим тепловое взаимодействие частицы покрытия с основой, ее кристаллизацию и дальнейшее охлаждение до температуры основы.

Существенную роль в тепловых процессах ЭМН играет дуговой электрический разряд, сопровождающийся процессами плавления и кристаллизации наплавленных частиц ферропорошка [3, 4], поэтому важен расчет термического цикла процесса кристаллизации частицы порошка и температурных полей взаимодействующих материалов, определяющих прочность сцепления частицы с основой, площадь нанесенного покрытия и термические напряжения, возникающие в системе покрытие – основа.

Важной задачей расчета является определение времени существования контакта частицы – основа при температурах, достаточных для активации, так как это обеспечивает образование прочных связей жидкой капли с основой.

Взаимная независимость поведения частиц на основе существенно облегчает анализ механизмов образования покрытия, основанных на теплофизических и физико-химических явлениях при затвердевании жидкой капли. В отличие от компактного материала, имеющего межзеренные и межфазные границы, в наплавленном покрытии имеется еще два типа границ, оказывающих существенное влияние на свойства покрытия: границы между частицами и границы, разделяющие покрытие с основой.

Взаимодействие между покрытием и основой при ЭМН можно разделить на последовательные стадии:

- образование контакта – физическое сближение частиц ферропорошка и основы на расстояние, достаточное для химического взаимодействия;

- активация и химическое взаимодействие атомов, приводящее к установлению прочной химической связи между ними;

- релаксационные процессы – рекристаллизация, гетеродиффузия, образование новых фаз.

Первые две стадии протекают на поверхности, а последняя – в объеме материала.

При определенных условиях процесс образования прочной химической связи между жидкими каплями и основой можно представить как топохимическую мономолекулярную реакцию и описать с помощью кинетического уравнения Аррениуса [9]:

$$t_a = -\frac{1}{\delta} \ln \left(1 - \frac{N}{N_0} \right) \exp \left(\frac{E_0}{kT} \right),$$

где t_a – время, необходимое для того, чтобы прореагировало N атомов на поверхности основы; δ – частота собственных колебаний атомов; N_0 – общее число атомов на поверхности основы; E_0 – энергия активации, которой должны обладать атомы поверхности основы; T – температура, при которой происходит процесс; k – постоянная Больцмана.

Из уравнения Аррениуса можно вычислить величину относительной прочности соединения:

$$\frac{N}{N_0} = 1 - \exp \left[\frac{\delta t_a}{\exp(E_0/kT)} \right].$$

Одним из главных параметров, характеризующих кинетику протекания химической реакции, является температура, установившаяся в контакте «жидкая капля – твердая основа». Скорость реакции зависит от условий активации атомов основы, так как все атомы расплавленной частицы активированы.

Кинетическое уравнение скорости реакции в дифференциальной форме можно представить выражением [10]:

$$\frac{dX}{dt} = (N_0 - X) \delta \exp \left(\frac{E_0}{kT_k} \right) \exp \left(\frac{S}{k} \right),$$

где X – число атомов, прореагировавших за время t ; T_k – температура контакта; S – энтропия активации, учитывающая вероятность W_1 благоприятной ориентации возбужденных атомов вещества в зоне химического взаимодействия и вероятность W_2 совпадения моментов их возбуждения ($S = k \ln W_1 W_2$).

В случае наплавки ферропорошка на основу железа и легирующих элементов конфигурационная энтропия мала, поэтому член, описывающий энтропию, можно принять равным единице.

Тогда имеем

$$\frac{dX}{dt} = (N_0 - X) \delta \exp \left(\frac{E_0}{kT_k} \right).$$

После интегрирования (при $T_k = \text{const}$) в пределах: при $t = 0$, $X = 0$ и при $t = t_a$, $X = N$ – получим длительность процесса активации реакции, в течение которой прореагирует N атомов,

$$t_a = \frac{1}{\delta} \ln \left(\frac{N_0}{N_0 - N} \right) \exp \left(\frac{E_0}{kT_k} \right) = -\frac{1}{\delta} \ln \left(1 - \frac{N}{N_0} \right) \exp \left(\frac{E_0}{kT_k} \right).$$

Рассматривая взаимодействие материалов, при нанесении покрытия и принимая во внимание взаимную независимость поведения капель расплава на основе, решение задачи можно свести к теплофизическим и физико-химическим явлениям при затвердевании капли [10]. Полученная зависимость t_a характеризует время протекания реакции, необходимое для соединения частиц с основой на данную величину прочности сцепления.

Таким образом, можно утверждать, что для ЭМН кинетика образования связей частиц с основой описывается топохимическими реакциями первого порядка. Определяющими факторами в процессе формирования химических связей являются температура и длительность взаимодействия, а также свойства материалов ферропорошка и основы.

Расчет термического цикла контакта частицы материала ферропорошка с основой. Процесс формирования покрытия при ЭМН объединяет явления различной физической природы. К числу важнейших следует отнести структурные и фазовые превращения, условия протекания которых определяют физико-механические свойства покрытий. Формирование покрытия прежде всего связано с процессами кристаллизации и охлаждения капель расплава ферропорошка при их взаимодействии с основой.

Решение задачи кристаллизации жидкой капли при ЭМН точными аналитическими методами не представляется возможным. Это обусловлено нелинейностью граничных условий, конечными размерами тел, изменением теплофизических свойств покрытия и основы. Поэтому для изучения теплообмена в контакте основы с жидкой каплей расплава порошка воспользуемся методом А.И. Вейника [11, 12].

Рассмотрим задачу кристаллизации и охлаждения жидкой капли расплава порошка на основе. Математическая модель процесса кристаллизации и охлаждения жидкой частицы описывается системой уравнений, характеризующих температурное поле в покрытии и основе, начальными условиями (распределение температуры по сечению тел в начальный момент времени), граничными условиями (тепловое взаимодействие системы тел основа – покрытие – окружающая среда), геометрическими параметрами (размеры, конфигурация) и теплофизическими свойствами взаимодействующих тел.

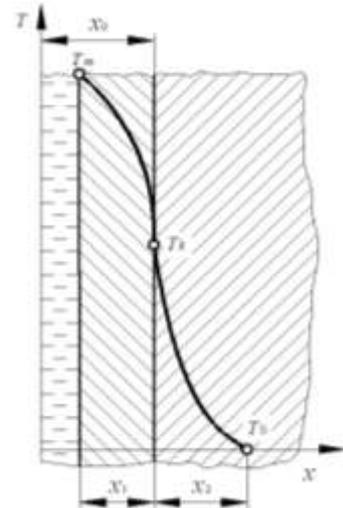


Рис. 2. Схема распределения температуры в сечении покрытия и основы

Предположим, что в момент времени $t_0 = 0$ жидкий расплав, имеющий температуру кристаллизации T_m , соприкасается с массивной основой, имеющей начальную температуру T_0 (рис. 2). Поля температур в затвердевшем объеме покрытия и основы можно представить в виде следующих функций [12]:

$$T_1 = -(T_m - T_k) \left(\frac{x}{x_1} \right)^{n_1} + T_m;$$

$$T_2 = (T_k - T_0) \left(\frac{x}{x_2} \right)^{n_2} + T_0,$$

где x_1 – толщина закристаллизовавшейся капли к моменту времени t ; x_2 – глубина прогревшего слоя основы в тот же момент времени; T_k – температура в точке контакта; T_m – температура кристаллизации жидкого расплава; n_1 и n_2 – параметры кривых.

Точка контакта находится в тепловом равновесии, т.е.

$$dQ_1 = dQ_2. \tag{1}$$

Уравнение теплового баланса для единицы длины формируемого покрытия:

$$dQ_1 = dQ_{A1} + dQ_m. \tag{2}$$

Левая часть уравнения (2) выражает накопление теплоты в покрытии сечением F в единицу времени:

$$dQ_1 = \lambda_1 n_1 \frac{T_m - T_k}{x_1} F dt,$$

где λ_1 – коэффициент теплопроводности материала частицы.

Первый член правой части уравнения (2) представляет собой количество аккумулированной теплоты покрытием сечением F :

$$dQ_{A1} = \frac{1}{n_1 + 1} F \rho_1 C_1 (T_m - T_k) dx_1,$$

где ρ_1, C_1 – соответственно плотность и теплоемкость материала частицы.

Второй член правой части уравнения (2) равен количеству теплоты кристаллизации покрытия сечением F :

$$dQ_m = FL\rho_1 dx_1,$$

где L – скрытая теплота кристаллизации.

Уравнение теплового баланса нагрева основы можно представить как

$$dQ_2 = dQ_{A2}. \tag{3}$$

Левая часть уравнения (3) представляет собой накопление теплоты в основе в единицу времени:

$$dQ_2 = \lambda_2 n_2 \frac{T_m - T_k}{x_2} F dt,$$

где λ_2 – коэффициент теплопроводности материала основы.

Правая часть уравнения (3) выражает количество аккумулированной теплоты основой

$$dQ_{A2} = \frac{1}{n_2 + 1} F \rho_2 C_2 (T_m - T_0) dx_2,$$

где ρ_2, C_2 – соответственно плотность и теплоемкость материала основы.

Равенство (1) можно переписать в виде:

$$\lambda_1 n_1 \frac{T_m - T_k}{x_1} = \lambda_2 n_2 \frac{T_k - T_0}{x_2}, \quad (4)$$

или

$$\frac{1}{n_1 + 1} \rho_1 C_1 (T_m - T_k) + L \rho_1 x_1 = \frac{1}{n_2 + 1} \rho_2 C_2 x_2 (T_m - T_0). \quad (5)$$

Определив из (4) разность температур и подставив в (5), получим квадратичное уравнение:

$$\beta v^2 - \gamma v - (1 + \gamma) = 0, \quad (6)$$

где приняты следующие обозначения:

$$\beta = \frac{1}{k_\varepsilon} \frac{n_2 (n_1 + 1)}{n_1 (n_2 + 1)}; \quad k_\varepsilon = \frac{\lambda_1 C_1 \rho_1}{\lambda_2 C_2 \rho_2}; \quad v = \frac{\lambda_1 n_1 x_2}{\lambda_2 n_2 x_1}; \quad \gamma = (n_1 + 1) \frac{L}{C_1 (T_m - T_0)}.$$

Решению уравнения (6) соответствует корень

$$v = \frac{\gamma + \sqrt{\gamma^2 + 4\beta(1 + \gamma)}}{2\beta}.$$

Так как $v = \text{const}$, то постоянной будет и температура контактной поверхности, определяемая выражением:

$$T_k = \frac{v T_m + T}{1 + v}.$$

Запишем дифференциальное уравнение теплового баланса для покрытия:

$$\lambda_1 n_1 \frac{T_m - T_k}{x_1} dt = \frac{1}{n_1 + 1} \rho_1 C_1 (T_m - T_k) dx_1 + L \rho_1 dx_1. \quad (7)$$

Интегрируя (7), получим полное время кристаллизации слоя расплава толщиной x_0 :

$$t^* = \left[\frac{1}{n_1 (n_1 + 1)} + \frac{L}{n_1 C_1 (T_m - T_k)} \right] \frac{x_0^2}{2a_1} + C^*, \quad (8)$$

где $a_1 = \frac{\lambda_1}{\rho_1 C_1}$ – коэффициент температуропроводности материала порошка; C^* – постоянная интегрирования, определяемая из начального условия.

При $n_1 = 3$ зависимость (8) совпадает с ранее полученным решением аналогичной задачи [12].

Рассмотрим охлаждение покрытия, связанное с величиной теплоотдачи в глубь основы и окружающую среду.

При охлаждении покрытие теряет тепло в количестве

$$dQ = -F x_1 \rho_1 C_1 dT_1.$$

Часть тепла аккумулируется основой, остальное тепло выделяется в окружающую среду. Количество аккумулированного основой тепла:

$$dQ_A = \frac{1}{n_2 + 1} F x_2 \rho_2 C_2 d(T_1 - T_2) + F x_2 \rho_2 C_2 dT_2. \quad (9)$$

Количество тепла, выделенное покрытием в окружающую среду:

$$dQ_{окр} = \alpha_1 F T_1 dt. \quad (10)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности покрытия.

Коэффициент теплоотдачи α определяется в зависимости от способа охлаждения наплавляемой детали. При вынужденном охлаждении

$$\alpha = f(\text{Re}, \text{Pr}),$$

где Re , Pr – соответственно числа Рейнольдса и Прандтля.

При ламинарном режиме течения жидкости для плоской щели

$$\alpha = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda}{d},$$

где d – диаметр трубопровода; Nu – среднее значение числа Нуссельта, определяемое зависимостями:

$$\text{Nu} = 1,85 \left(\text{Pe} \frac{2d}{l} \right)^{\frac{1}{3}} \text{ при } \text{Pe} \frac{2d}{l} > 70;$$

$$\text{Nu} = 7,5 \left(\text{Pe} \frac{2d}{l} \right)^{\frac{1}{3}}, \text{ при } \text{Pe} \frac{2d}{l} < 70,$$

в которых l – длина трубопровода; Pe – число Пекле.

Полное количество тепла, выделенное покрытием:

$$dQ_1 = dQ_A + dQ_{окр}. \quad (11)$$

Это же количество тепла передается через контактную поверхность и определяется из уравнения теплопроводности Фурье:

$$dQ_1 = \lambda_2 m_2 \frac{T_1 - T_2}{x_2} F dt. \quad (12)$$

Из уравнений (9)...(12) получаем систему:

$$\left. \begin{aligned} x_1 \rho_1 C_1 \frac{dT_1}{dt} + \frac{\lambda_2 n_2}{x_2} (T_1 - T_2) &= 0 \\ \left(x_1 \rho_1 C_1 + \frac{x_2 \rho_2 C_2}{n_2 + 1} \right) \frac{dT_1}{dt} + \left(\frac{n_2}{n_2 + 1} x_2 \rho_2 C_2 \right) \frac{dT_1}{dt} + \alpha_1 T_1 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Решение системы дифференциальных уравнений (13) имеет вид:

$$T_1 = \frac{A_1 P_1 + B_1}{A(P_1 - P_2)} e^{P_1(t-t^*)} + \frac{A_1 P_2 + B_1}{A(P_2 - P_1)} e^{P_2(t-t^*)};$$

$$T_2 = \frac{A_2 P_1 + B_2}{A(P_1 - P_2)} e^{P_1(t-t^*)} + \frac{A_2 P_2 + B_2}{A(P_2 - P_1)} e^{P_2(t-t^*)},$$

где P_1 и P_2 – корни характеристического уравнения:

$$AP^2 + BP + C = 0;$$

$$A = x_1 \rho_1 C_1 \frac{n_2}{n_2 + 1} x_2 \rho_2 C_2; \quad B = x_1 \rho_1 C_1 \alpha_1 + \frac{\lambda_2 n_2}{x_2} (x_1 \rho_1 C_1 \alpha_1 + x_2 \rho_2 C_2); \quad C = \frac{\lambda_2 n_2}{x_2} \alpha_1;$$

$$B_1 = \left[x_1 \rho_1 C_1 \left(\alpha_1 + \frac{\lambda_2 n_2}{x_2} \right) + \frac{n_2}{n_2 + 1} b_2 \right] T_{10} + \frac{\lambda_2 n_2}{x_2} \frac{n_2}{n_2 + 1} x_2 \rho_2 C_2 T_{20};$$

$$B_2 = \left[x_1 \rho_1 C_1 \frac{\lambda_2 n_2}{x_2} + \frac{n_2}{n_2 + 1} b_2 \right] T_{10} + \frac{n_2^2}{n_2 + 1} b_2 T_{20},$$

в которых T_{10} , T_{20} – соответственно избыточные температуры покрытия и основы в момент времени $t = t^*$; $b_2 = \rho_2 C_2 \lambda_2$.

На основании полученных выражений (1)...(13) рассчитан термический цикл контакта капле расплава частиц ферропорошка с основой. Результаты расчетов представлены на рисунках 3 – 6.

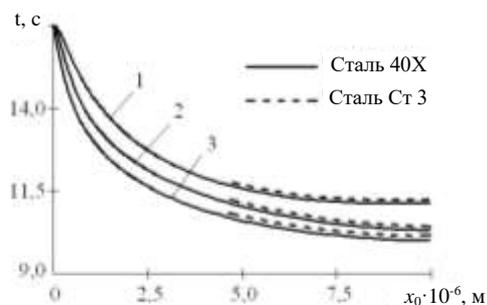


Рис. 3. Продолжительность кристаллизации капель расплава частиц ферропорошка по толщине покрытия:
1 – Сталь 45–1 % В; 2 – Fe–9 % В;
3 – Р6М5К5 на основе Сталь 40Х и Ст3

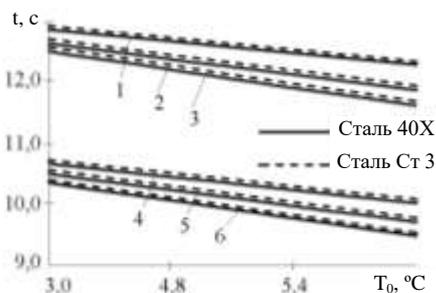


Рис. 4. Зависимость времени кристаллизации капель расплава частиц ферропорошков от начальной температуры основы для различных толщин:
1, 2, 3 – $1 \cdot 10^{-6}$ м; 4, 5, 6 – $1 \cdot 10^{-5}$ м; покрытия Сталь 45–1 % В (1, 4); Fe–9 % В (2, 5), Р6М5К5 (3, 6)

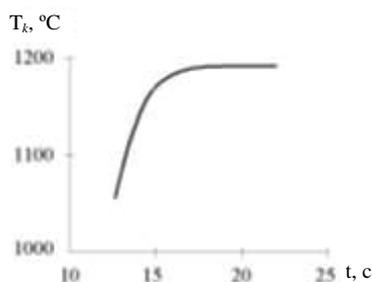


Рис. 5. Зависимость температуры в точке контакта капли расплава с основой от времени

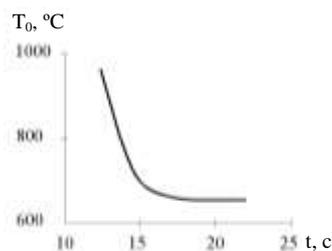


Рис. 6. Зависимость температуры нагрева основного металла при взаимодействии с каплями расплава от времени

Заключение. Анализ результатов исследований показывает, что продолжительность кристаллизации капель расплава порошка находится в степенной зависимости от величины начальной температуры основы и при кристаллизации расплава различной толщины характер этой зависимости не меняется; на изменение времени кристаллизации капель аналогичное влияние оказывает начальная температура расплава. Результаты исследований позволяют количественно оценить влияние основных теплофизических параметров материалов покрытия и основы на продолжительность термического цикла их взаимодействия. Таким образом, управляя параметрами интенсивности теплового потока в направлении плоскости контакта капли расплава с основой, можно получать необходимое время кристаллизации, а в результате – формировать покрытия с заданными эксплуатационными свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кожуро, Л.М. Обработка деталей машин в магнитном поле / Л.М. Кожуро, Б.П. Чемисов. – Минск: Наука и техника, 1995. – 232 с.
2. Технологические основы обработки изделий в магнитном поле / П.И. Ящерицин [и др.]. – Минск: ФТИ НАНБ, 1997. – 416 с.
3. Акулович, Л.М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле / Л.М. Акулович. – Новополоцк: ПГУ, 1999. – 240 с.
4. Мрочек, Ж.А. Прогрессивные технологии восстановления и упрочнения деталей машин / Ж.А. Мрочек, Л.М. Кожуро, И.П. Филонов. – Минск: Технопринт, 2000. – 268 с.
5. Хейфец, М.Л. Проектирование процессов комбинированной обработки / М.Л. Хейфец. – М: Машиностроение, 2005. – 272 с.
6. Физические процессы при электроэрозионной обработке металлов / под ред. А.П. Владзиевского // Труды ЭНИМС. – М.: ЭНИМС, 1967.
7. Коул, Р. Подводные взрывы / Р. Коул. – М.: ИЛ, 1950. – 495 с.
8. Дорожкин, Н.Н. Импульсные методы нанесения порошковых покрытий / Н.Н. Дорожкин, Т.М. Абрамович, В.К. Ярошевич. – Минск: Наука и техника, 1985. – 277 с.
9. Хейфец, М.Л. Математическое моделирование технологических процессов / М.Л. Хейфец. – Новополоцк: ПГУ, 1999. – 104 с.
10. Кудинов, В.В. Плазменные покрытия / В.В. Кудинов. – М.: Наука, 1977. – 184 с.
11. Вейник, А.И. Приближенный расчет процессов теплопроводности / А.И. Вейник. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 184 с.
12. Вейник, А.И. Термодинамика / А.И. Вейник. – Минск: Высш. шк., 1968. – 500 с.

Поступила 07.08.2007