

УДК 621.793.79

МОДЕЛЬ ПЛАЗМЕННОГО НАГРЕВА КОМПОЗИЦИИ «МЕТАЛЛИЗАЦИОННОЕ ПОКРЫТИЕ – ОСНОВА»

© 2014 Ю.С. Коробов¹, В.С. Верхорубов¹, С.В. Невежин¹, Ю.Д. Щицын²,
Д.С. Белинин²

¹ Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Поступила в редакцию 28.11.2014

В статье рассмотрена проблема последующей плазменной обработки металлизационного покрытия на основе железа, полученного методом дуговой металлизации, с целью повышения его качества. Для решения поставленной задачи в пакете MathCad 14 разработана математическая модель процесса. Полученные графики распределения температур позволяют дать рекомендации по оптимизации параметров плазменной обработки.

Ключевые слова: модель, теплопроводность, метод прогонки, плазменная обработка, металлизационное покрытие, пористость

Структурные дефекты газотермических покрытий, связанные с условиями их формирования, не только ухудшают коррозионную стойкость системы «покрытие-основа», но также снижают и механические свойства покрытий. Для уменьшения пористости и повышения адгезионной прочности покрытий могут применяться разные методы: диффузионный отжиг в термических печах, местное оплавление покрытия концентрированными потоками энергии, дробеструйная обработка литой дробью, прокатка, термомеханическая обработка, окраска специальными лаками, высокотемпературные химические процессы [1]. В настоящее время для обработки напыленных покрытий чаще всего применяют высококонцентрированные источники нагрева [2-5], однако большинство работ по данному направлению посвящены обработке тонких покрытий из самофлюсующихся сплавов на основе никеля.

Для подбора оптимальных режимов поверхностной термообработки газотермических покрытий необходимо знать распределение температур в покрытии и подложке в процессе их нагрева. Определение температуры покрытия

затрудняется его пористой структурой и отсутствием данных о теплофизических характеристиках большинства применяемых для напыления материалов. Наибольший интерес представляет знание температуры границы «покрытие-подложка», так как большой перепад температур в данной зоне может привести к отслоению покрытия.

Цель работы: определение распределения температур в композиционном материале «металлическое покрытие-основа» для оптимизации режимов плазменной обработки металлизационных покрытий на основе железа.

Для решения поставленной задачи построим математическую модель процесса распределения температур в композиционном материале на основе решения краевой задачи теплопроводности в пакете MathCad 14. Композицию «покрытие-основа» будем считать пластиной с переменными по толщине теплофизическими свойствами (рис. 1).

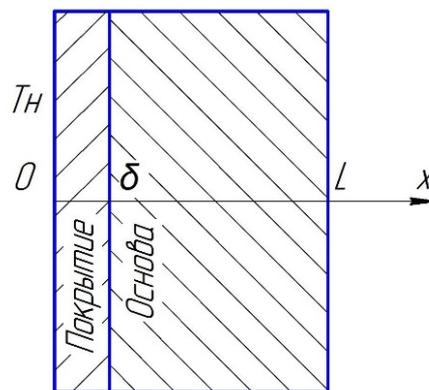


Рис. 1. Схема задачи

Коробов Юрий Станиславович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология сварочного производства». E-mail: yukorobov@gmail.com

Верхорубов Вадим Сергеевич, аспирант. E-mail: v.verkhorubov@mail.ru

Невежин Станислав Владимирович, аспирант

Щицын Юрий Дмитриевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Сварочное производство и технология конструкционных материалов». E-mail: svarka@pstu.ru

Белинин Дмитрий Сергеевич, аспирант

Математическая постановка задачи теплопроводности для одномерного поля температур имеет вид:

$$\begin{cases} c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}, 0 < x < \delta \\ c_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}, \delta < x < L \end{cases} \quad (1)$$

С учетом пористости покрытия эффективные объемная теплоёмкость и теплопроводность материала примут следующий вид [6]:

$$\begin{aligned} c\rho &= c_m \rho_m (1 - P) + c_g \rho_g P; \\ \lambda &= \lambda_m^{1-P} \lambda_g^P, \end{aligned}$$

где $c_m \rho_m$, $c_g \rho_g$ – объёмная теплоёмкость материала покрытия и воздуха в порах; λ_m , λ_g – теплопроводность материала покрытия и воздуха в порах; P – пористость покрытия (в зависимости от напыляемого материала и параметров режима дуговой металлизации может изменяться от 2 до 12% [7]).

Так как теплофизические характеристики металлизационных покрытий из порошковых проволок различного состава не известны, то их расчет будем выполнять в зависимости от процентного содержания легирующих элементов [8] по формулам (2), и будем считать их независимыми от температуры.

$$\lambda = \frac{1}{20} (11 - 7\sqrt[4]{\sigma}); \quad c\rho = \frac{1}{10} (55 - 9\sqrt[4]{\sigma}), \quad (2)$$

где σ – коэффициент зависящий от содержания легирующих элементов

$$\sigma = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{3} \left(C + \frac{1}{5} \left(Ni + Co + Cu + \frac{W}{3} \right) \right) + \frac{Mn}{14} + \frac{Si + Al}{7} + \frac{Cr + V + Ti}{13} + \frac{Mo + Nb + Zr}{24} \right)$$

Как показано в работе Стрельцова Ф.Н. [9], температура поверхности в зоне воздействия плазменной дуги сильно зависит от её параметров и изменяется в диапазоне от 2100 до 2500°C. Таким образом, температуру поверхности покрытия под воздействием сжатой дуги будем считать известной, и зададим её граничными условиями I рода.

$$T = T_w(x, t), \quad (3)$$

где $T_w(x, t)$ – температура на поверхности тела.

Для определения теплового взаимодействия между элементами с различными теплофизическими характеристиками на границе «покрытие – основа» зададим граничные условия IV рода [10].

$$\begin{cases} T_1(x, t) = T_2(x, t) \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \end{cases} \quad (4)$$

Будем считать, что обрабатываемая пластина с покрытием лежит на поверхности, плохо проводящей тепло, то есть тепловой поток в ограждающую конструкцию равен нулю.

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

Для решения дифференциального уравнения теплопроводности в частных производных воспользуемся методом конечных разностей, то есть аппроксимируем (1) их конечно-разностными аналогами.

$$c\rho \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\tau} = \lambda \left(\frac{T_{i+1}^{n+1} - 2T_i^{n+1} + T_{i-1}^{n+1}}{h^2} \right), \quad (6)$$

где T_i^n – температура в i -ом ($i = 0 \dots N$) узле в момент времени n , h , τ – шаг по координате и времени, соответственно.

Полученную систему можно свести к виду трехточечного уравнения второго порядка:

$$A_i T_{i+1}^{n+1} - B_i T_i^{n+1} + C_i T_{i-1}^{n+1} = F_i, \quad (7)$$

где $A_i = C_i = \frac{\lambda}{h^2}$; $B_i = \frac{2\lambda}{h^2} + \frac{c\rho}{\tau}$; $F_i = -\frac{c\rho}{\tau} T_i^n$

Предположим, что существуют такие наборы чисел α_i и β_i , тогда трехточечное уравнение второго порядка можно преобразовать в двухточечное уравнение первого порядка:

$$T_{i-1}^{n+1} = \alpha_i T_i^{n+1} + \beta_i \quad (8)$$

Подставив уравнение (8) в уравнение (7) получаем:

$$T_i^{n+1} = \frac{A_i}{B_i - C_i \alpha_{i-1}} T_{i+1}^{n+1} + \frac{C_i \beta_{i-1} - A_i}{B_i - C_i \alpha_{i-1}}$$

откуда получаем так называемые прогоночные коэффициенты α_i и β_i :

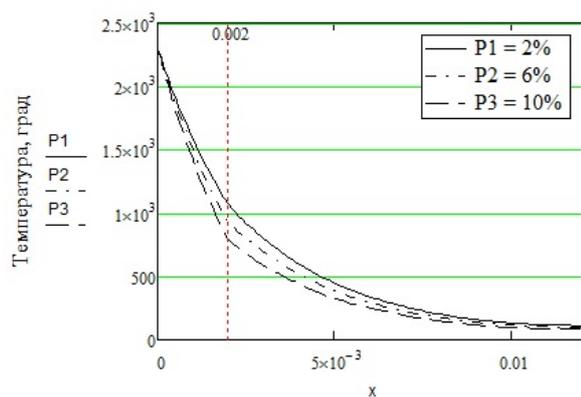
$$\alpha_i = \frac{A_i}{B_i - C_i \alpha_{i-1}}; \quad \beta_i = \frac{C_i \beta_{i-1} - A_i}{B_i - C_i \alpha_{i-1}}$$

Чтобы определить α_i и β_i необходимо знать α_0 и β_0 , которые находятся из левого граничного условия (3). Найдя все прогоночные коэффициенты и определив из правого граничного условия (5) температуру T_N можно рассчитать неизвестные T_i^{n+1} .

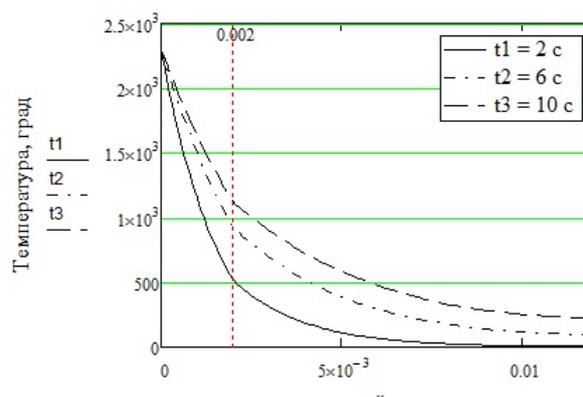
Покрытие толщиной 2 мм нанесено на подложку из низкоуглеродистой стали 20 толщиной 10 мм. В качестве материала для нанесения покрытия была использована порошковая проволока ППМ-6 системы легирования 150X8T2Ю [11]. Для определения влияния режимов плазменного воздействия и характеристик покрытия на распределение температур в композиции «покрытие-основа» проведен ряд экспериментов (табл. 1). Результаты проведенных экспериментов представлены на рис. 2.

Таблица 1. Режимы экспериментов

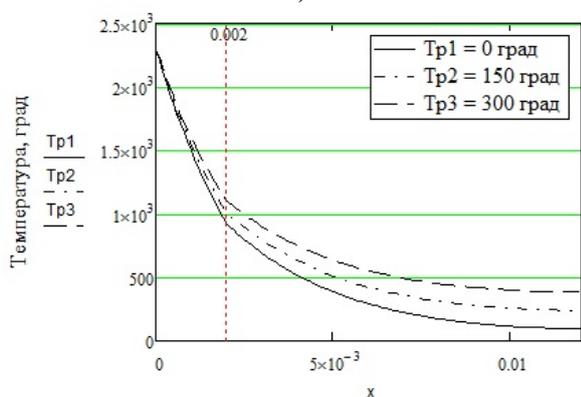
№ опыта	Пористость, %	Температура подогрева, °С	Температура нагрева (режим обработки), °С	Время воздействия, с
1	P1 = 2; P2 = 6; P3 = 10	0	2300	6
2	6	Tr1 = 0; Tr2 = 150; Tr3 = 300	2300	6
3	6	0	Tn1 = 2100; Tn2 = 2300; Tn3 = 2500	6
4	6	0	2300	t1 = 2; t2 = 6; t3 = 10



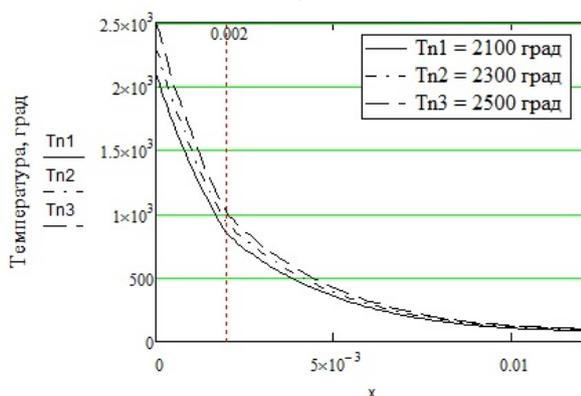
а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Графики распределения температур в зависимости от: а) пористости покрытия, б) температуры подогрева, в) температуры нагрева, г) времени воздействия источника

На рис. 2,а видно, что чем больше пористость, тем меньше интенсивность нагрева покрытия, что связано с низкой теплопроводностью воздуха в порах. Таким образом, пористость покрытия значительно усложняет процесс плазменной обработки композиционного материала. Повышение температуры предварительного подогрева (рис. 2,б), температуры нагрева поверхности изделия (рис. 2,в), регулируемой параметрами режима сжатой дуги, и времени воздействия источника на поверхность (рис. 2,г) позволяют повысить температуру на границе «покрытие-основа». Таким образом, для предотвращения отслоения покрытия вследствие больших перепадов температуры в переходной зоне может потребоваться предварительный подогрев композиции, а также повышение погонной энергии плазменной обработки.

Выводы: разработана математическая модель плазменной поверхностной обработки композиции «металлизационное покрытие-основа». Полученные графики распределения температур позволяют дать рекомендации по оптимизации параметров плазменной обработки, а также

оценить характер влияния пористости и состава покрытия на распределение температур в композиции под воздействием сжатой дуги.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Chatha, S.S. Role of post treatment in thermal spray coatings / S.S. Chatha, H.S. Sidhu, B.S. Sidhu // National Conference on Advancements and Futuristic Trends in Mechanical and Materials Engineering. 2011. Vol. 2, No. 1-2. P.153-162..
2. Pokhmurs'ka, H. Effect of the laser fusion of electro-metallized coatings of the Fe-Cr-B-Al system on their corrosion resistance / H. Pokhmurs'ka, N. Chervins'ka, M. Student, Kh. Zadorozhna // Materials Science. 2006. Vol. 42, No. 6. P. 837-842.
3. Клеменов, В.А. Исследование структуры и свойств никелевых порошковых покрытий после оплавления / В.А. Клеменов, В.Е. Панин, В.П. Безбородов и др. // Физика и химия обработки материалов. 1997. №6. С. 68-75.
4. Zhang, S.H. Improvement on HVOF sprayed Diamalloy coatings by laser irradiation // Applied physics A. 2012. 108. P. 201-209.
5. Митрофанов, А.А. Обработка газотермических покрытий с использованием лазерного излучения / А.А. Митрофанов, Е.А. Чащин, С.А. Балашиова // Вестник ИГЭУ. 2011. Вып. 1. С. 1-4.
6. Акулич, П.В. Расчеты сушильных и теплообменных установок. – Минск: Беларус. навука, 2010. 443 с.
7. Петров, С.В. Плазма продуктов сгорания в инженерии поверхности / С.В. Петров, А.Г. Сааков. – Киев: Топас, 2000. 220 с.
8. Конищев, Б.П. Расчет теплофизических коэффициентов сталей по их химическому составу и температурной зависимости теплофизических свойств цветных металлов / Б.П. Конищев, К.Б. Конищев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 5 (102). С. 31-36.
9. Стрельцов, Ф.Н. Температура поверхности металлургического расплава в зоне воздействия плазменной дуги / Ф.Н. Стрельцов, И.П. Потанов // ФХОМ. 1974. № 6. С. 42-46.
10. Кузнецов, Ю.С. Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие / Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. 172 с.
11. Коробов, Ю.С. Разработка порошковых проволок для получения покрытий, стойких к износу и газовой коррозии / Ю.С. Коробов, В.И. Шумяков, М.А. Филиппов, С.В. Неvezжин // Сварщик в России. 2012. № 4. С. 8-10.

MODEL OF PLASMA HEATING THE COMPOSITION

“METALLIZATION COATING – BASIS”

© 2014 Yu.S. Korobov¹, V.S. Verkhorubov¹, S.V. Nevezhin¹, Yu.D. Shchitsyn²,
D.S. Belinin²

¹ Ural Federal University, Ekaterinburg

² Perm National Research Polytechnical University

In article the problem of subsequent plasma processing of metallization coating on the basis of iron received by method of arc metallization for the purpose of quality increasing is considered. The mathematical model of process is developed for the solution in MathCad 14 package. The received schedules of temperatures distribution allow to make recommendations about optimization the parameters of plasma processing.

Key words: *model, heat conductivity, sweep method, plasma processing, metallization coating, porosity*

Yuriy Korobov, Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Department “Technologies of Welding
Production”. E-mail: yukorobov@gmail.com

Vadim Verkhorubov, Post-graduate Student. E-mail:
v.verkhorubov@mail.ru

Stanislav Nevezhin, Post-graduate Student

Yuriy Shchitsyn, Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Department “Welding Production and
Technology of Constructional Materials”. E-mail:
svarka@pstu.ru

Dmitriy Belinin, Post-graduate Student