

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ НАНЕСЕНИИ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУЕЙ ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ В ИХ КОНТАКТЕ С ПОДЛОЖКОЙ

© 2015

А.А. Хафизов, старший преподаватель кафедры «Электроэнергетика и электротехника»

Ю.И. Шакиров, кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Электроэнергетика и электротехника»

С.Н. Тимергалиев, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Математика»

В.И. Ильин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика и электротехника»
*Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского) Федерального университета,
Набережные Челны (Россия)*

Ключевые слова: математическая модель; плазменная струя; электрический разряд; жидкий катод; подложка; подслей; тепловой поток.

Аннотация: В данной работе приводятся результаты математического моделирования температурного состояния системы «подложка – подслей» при нанесении защитных покрытий из ферромагнитного порошка на стальные образцы. Рассматриваются вопросы распределения температуры и температурных градиентов в подложке и подслое и в области их контакта. Подробно описывается процесс нанесения покрытия плазменной струей, полученной в электрическом разряде с жидким катодом, а также плазменная установка, с помощью которой производили напыление ферромагнитного порошка. В работе также рассматривается способ получения ферромагнитного порошка. При решении задачи использовали метод Фурье. Приводятся исходные данные для реализации вычислительной схемы. Результаты численных расчетов приведены в виде зависимостей изменения во времени температуры на контакте подслоя с подложкой и временной зависимости величины $Q=q\cdot\varphi$, где q – плотность теплового потока, падающего на свободную поверхность подслоя; φ – плотность теплового потока на контакте подслоя с подложкой. Анализ приведенных данных показывает, что в системах контактного теплообмена «подслей – подложка» с близкими значениями теплофизических характеристик материалов составляющих наблюдается медленный рост во времени температуры контакта. В таких системах плотность теплового потока в области контакта подслоя с подложкой незначительно отличается от плотности потока, вызывающего разогрев свободной поверхности подслоя, причем с течением времени они стремятся к выравниванию. Указанные временные зависимости $t_1(\tau)$ и $Q(\tau)$ обусловлены тем, что в данном случае толщина подложки значительно превосходит толщину подслоя.

ВВЕДЕНИЕ

Прочность защитного покрытия и поверхностное упрочнение наносимого с помощью плазменной струи, полученного в электрическом разряде с жидким катодом [1; 2], и его сцепление с подложкой в значительной степени зависит от наличия остаточных напряжений [3; 4] в системе «покрытие – подложка». Изучению роли остаточных напряжений в сварных соединениях посвящено значительное количество как зарубежных, так и отечественных исследований [5–7]. Снизить уровень остаточных напряжений можно путем нанесения на подложку дополнительного подслоя [8]. Поскольку подложка и подслей обладают различными теплофизическими свойствами, то при тепловом воздействии на систему «подложка – подслей» при нанесении покрытий возникают температурные напряжения [9; 10]. Поэтому при разработке технологии нанесения покрытий (подложка+подслей) важное значение приобретает информация о распределении температуры и температурных градиентов в подложке и подслое и в области их контакта.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В данной работе приводятся результаты математического моделирования температурного состояния системы «подложка – подслей» при нанесении защитных покрытий из ферромагнитного порошка плазменной струей (рис. 1), полученной в электрическом разряде с жидким катодом на стальные образцы [11; 12]. Ферромагнитный порошок получен в высоковольтном

электрическом разряде между стальным электродом-анодом и жидким катодом при атмосферном давлении напряжением $U=1000-1300$ В, током $I=0,6-10$ А, при межэлектродном расстоянии $S=5-10$ мм [13; 14].

Тепловое воздействие частиц покрытия на свободную поверхность подслоя принимается эквивалентным разогреву этой поверхности тепловым потоком заданной мощности $q=\text{const}$. Температура t_0 подложки и подслоя в начальный момент времени одинакова, а толщина подложки $l-d \gg d$ толщины подслоя.

Можно считать, что распределение температурных полей в указанной системе осуществляется путем теплопроводности следующим образом:

$$\frac{\partial t_1(x, \tau)}{\partial \tau} = a_1 \cdot \frac{\partial^2 t_1(x, \tau)}{\partial x^2} \quad (0 < x < d, \quad \tau > 0), \quad (1)$$

$$\frac{\partial t_2(x, \tau)}{\partial \tau} = a_2 \cdot \frac{\partial^2 t_2(x, \tau)}{\partial x^2} \quad (d < x < l, \quad \tau > 0), \quad (2)$$

$$t_1(x, 0) = t_2(x, 0) = t_0, \quad (3)$$

$$t_1(d, \tau) = t_2(d, \tau), \quad (4)$$

$$-\lambda_1 \cdot \frac{\partial t_1(d, \tau)}{\partial x} = -\lambda_2 \cdot \frac{\partial t_2(d, \tau)}{\partial x} = \varphi(\tau), \quad (5)$$

$$-\lambda_1 \cdot \frac{\partial t_1(0, \tau)}{\partial x} = q, \tag{6}$$

где функции $t_1^*(x, \tau)$, $X_k(x)$, $T_k(\tau)$ даются формулами:

$$\frac{\partial t_2(l, \tau)}{\partial x} = 0, \tag{7}$$

$$t_1^*(x, \tau) = \frac{q - \varphi(\tau)}{2d\lambda_1} \cdot x^2 - \frac{q}{\lambda_1} \cdot x;$$

$$X_k(x) = \cos(\mu_k x), \mu_k = \left(\frac{\pi \cdot k}{d}\right)^2, k = 0, 1, \dots,$$

где $t_1(x, \tau), t_2(x, \tau)$ – температуры, соответственно, подслоя и подложки в точке x в момент времени τ ;
 d – толщина подслоя;
 $l-d$ – толщина подложки;
 a_j и $\lambda_j (j=1,2)$ – соответственно, коэффициенты тепло- и теплопроводности;
 $q = const$ – тепловой поток заданной мощности;
 $\varphi(\tau)$ – плотность теплового потока на контакте подложки с подслоем;
 t_0 – начальная температура.

Задача заключается в нахождении температур $t_j(x, \tau), j=1,2$ и плотности $\varphi(\tau)$ из (1)–(7).

$$T_k(\tau) = \begin{cases} e^{-a_1 \mu_k \tau} \left[\int_0^\tau b_k(t) e^{a_1 \mu_k t} dt + a_k \right], & k = 1, 2, \dots, \\ \int_0^\tau b_0(t) dt + a_0, & k = 0; \end{cases}$$

$$b_k(\tau) = \begin{cases} \frac{2(-1)^k}{\lambda_1 \cdot \mu_k \cdot d} \cdot \varphi'(\tau), & k = 1, 2, \dots, \\ \frac{a_1(q - \varphi(\tau))}{d \cdot \lambda_1} + \frac{d}{6\lambda_1} \cdot \varphi'(\tau), & k = 0; \end{cases}$$

$$a_k = \begin{cases} -\frac{2q}{\lambda_1 \cdot d \cdot \mu_k}, & k = 1, 2, \dots, \\ t_0 + \frac{q \cdot d}{3\lambda_1}, & k = 0; \end{cases}$$

При выводе решения (8) мы учли, что $\varphi(0) = 0$.

Аналогичным образом находим решение уравнения (2), удовлетворяющее условиям в (3), (5), (7), которое имеет вид:

$$t_2(x, \tau) = \sum_{k=0}^{+\infty} \tilde{T}_k(\tau) \cdot \tilde{X}_k(x) + t_2^*(x, \tau), \tag{9}$$

где

$$t_2^*(x, \tau) = \frac{\varphi(\tau)}{2(l-d)\lambda_2} (x^2 - 2lx),$$

$$\tilde{X}_k(x) = \cos[\tilde{\mu}_k(x-d)], \tilde{\mu}_k = \left(\frac{\pi \cdot k}{l-d}\right)^2, k = 0, 1, 2, \dots;$$

$$\tilde{T}_k(\tau) = \begin{cases} e^{-a_2 \tilde{\mu}_k \tau} \left[\int_0^\tau \tilde{b}_k(t) e^{a_2 \tilde{\mu}_k t} dt \right], & k = 1, 2, \dots, \\ \int_0^\tau \tilde{b}_0(t) dt + t_0, & k = 0; \end{cases}$$

$$\tilde{b}_k(\tau) = \begin{cases} \frac{(-2)\varphi'(\tau)}{\lambda_2(l-d)\tilde{\mu}_k}, & k = 1, 2, \dots, \\ \frac{a_2}{\lambda_2(l-d)} \varphi(\tau) + \frac{2l^3 - 3ld^2 + d^3}{6\lambda_2(l-d)^2} \cdot \varphi'(\tau), & k = 0 \end{cases}$$

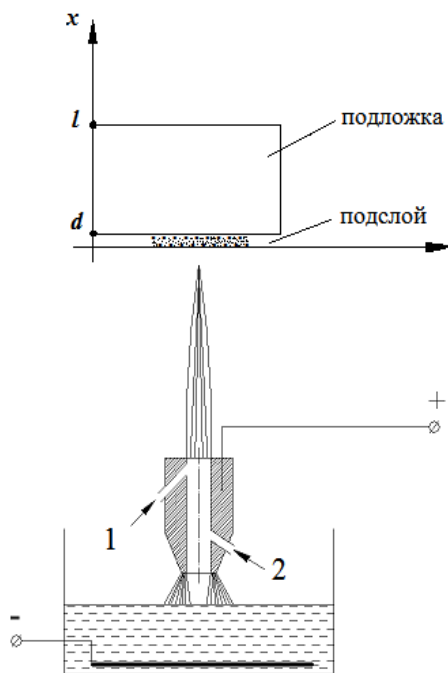


Рис. 1. Схема процесса напыления порошка плазменной струей: 1 – канал для подачи напыляемого порошка; 2 – канал для подачи плазмообразующего газа

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

При решении задачи (1)–(7) будем использовать метод Фурье [15; 16]. Сначала находим решение уравнения (1), удовлетворяющее условиям в (3), (5), (6), считая $\varphi(\tau)$ временно известной. Это решение получаем в виде:

$$t_1(x, \tau) = \sum_{k=0}^{+\infty} T_k(\tau) X_k(x) + t_1^*(x, \tau), \quad 0 \leq x \leq d, \tau > 0, \tag{8}$$

Теперь решения (8), (9) подставим в условие (4). В результате для определения плотности $\varphi(\tau)$ получим интегральное уравнение Вольтерра первого рода [17; 18] вида:

$$\int_0^\tau \left\{ \theta \left[\frac{\pi a_1}{d^2} (\tau - t) \right] + \frac{\beta_0}{l-d} \theta \left[\frac{\pi a_2}{(l-d)^2} (\tau - t) \right] \right\} \varphi(t) dt = \psi(\tau), \quad (10)$$

где $\theta(x)$ – тэта-функция, определенная формулой:

$$\theta(x) = 1 + 2 \sum_{k=1}^{+\infty} e^{-\pi k^2 x},$$

$$\psi(\tau) = q(\tau) - \frac{d^2 q}{6\lambda_1} - \frac{2d^2 q}{a_1 \pi^2} \sum_{k=1}^{+\infty} \frac{(-1)^k \cdot e^{-a_1 \mu_k \tau}}{k^2},$$

$$\beta_0 = \frac{d\lambda_1 a_2}{a_1 \lambda_2}.$$

Интегральное уравнение (10) решаем численно [19; 20]. Пусть $\tau \in [0, T]$, $\tau_j = j \cdot h$, $j = \overline{1, N}$, $h = T/N$. Для нахождения значений $\varphi(\tau_j)$ в узлах τ_j , $j = \overline{1, N}$, получаем рекуррентные соотношения:

$$\begin{aligned} \varphi(\tau_{j+1}) = & \frac{\{\psi_m(\tau_{j+1}) - h \cdot [\varphi(\tau_1) \cdot k_m(\tau_{j+1}; \frac{\tau_1}{2}) + \\ & + \frac{\varphi(\tau_2) \cdot k_m(\tau_{j+1}; \frac{\tau_1 + \tau_2}{2}) + \dots + \\ & + \frac{\varphi(\tau_j) \cdot k_m(\tau_{j+1}; \frac{\tau_{j-1} + \tau_j}{2})]\}}{h \cdot k_m(\tau_{j+1}; \frac{\tau_j + \tau_{j+1}}{2})} + \\ & + \frac{\varphi(\tau_j) \cdot k_m(\tau_{j+1}; \frac{\tau_{j-1} + \tau_j}{2})}{h \cdot k_m(\tau_{j+1}; \frac{\tau_j + \tau_{j+1}}{2})} \} \\ & j = 0, 1, \dots, N-1, \end{aligned} \quad (11)$$

где

$$k_m(\tau; t) = \theta_m \left[\frac{\pi a_1}{d^2} \cdot (\tau - t) \right] + \frac{\beta_0}{l-d} \theta_m \left[\frac{\pi a_2}{(l-d)^2} \cdot (\tau - t) \right],$$

$$\theta_m(x) = 1 + 2 \sum_{k=1}^m e^{-\pi k^2 x},$$

$$\psi_m(\tau) = q\tau - \frac{d^2 q}{6\lambda_1} - \frac{2d^2 q}{a_1 \pi^2} \sum_{k=1}^m \frac{(-1)^k e^{-a_1 \mu_k \tau}}{k^2},$$

m – достаточно большое натуральное число.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Вычислительная схема (11) реализована при следующих исходных данных: $a_1 = 12,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $\lambda_1 = 20 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, $a_2 = 12,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $\lambda_2 = 46 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, $m = 100$, $d = 10^{-3} \text{ м}$, $q = 4 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2$, $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

Результаты численных расчетов приведены на рис. 2, 3.

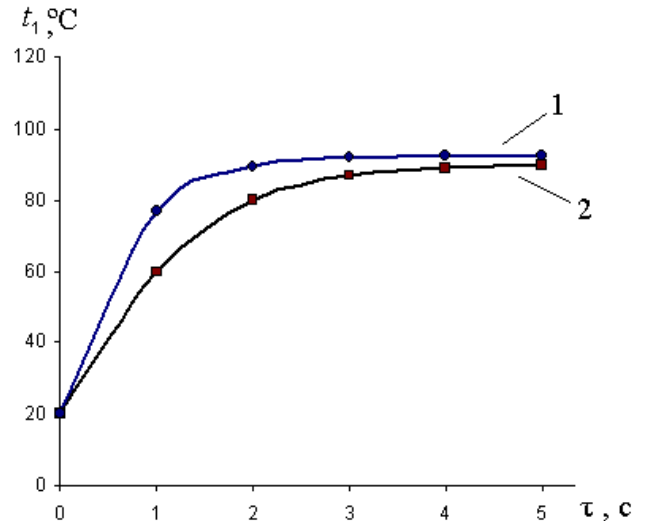


Рис. 2. Изменение во времени τ температуры t_1 на контакте подслоя с подложкой: 1 – при $l = 10^{-2} \text{ м}$; 2 – при $l = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$

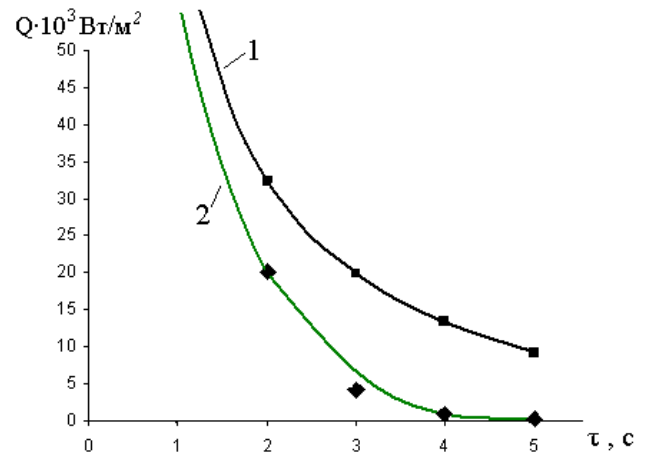


Рис. 3. Временная зависимость величины $Q = q - \varphi$: 1 – при $l = 10^{-2} \text{ м}$; 2 – при $l = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; q – плотность теплового потока, падающего на свободную поверхность подслоя; φ – плотность теплового потока на контакте подслоя с подложкой

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ приведенных данных показывает, что в системах контактного теплообмена «подслой – подложка» с близкими значениями теплофизических характеристик материалов составляющих наблюдается медленный рост во времени температуры контакта t_1 . В таких системах плотность теплового потока в области контакта

подслоя с подложкой (φ) незначительно отличается от плотности потока (q), вызывающего разогрев свободной поверхности подслоя, причем с течением времени φ и q стремятся к выравниванию (что соответствует падению кривых $Q=q\varphi$ на рис. 3). Указанные временные зависимости $t_f(\tau)$ и $Q(\tau)$ обусловлены тем, что в данном случае толщина подложки значительно превосходит толщину подслоя.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в процессах нанесения защитных покрытий на двухкомпонентные объекты решение задачи регламентированного управления тепловыми параметрами находится в прямой зависимости от соответствующего выбора составляющих систему в плане оптимизации соотношения между их размерами и теплофизическими свойствами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Шакиров Ю.И., Валиев Р.И., Хафизов А.А., Шакирова Г.Ю. Многоканальная плазменная установка с электролитическим катодом // Автомобильная промышленность. 2011. № 2. С. 36–38.
- Шакиров Ю.И., Валиев Р.И., Хафизов А.А., Шакирова Г.Ю. Нанесение покрытий и поверхностное упрочнение ферромагнитным порошком в электрическом разряде // Образование и наука – производству: сб. трудов междунар. науч.-техн. и образоват. конференции. Набережные Челны: ИНЭКА, 2010. С. 201–203.
- Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. Ч. 2. Механические испытания. 3-е изд. М.: Машиностроение, 1974. 368 с.
- Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1963. 232 с.
- Колот В.А. Применение ресурсосберегающих вибрационных и отделочно-упрочняющих методов обработки нежестких деталей в тяжелом машиностроении // Технология, экономика, организация производства и управления. Серия 8. 1991. Вып. 24. С. 56.
- Гиренко В.С., Котенко Э.В. Влияние остаточных напряжений и деформационного старения на сопротивляемость стали образованию хрупких трещин // Автоматическая сварка. 1968. № 2. С. 34–37.
- Вишняков Я.Д., Пискарев В.Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах. М.: Металлургия, 1989. 254 с.
- Матвеев Н.В., Краснов А.Н., Милосердов И.В., Орещенков Ю.В., Изволенский Е.В. Остаточные напряжения в покрытии из нитрида титана, осажденного в вакууме // Проблемы прочности. 1985. № 5. С. 90–93.
- Мрочек Ж.А., Антоненко А.Б., Вершина А.К. Распределение температуры и тепловых потоков на контакте подложки с подслоем при электродуговом нанесении защитных покрытий // Электронная обработка материалов. 1987. № 1. С. 23–26.
- Биргер И.А., Мавлютов Р.Р. Сопротивление материалов. М.: Наука, 1986. 560 с.
- Khafizov A.A., Valiev R.A., Valiev R.I., Shakirov Yu.I. Steel surface modification with plasma spraying electrothermal installation using a liquid electrode //

- Journal of Physics: Conference Series. 2014. Vol. 567. doi:10.1088/1742-6596/567/1/012026.
- Khafizov A.A., Shakirov B.Yu., Shakirov Yu.I. Surface hardening of components by automatic plasma electrothermal installation with molten cathode // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2014. Vol. 69. doi:10.1088/1757-899X/69/1/012019.
- Валиев Р.И., Гайсин Ал.Ф., Гайсин Ф.М., Гумеров А.З., Насибуллин Р.Т., Садриев Р.Ш., Саримов Л.Р., Хафизов А.А. Некоторые особенности получения мелкодисперсных порошков оксида железа в низкотемпературной плазме электрического разряда с жидким катодом // Известия высших учебных заведений. Физика. 2014. Т. 57. № 3-3. С. 66–69.
- Шакиров Ю.И., Валиев Р.И., Хафизов А.А., Шакирова Г.Ю. Получение ферромагнитных порошков в электрическом разряде для изготовления деталей автомобилей // Автомобиль и техносфера: VI Междунар. науч.-практ. конференция. Казань, 2011. С. 140–141.
- Соболев С.Л. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1966. 444 с.
- Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Уравнения в частных производных математической физики. М.: Высшая школа, 1970. 710 с.
- Вольтерра В. Теория функционалов, интегральных и интегро-дифференциальных уравнений. М.: Наука, 1982. 304 с.
- Лебедев Н.Н. Специальные функции и их приложения. Л.: Физматгиз, 1963. 358 с.
- Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. М.: Наука, 1987. 600 с.
- Хемминг Р. Численные методы. 2-е изд. М.: Наука, 1972. 400 с.

REFERENCES

- Shakirov Yu.I., Valiev R.I., Hafizov A.A., Shakirova G.Yu. Multi-channel plasma apparatus for processing of materials. *Avtomobilnaya promyshlennost*, 2011, no. 2, pp. 36–38.
- Shakirov Yu.I., Valiev R.I., Hafizov A.A., Shakirova G.Yu. Applying of coatings and surface hardening with ferromagnetic powder in electric discharge. *Sbornik trudov mezhdunar. nauchno-tekhn. i obrazovat. konf. "Obrazovanie i nauka – proizvodstvu"*. Naberezhnye Chelny: INEKA Publ., 2010, pp. 201–203.
- Fridman Ya.B. *Mekhanicheskie svoystva metallov. Ch. 2. Mekhanicheskie ispytaniya* [Mechanical properties of metals. P. 2. Mechanical tests]. 3rd ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974, 368 p.
- Birger I.A. *Ostatochnye napryazheniya* [Residual stresses]. Moscow, Mashgiz Publ., 1963, 232 p.
- Kolot V.A. Use of resource-saving vibration and finishing-hardening methods of processing of non-hard parts in heavy engineering. *Tekhnologiya, ekonomika, organizatsiya proizvodstva i upravleniya. Seriya 8*, 1991, no. 24, p. 56.
- Girenko V.S., Kotenko E.V. The influence of residual stresses and age hardening on the resistance of steels to brittle fracture initiation. *Avtomaticheskaya svarka*, 1968, no. 2, pp. 34–37.
- Vishnyakov Ya.D., Piskarev V.D. *Upravlenie ostatochnymi napryazheniyami v metallakh i splavakh*

- [Control of residual stresses in metals and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1989, 254 p.
8. Matveev N.V., Krasnov A.N., Miloserdov I.V., Oreshchenkov Yu.V., Izvolenskii E.V. Residual stresses in titanium nitride coating deposited in a vacuum. *Strength of Materials*, 1985, vol. 17, no. 5, pp. 692–696.
 9. Mrochek Zh.A., Antonenko A.B., Vershina A.K. Distribution of temperature and heat flow within the contact of base coat with interlayer during arc welding applying of protective coating. *Elektronnaya obrabotka materialov*, 1987, no. 1, pp. 23–26.
 10. Birger I.A., Mavlyutov R.R. *Soprotivlenie materialov* [Strength of materials]. Moscow, Nauka Publ., 1986, 560 p.
 11. Khafizov A.A., Valiev R.A., Valiev R.I., Shakirov Yu.I. Steel surface modification with plasma spraying electrothermal installation using a liquid electrode. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, vol. 567. doi:10.1088/1742-6596/567/1/012026.
 12. Khafizov A.A., Shakirov B.Yu., Shakirov Yu.I. Surface hardening of components by automatic plasma electrothermal installation with molten cathode. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2014, vol. 69. doi:10.1088/1757-899X/69/1/012019.
 13. Valiev R.I., Gaysin A.F., Gaysin F.M., Gumerov A.Z., Nasibullin R.T., Sadriev R.Sh., Sarimov L.R., Khafizov A.A. Some peculiarities of producing fine ferrous oxide powders in low-temperature plasma of electric discharge with fluid cathode. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika*, 2014, vol. 57, no. 3–3, pp. 66–69.
 14. Shakirov Yu.I., Valiev R.I., Khafizov A.A., Shakirova G.Yu. Production of ferromagnetic powders in electric discharge for manufacturing of vehicle parts. *Materialy VI Mezhdunar. nauchno-prakt. konf. "Avtomobil i tekhnosfera"*. Kazan, 2011, pp. 140–141.
 15. Sobolev S.L. *Uravneniya matematicheskoy fiziki* [Equitation of mathematical physics]. Moscow, Nauka Publ., 1966, 444 p.
 16. Koshlyakov N.S., Gliner E.B., Smirnov M.M. *Uravneniya v chastnykh proizvodnykh matematicheskoy fiziki* [Equitation in partial derivatives of mathematical physics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1970, 710 p.
 17. Volterra V. *Teoriya funktsionalov, integralnykh i integro-differentsialnykh uravneniy* [Theory of functionals and of integral and integro-differential equations]. Moscow, Nauka Publ., 1982, 304 p.
 18. Lebedev N.N. *Spetsialnye funktsii i ikh prilozheniya* [Special functions and their applications]. Leningrad, Fizmatgiz Publ., 1963, 358 p.
 19. Bakhvalov N.S., Zhidkov N.P., Kobelkov G.M. *Chislennye metody* [Numerical methods]. Moscow, Nauka Publ., 1987, 600 p.
 20. Hamming R.W. *Chislennye metody* [Numerical methods for scientists and engineers]. 2nd ed. Moscow, Nauka Publ., 1972, 400 p.

TEMPERATURE DISTRIBUTION DURING POWDER COATINGS APPLYING USING PLASMA STREAM WITHIN THEIR CONTACT WITH THE SUBSTRATE LAYER

© 2015

A.A. *Khafizov*, senior lecturer of Chair “Power and electrical engineering”

Yu.I. Shakirov, PhD (Engineering), Associate Professor, Head of Chair “Power and electrical engineering”

S.N. Timergaliev, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of Chair “Mathematics”

V. I. Ilyin, PhD (Engineering), assistant professor of Chair “Power and electrical engineering”

Branch of Kazan (Volga Region) Federal University in Naberezhnye Chelny, Naberezhnye Chelny (Russia)

Keywords: mathematical model; plasma stream; electrical discharge; liquid cathode; substrate layer; intermediate layer; heat flow.

Abstract: This paper presents the results of mathematical modeling of temperature state of the “substrate – intermediate layer” system when applying ferromagnetic powder protective coatings on the steel samples. The authors consider the issues of temperature and temperature gradients distribution in the substrate and the underlayer, and in the area of their contact and describe in detail the process of coating applying using the plasma stream produced by the electrical discharge with the liquid cathode, as well as the plasma sprayer for ferromagnetic powder applying. The paper considers the method of ferromagnetic powder producing. To solve the issue, the authors use Fourier method and give the initial data for the computational scheme implementation. The results of numerical calculations are presented in the form of dependences of temperature behavior in time in the intermediate layer contact with the substrate and the time dependence of $Q=q-\varphi$ value; where q – is the heat flux density incident to the underlayer free surface; and φ – is the heat flux density within the contact of the underlayer with the substrate. Data analysis shows that within the “substrate – intermediate layer” contact heat exchange systems with the similar values of thermal and physical characteristics of the constituent materials, the slow contact temperature growth in time is observed. Heat flux density within the contact area of underlayer and substrate layer in such systems slightly differs from the flux density causing the underlayer free surface heating and they tend to equalize with time. These $t_1(\tau)$ and $Q(\tau)$ time dependences are stipulated by the condition when the substrate layer thickness exceeds considerably the underlayer thickness.