

ных станций и газопроводах, а также для обеспечения безопасности работ пневмосистем автотранспорта при отрицательных температурах.

Литература

1. Синайский, Э.Г. Сепарация многофазных многокомпонентных систем / Э.Г. Синайский [и др.]. – М.: Недра. 2002. – 226 с.
2. Гликоли и опыт их применения в нефтяной и газовой промышленности / Н.М. Байков [и др.]. – М.: ВНИИОНГ, 1970. – 152 с.
3. Кельцев, Н. В. Основы адсорбционной техники / Н.В. Кельцев. – М.: Химия, 1984. – 592 с.
4. Совершенствование процессов сепарации и сепарационного оборудования / Г.К. Зиберт [и др.] // Наука и техника в газовой промышленности. – 2004. – № 3/4. – С. 48 – 53.
5. Адамсон, А. Физическая химия поверхностей / А. Адамсон; пер. с англ. – М.: Мир, 1979. – 378 с.
6. Абрамзон, А.А. Поверхностно-активные вещества / А.А. Абрамзон. –Л.: Химия, 1981. – 366 с.

УДК 621.793

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ПЛАВЛЕНИЯ ПОРОШКОВОГО СЛОЯ С НАНОСТРУКТУРНЫМИ МОДИФИКАТОРАМИ ПРИ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКЕ С УЧЕТОМ ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ ПРОДВИЖЕНИЯ ФРОНТА ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА

Ю.Н. Гафо

ГНУ «Институт порошковой металлургии НАН Беларуси», Минск;

И.А. Сосновский, А.В. Сосновский

ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси», Минск

Основные положения и допущения. Кинетика плавления порошкового слоя при индукционной наплавке оказывает существенное влияние на физико-механические и эксплуатационные свойства получаемых защитных покрытий. Это связано с тем, что большинство наплавляемых материалов являются термочувствительными, т.е. увеличение температуры наплавки и времени термического воздействия, как правило, оказывает негативное воздействие на формирование микроструктуры порошкового слоя, в т.ч. модифицированного наноструктурными компонентами. Для решения проблемы повышения триботехнических свойств порошковых покрытий, получаемых методом индукционной наплавки, необходимо исследовать кинетику плавления порошкового слоя и определить минимальное время

плавления. На данном этапе исследований решение этой задачи решается путем разработки математической модели процесса продвижения фронта фазового перехода (фронта плавления) в условиях центробежной индукционной наплавки.

Решение задачи с изменением агрегатного состояния вещества является одним из наиболее сложных разделов математической физики. Это связано с тем, что подобные задачи должны быть сформулированы как задачи о сопряжении двух температурных полей при наличии особого граничного условия на движущейся границе раздела. Основная трудность решения задачи состоит в том, что она относится к классу нелинейных задач, т.е. к задаче с нелинейными граничными условиями. Данные задачи, как правило, решаются лишь с помощью приближенных методов. Одним из наиболее эффективных методов расчета является приближенный метод, разработанный академиком Л.С. Лейбензоном и развитый академиком А.В. Лыковым. Сущность этого метода заключается в том, что функции распределения температуры в расплавленном и нерасплавленном слое подбираются так, чтобы они удовлетворяли граничным условиям. Подобранные таким образом функции подставляют в условие сопряжения на границе раздела фаз и решают полученное дифференциальное уравнение относительно координаты фронта фазового перехода ξ .

Как было показано нашими предыдущими исследованиями [1 – 2], в процессе индукционного нагрева при центробежной наплавке порошковых материалов (т.е. до достижения температуры плавления) распределение температуры по толщине порошкового слоя можно считать равномерным. Далее, учитывая квазистационарность процесса индукционного нагрева заготовки при больших значениях F_0 , можно считать, что ее внутренняя поверхность разогревается с постоянной скоростью.

На основании этих допущений задача о плавлении порошкового слоя сводится к следующему. Имеется неограниченный полый цилиндр при температуре $T_0 = T_{пл}$ ($T_{пл}$ – температура плавления порошка). Температура наружной поверхности цилиндра линейно возрастает. Начиная с поверхности цилиндра образуется расплавленный слой толщиной $R - \eta = \xi$, где η – расстояние от оси цилиндра до границы плавления (рис. 1). Температура нерасплавленного слоя предполагается везде одинаковой и равной температуре плавления.

Известные методы решения тепловых задач для процессов индукционных припекания и наплавки порошковых покрытий обладают следующими основными недостатками:

1) не учитывается наличие радиационного теплообмена с поверхностями заготовки, что существенно снижает точность расчетов;

2) применявшиеся для решения этих задач операционные методы и метод конечных интервалов приводят к чрезвычайно громоздким математическим выражениям, требующим для расчета использования вычислительной техники, и не пригодны для инженерной практики;

3) отсутствуют основанные на известных решениях рекомендации по оптимизации технологических процессов.

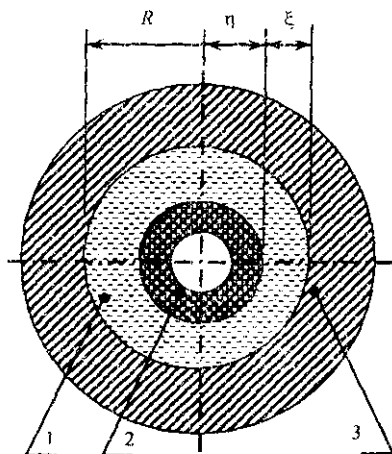


Рис. 1. Граничные условия при центробежной индукционной наплавке:
1 – расплавленная зона, 2 – нерасплавленная зона, 3 – заготовка

Анализ основных особенностей технологии центробежной индукционной наплавки позволяет сделать вывод, что наиболее важной стадией технологического процесса, определяющей физико-механические и эксплуатационные свойства получаемых двухслойных изделий, является изотермическая выдержка при температуре наплавки порошкового материала. Основная техническая задача на этой стадии – поддержание заданной средней температуры порошкового слоя (температуры наплавки) в течение определенного промежутка времени (времени наплавки). При этом термические режимы на предыдущих стадиях нагрева не оказывают существенного влияния на кинетику процесса припекания порошкового слоя к подложке.

Толщина порошкового слоя, как правило, значительно меньше толщины подложки и радиуса кривизны его поверхности. Свободную внутреннюю поверхность порошкового слоя и торцы двухслойного цилиндра

можно считать теплоизолированными. Следовательно, термическим сопротивлением порошкового слоя можно пренебречь, а распределение температуры по ее толщине считать однородным и равным температуре внутренней поверхности подложки. При этом, начиная с определенного значения критерия Фурье ($F_0 \approx 0,305$) наступает квазистационарный режим теплопроводности, когда распределение температуры в подложке не изменяется по форме, но температура в каждой точке растет во времени с постоянной относительной скоростью. По достижении внутренней поверхности цилиндрической заготовки температуры плавления порошкового материала температуру этой поверхности поддерживают постоянной путем управления мощностью источника нагрева (генератора токов высокой частоты). При этом распределение температуры по толщине заготовки является стационарным, а мощность, выделяемая внутренними источниками равна тепловому потоку с наружной поверхности заготовки, который обусловлен конвективным и лучистым теплообменом с окружающей средой.

Для поддержания заданной температуры порошкового слоя на стадии режима прилипания требуется определить температурный перепад по толщине заготовки путем решения стационарной задачи теплопроводности для полого цилиндра с внутренним источником тепла. При этом, т.к. на практике толщина стенки цилиндра существенно меньше его диаметра и перепад температуры относительно мал (меньше 1 К), зависимостью теплопроводности от температуры можно пренебречь.

Разработка математической модели. На основании вышеприведенных соображений математическая задача формулируется так:

$$\frac{\partial T_1(r, \tau)}{\partial \tau} = a_1 \left(\frac{\partial^2 T_1(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1(r, \tau)}{\partial r} \right) \quad (\tau > 0; R > r > \eta; \eta = f(\tau)), \quad (1)$$

$$T_2(r, \tau) = T_0 = T_{ns} = \text{const}, \quad (2)$$

$$T(\eta, \tau) = T_m = \text{const}, \quad (3)$$

$$T(R, \tau) = T_{ns} - b\tau, \quad (4)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(\eta, \tau)}{\partial r} = \rho \gamma_2 \frac{d\eta}{d\tau}, \quad (5)$$

- где T_1 – температуры жидкой фазы (расплава), К;
 T_2 – температура нерасплавленного порошкового слоя, К;
 λ_1 – коэффициент теплопроводности жидкой фазы;
 λ_2 – коэффициент теплопроводности порошковой среды;

R – радиус внутренней поверхности заготовки, м;
 ρ – плотность присадочного материала, кг/м³;
 b – темп нагрева, К/с;
 γ – удельная теплота плавления присадочного материала, Дж/кг;
 η – расстояние от оси вращения до границы плавления, м;
 τ – время, с.

В соответствии с методом Л.С. Лейбензона принимаем распределение температуры в расплавленной зоне по закону распределения температуры в полом цилиндре в стационарном состоянии, т.е.

$$T_1(r, \tau) = \frac{b\tau \ln r + (T_m + b\tau) \ln \eta - T_m \ln R}{\ln \frac{R}{\eta}}. \quad (6)$$

Решение (6) удовлетворяет граничным условиям и дифференциальному уравнению (1). Подставляя решение (6) в граничное условие (5), получим

$$\lambda_1 \frac{b\tau}{\eta \ln \frac{R}{\eta}} = \rho\gamma_2 \frac{\partial \eta}{\partial \tau}. \quad (7)$$

После интегрирования этого уравнения имеем

$$\eta^2 \ln \frac{R}{\eta} - \frac{1}{2}(R^2 - \eta^2) = -\frac{\lambda_1 b}{\rho\gamma_2} \tau^2. \quad (8)$$

Трансцендентное алгебраическое уравнение (8) определяет зависимость между координатой фронта плавления η и временем τ . Решение его относительно η может достаточно просто осуществляться с помощью пакетов прикладных математических программ типа «Matlab», «MathCAD», «Математика» и др.

Исходя из полученных соотношений можно определить время полного плавления порошкового слоя τ_m . При $\tau = \tau_m$, $\eta = R_0$ оно будет равно

$$\tau_m = \frac{\rho\gamma_2}{b\lambda_1} \left[\frac{1}{2}(R^2 - R_0^2) - R_0^2 \ln \frac{R}{R_0} \right]. \quad (9)$$

Таким образом, в результате анализа технологической схемы и особенностей центробежной индукционной наплавки порошковых покрытий разработана математическая модель продвижения фронта фазового перехода в наплавляемом материале. Это позволило, в свою очередь, определить минимальное время, обеспечивающее плавление порошкового слоя при формировании наплавленного покрытия.

1. Кашицин, Л.П. Инженерный метод расчета термических режимов центробежного припекания покрытий из металлических порошков с использованием внутреннего индуктора тока высокой частоты / Л.П. Кашицин, И.А. Сосновский, Ю.Н. Гафо // Вест. Полоцк. гос. ун-та. Сер. В, Прикладные науки. – 2005. – № 6. – С. 98 – 102.

2. Control and stabilization of technological modes of powder materials centrifugal induction sintering on cylindrical parts internal surface / I.Sosnovsky and [a.t.] // Euro PM 2007: Powder Metallurgy Congress 8 Exhibition, 14 – 17 october 2007 / Toulouse, France, Proceeding. – Vol. 2. – P. 117 – 119.

УДК 621.79

ОСОБЕННОСТИ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО НАСЫЩЕНИЯ УГЛЕРОДИСТОЙ ПРОВОЛОКИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НАПЛАВОЧНОГО СПЛАВА

В.Г. Дашкевич

Белорусский национальный технический университет, Минск

Введение. Предпочтительным с точки зрения универсальности и производительности в ремонтно-восстановительном производстве является использование электродуговой наплавки в среде защитных газов или под слоем флюса.

В работе на примере борхромирования и боротитанирования рассматривается возможность многокомпонентного диффузионного легирования углеродистой пружинной проволоки для получения наплавочного сплава. Основной идеей создания экономно-легированных износостойких наплавочных сплавов диффузионным легированием является использование дешевого исходного материала, на базе которого формируется состав и структура, обеспечивающие заданный уровень износостойкости после наплавки. В качестве исходного материала может выступать пружинная углеродистая проволока, проволока для сеток, кордная проволока производства Белорусского металлургического завода или проволока производителей ближнего зарубежья. Необходимо отметить, что пружинная углеродистая проволока (ГОСТ 9389-75, ГОСТ 14963-78) не является дефицитным материалом и имеется практически на любом ремонтном предприятии.

Методы исследования. Исследования проводились на образцах проволоки углеродистой пружинной Ст 70 ГОСТ 9389-75 диаметром 1,2 мм и 1,6