

поверхности проводится таким образом, что в пределах базовой длины среднее квадратическое отклонение профиля до этой линии минимально. При уменьшении высоты основного выступа и угла наклона его боковых граней происходит смещение средней линии профиля к вершине выступа, что приводит к уменьшению его ширины на средней линии профиля. В пользу этого положения свидетельствуют экспериментальные данные о пропорциональном уменьшении высоты наибольшего выступа R_p и наибольшей высоты неровностей профиля R_{max} , представленные в [7]. Адекватность предложенной геометрической модели формирования профиля поверхности, а соответственно и топографии, в условиях ЭИП подтверждают фотографии поверхности образца из стали 10, представленные на рис. 3.

Фотографии наглядно показывают, что в условиях ЭИП сглаживание неровностей профиля поверхности происходит с равной вероятностью на выступах и во впадинах профиля с одно временным снижением высоты неровностей, увеличением радиусов округления выступов и впадин и уменьшением угла наклона граней профиля (рис. 3, *a–г*). Так же видно (рис. 3, *д; e*), что уровень минимально достижимой шероховатости поверхности ограничивается микроструктурой сплава, проявившейся на полированной поверхности вследствие селективного анодного растворения структурных составляющих сплава.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хусу, А. П. Шероховатость поверхностей: теоретико-вероятностный подход / А. П. Хусу, Ю. Р. Витенберг, В. А. Пальмов; под ред. А. А. Первозванского. – М.: Наука, 1975. – 344 с.
2. Смирнов, Н.В. Краткий курс математической статистики для технических приложений / Н. В. Смирнов, И. В. Дунин-Барковский. – М.: Физмат гиз, 1959. – 436 с.
3. Витенберг, Ю. Р. Шероховатость поверхности и методы ее оценки / Ю. Р. Витенберг. – Л.: Судостроение, 1971. – 101 с.
4. Беляев, Г. С. Расчет и построение коррелограмм уплотняющих по верхностей деталей судовой арматуры / Г. С. Беляев [и др.] // Судостроение. – 1971. – № 6. – С. 46–49.
5. Ануфриев, И. Е. MATLAB 7 / И. Е. Ануфриев, А. Б. Смирнов, Е. Н. Смирнова. – СПб: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.
6. Витенберг, Ю. Р. Оценка шероховатости с помощью корреляционных функций / Ю. Р. Витенберг // Вестник машиностроения. – 1969. – № 1. – С. 55–57.
7. Синькевич, Ю. В. Комплексный подход к изучению механизма сглаживания неровностей профиля поверхности и формирования топографии при электроимпульсном полировании / Ю. В. Синькевич // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. науч. тр. / Донецкий национ. техн. ун.-т. – Донецк, 2016. – Вып. 2 (53). – С. 109–118.

УДК 621.793

Фролов И.С., Мрочек Ж.А., Фролов Ю.И.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОКРЫТИЯ С ОСНОВОЙ ПРИ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННОМ НАПЫЛЕНИИ

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Дана постановка задачи теплофизического моделирования формирования покрытия из плазменных потоков в вакууме. Приведен анализ тепловых моделей взаимодействия частицы покрытия с основой при плазменном напылении. Отмечено, что применение данных моделей к вакуумно-плазменным покрытиям требует учета особенностей формирования таких покрытий.

Процесс формирования износостойких вакуумно-плазменных покрытий происходит в условиях значительных температурных градиентов вследствие воздействия на основу высокоэнергетических плазменных потоков. Однако сложные и кратковременные физико-химические процессы, протекающие в зоне контакта напыляемых частиц с поверхностью основы при высоких температурах в вакууме, изучены недостаточно, что не позволяет эффективно использовать данную технологию. В теории плазменной металлизации неоднократно делались попытки рассчитать температурное поле системы основа-покрытие и, в частности, контактную температуру между расплавленной, деформирующейся при ударе частицей и твердой, относительно холодной основой.

Подход, основанный на оценке контактной температуры (t_k) между частицей покрытия и основой некоторой функцией исходных (начальных) температур, составляющих тепловой системы и их теплофизических характеристик, сделан в работе [1]. Температуру контакта авторы этой работы предлагают определять по формуле:

$$t_k = \frac{B_s t_s + B_o t_o}{B_s + B_o}, \quad (1)$$

где $B = (\lambda c \gamma)^{1/2}$ – коэффициент аккумуляции тепла материала (S – покрытия, O – основы);

t_s – температура плавления материала покрытия;

t_o – температура основы;

λ – коэффициент теплопроводности;

c – удельная теплоемкость;

γ – плотность материала.

Эта тепловая задача является корректной, однако, полученное решение имеет два недостатка: во-первых, в нем не учитывается теплота плавления L кристаллизующегося материала и, во-вторых, не рассматривается зависимость t_k от времени τ .

Наиболее полное решение задачи о распределении температуры в системе основа-покрытие в процессе плазменного нанесения покрытий получено с помощью метода контактной теплопроводности [2, 3]. Решение проведено с учетом фазового перехода материала частицы и не учитывает возможный перегрев частиц выше температуры плавления t_s . В этой задаче рассматривается охлаждение отдельной частицы на основе при следующих допущениях:

- основа представляет собой полубесконечное тело с постоянной начальной температурой t_o и имеет теплопроводность, равную теплопроводности материала основы, только в направлении, перпендикулярном плоскости контакта;

- частица расплавлена и ее начальная температура равна температуре плавления t_s , а ее теплопроводность равна теплопроводности твердого материала частицы только в направлении, перпендикулярном поверхности основы;

- твердая фаза частицы неподвижна относительно плоскости контакта и над ней во время затвердевания существует прослойка жидкости;

- контакт частицы с основой идеален, а их свободные поверхности теплоизолированы.

При этих условиях задача контактного теплообмена в системе основа-частица эквивалентна задаче о контакте двух полупространств: жидкого и твердого с теми же теплофизическими характеристиками и начальными условиями. Последняя решена в работе [4], причем температура контакта, как следует из этого решения, определяется зависимостью:

$$t_k = t_o + t_k^o, \quad (2)$$

где

$$t_k^o = \frac{K_\varepsilon(t_s - t_o)}{K_\varepsilon + \operatorname{erf}\alpha}, \quad K_\varepsilon = \frac{\lambda_1 \sqrt{a_2}}{\lambda_2 \sqrt{a_1}}$$

$$\operatorname{erf}\alpha = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\alpha \exp(-\alpha^2) d\alpha$$

α – корень уравнения

$$\alpha \operatorname{erf}(\alpha^2) (K_\varepsilon + \operatorname{erf}\alpha) = \frac{c_1 t_c}{L \sqrt{\pi}}$$

При этом температуры частицы и основы во временном интервале $0 \leq \tau \leq \tau_0$, где $\tau_0 = h^2 / (4a_1 \alpha^2)$ (h – толщина частицы), равны соответственно

$$t_1(x, \tau) = t_k^o \left(1 + \frac{1}{K_\varepsilon} \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{a_1 \tau}} \right) + t_o \quad (3)$$

$$t_2(x, \tau) = t_k^o \operatorname{erf} \frac{|x|}{2\sqrt{a_2 \tau}} + t_o \quad (4)$$

Для времени $\tau^* = \tau - \tau_0 > 0$, $t_1(x, \tau^*)$ и $t_2(x, \tau^*)$ определяются из решения краевой задачи для системы дифференциальных уравнений теплопроводности при условиях (3) и (4), которые необходимо использовать как начальные при $\tau = \tau_0$ ($\tau^* = 0$). Таким образом, при решении данной термической задачи цикл взаимодействия частицы с основой представлен в виде совокупности двух этапов:

- затвердевание частицы ($0 < \tau < \tau_0$), в течение которого над фронтом кристаллизации находится жидкость;
- охлаждение частицы (затвердевшей) до температуры основы ($\tau > \tau_0$).

Следует отметить, что решение задачи для второго этапа в работах [2, 3] не приведено, что объясняется сложностью математической модели, описывающей процесс распространения теплоты в покрытии и основе для данного этапа. Кроме того, недостатками этого решения являются следующие. Во-первых, при постановке задачи для этапа затвердевания частицы принимается, что размеры жидкой частицы и основы в направлении теплового потока одинаковы. Следовательно, это решение не описывает с достаточной точностью процесс формирования температурных полей в системе частица-основа при нанесении покрытий на массивные детали. Во-вторых, допущение о теплоизоляции свободных поверхностей частицы и основы лишает решение указанной

тепловой задачи универсальности, так как в реальных процессах происходит теплообмен между системой основа-частица и окружающей средой.

В работе [5] рассматривается случай двухсторонней кристаллизации жидкой частицы толщиной H , находящейся при температуре кристаллизации t_s , нанесенной в момент времени $\tau = 0$ на основу, имеющую начальную температуру t_0 . При постановке задачи предполагается, что свободная поверхность частицы охлаждается за счет излучения в окружающее пространство с температурой t_c . Расчет процессов кристаллизации в затвердевших слоях ведется независимо друг от друга, так как в жидкой фазе отсутствует градиент температур. При решении задачи применен интегральный метод, позволяющий решать нелинейные краевые задачи.

Согласно этому решению, связь между контактной температурой Θ_k и глубинами проникновения теплоты в твердую фазу частицы и основу (соответственно ξ_1, ξ_2) определяется выражением:

$$\frac{2(1 + s/2 - \Theta_k) - \sqrt{2s(1 + s/2 - \Theta_k)}}{\Theta_k - \frac{t_0}{t_s}} = \frac{n\lambda_2\xi_1}{\lambda_1\xi_2}, \quad (5)$$

где

$$\xi_1 = \left\{ \frac{12\tau_1 \left[2(1 + s/2 - \Theta_k) - \sqrt{2s(1 + s/2 - \Theta_k)} \right]}{2(1 + s/2 - \Theta_k) + \sqrt{2s(1 + s/2 - \Theta_k)} + 4s} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$\xi_2 = \{2n(n+1)\tau_2\}^{\frac{1}{2}}, n \in [1,2]$$

$$\tau_i = a_{i\tau} / H^2$$

$$S = L / c_1 t_s - \text{критерий Стефана.}$$

Величины, помеченные индексом 1, относятся к частице, 2 – к основе.

Подставляя зависимости для ξ_1 и ξ_2 в формулу (5), можно определить значение контактной температуры. Однако данное решение не учитывает особенности нанесения покрытий в вакууме и поэтому непригодно для расчета теплофизических параметров процесса формирования вакуумно-плазменных покрытий.

Следует отметить, что развитие технологии вакуумно-плазменной металлизации ведется в направлении, предусматривающем решение многих научно-технических задач. Наиболее актуальными среди них являются следующие:

1. Защита металлов от коррозии, особенно при повышенных температурах, так как с повышением температуры увеличивается тепловая энергия, активизирующая процесс коррозии;

2. Повышение физико-механических характеристик (прочность, плотность) материалов деталей машин, механизмов, технологических конструкций и защита их от износа;

3. Получение требуемых свойств материалов по текстурованной структуре, создание материалов с заданной анизотропией свойств.

Решение этих задач в полной мере невозможно без расчета теплофизических параметров, характеризующих процесс вакуумно-плазменного нанесения покрытий. Поэтому целесообразно разработать математическую модель процесса теплофизического взаимодействия частицы с основой, учитывающую особенности формирования таких покрытий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Елютин, В. П. О механизме сцепления плазменных покрытий с подложкой / В. П. Елютин, В. И. Костиков, Ю. А. Шестерин // ФХОМ. – 1969. – №3. – С. 23–25.
2. Дубасов, А. И. Термический цикл в контакте между напыляемой жидкой частицей и подложкой / А. И. Дубасов, В. В. Кудинов // ФХОМ. – 1970. – № 5. – С. 19–22.
3. Дубасов А., И. Термическое взаимодействие частиц с подложкой при нанесении покрытий напылением / А. И. Дубасов, В. В. Кудинов, М. Х. Шоршоров // ФХОМ. - 1971. – №6. – С. 29–34.
4. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964. – 487 с.
5. Иванов, Е. М. Теплофизика процессов плазменного напыления защитных покрытий / Е. М. Иванов // ФХОМ. — 1982. — № 4. —С. 60–64.

УДК 621.793.79

Чигринова Н.М.¹, Ловыгин С.И.²

МЕХАНИЗМЫ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ В ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ ПОКРЫТИЯХ ПРИ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ИНТЕНСИВНОСТИ И ОЧЕРЕДНОСТИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

1. Белорусский национальный технический университет

2. ОХП Институт сварки и защитных покрытий

Минск, Беларусь

В статье приведены результаты исследования комплексного влияния параметров интегральной обработки, включающей электроискровое легирование материала с ультразвуковым воздействием, на структурообразование сформированного при этом покрытия, при изменяющейся интенсивности и очередности электромеханических воздействий. Показано, что преимущественное влияние на механизмы структурообразования обработанного указанным методом материала оказывает ультразвуковая активация обрабатываемой поверхности.

Введение

Одной из основных задач современного промышленного комплекса является внедрение в производство новых технологий, позволяющих значительно увеличить срок службы производственного оборудования, свести к минимуму затраты на ремонт вышедших из строя деталей машин и механизмов, решить задачи ресурсосбережения и импортозамещения. Это становится возможным в случае применения упрочняющих и восстановительных технологий.

Развитие техногенной цивилизации инициирует как разработку новых, так и оптимизацию уже известных технологий. К числу современных методов поверхностной