

УДК 536.2

ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ ПОДЛОЖКИ В ОБЛАСТИ КОНТАКТА С КАПЛЕЙ РАСПЛАВА

© 2011 г.

Т.Н. Немова¹, Е.А. Колесникова²¹НИИ прикладной математики и механики Томского госуниверситета²Томский государственный архитектурно-строительный университет

ntn@ftf.tsu.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Рассчитано трехмерное температурное поле в системе капля расплава–подложка во времени. Для расчета предложен метод выравнивания температур малых соседних областей, не требующий использования дифференциальных уравнений. Метод протестирован на стандартной задаче определения температурного поля шара. Определено изменение положения границы расплава в системе капля–подложка.

Ключевые слова: температурное поле, капля, подложка, контакт, расплав.

Одним из технологических методов, обеспечивающих возможность модификации поверхностей современных конструкционных материалов, является плазменное нанесение упрочняющих покрытий. До сих пор актуальными являются проблемы теплопереноса в системе частица–подложка при инерционном осаждении расплавленных частиц на поверхность [1], в частности определение оптимальных величин температур капли и подложки, обеспечивающих качественную адгезию частиц на поверхность материала, изменение температурного поля в точке контакта расплавленной частицы и подложки от момента осаждения капли до ее кристаллизации и затвердевания.

Для определения температурного поля в зоне контакта капли расплава с поверхностью подложки был использован метод выравнивания температур соседних слоев. На основе экспериментальных исследований [2] предполагалось, что при осаждении на поверхность капля расплава принимает форму цилиндра, высота которого l_0 в несколько раз меньше его диаметра. Температура капли превышает температуру плавления материала подложки. На основе уравнений теплопроводности составлялись балансные соотношения количества теплоты, проходящей через слой материала толщиной Δl за время Δt при неизменных температурах на границах слоя. Значения коэффициентов теплопроводности, теплоемкости и плотности не зависят от температуры и агрегатного состояния материала. Два соседних слоя принимают температуру, равную среднему значению температур на границах слоя, если материал капли и подложки одинаков. Если материалы капли и подложки различаются, то температура вы-

равнивания определяется выражением, приведенным в [3]. Величина слоя Δl пропорциональна его теплопроводности.

В качестве тестовой задачи для проверки расчета температурного поля методом выравнивания температур соседних слоев были использованы результаты известного решения для бесконечной плоской пластины, приведенные в [4]. Полученные рассмотренным методом температурные поля показывают хорошее согласование с результатами решения тестовой задачи.

При принятых допущениях были проведены расчеты температурных полей капли и подложки под центром расплавленной капли (рис. 1) в различные моменты времени $t/\Delta t$ после выпадения капли при условии равенства теплофизических характеристик материала капли и подложки. На рис. 1 обозначено: T – текущая температура, T_1 – начальная температура, T_0 – исходная температура подложки, l_0 – толщина капли или частицы, l – текущая координата.

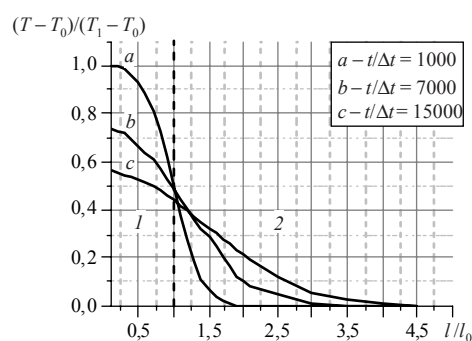


Рис. 1

Полученные результаты позволяют оценить

возможность адгезии капли расплава на подложку. Для этого при заданных температурах капли и подложки по зависимостям (см. рис. 1) определяется температура, необходимая для возникновения адгезии. Она находится на пересечении температурной кривой и границы раздела капли 1 и подложки 2 и должна быть больше или равна температуре плавления материала подложки. При невыполнении этого условия адгезии капли расплава на подложке не происходит.

Если величина теплопроводности материала подложки больше соответствующей величины для капли расплава, то при прочих равных условиях подложка прогреется на большую глубину, и наоборот.

Анализ данных по экспериментальному исследованию процесса нанесения покрытий показывает, что хорошее сцепление наносимых частиц с материалом поверхности зависит как от температуры подложки, так и от температуры падающей нагретой капли. В связи с этим были проведены расчеты минимальных значений температур падающих на поверхность капель расплава, обеспечивающих адгезию частиц на подложку, в зависимости от температуры подложки. Расчеты проведены для систем железо – железо, олово – олово, медь – медь, никель – никель, вольфрам – вольфрам. На рис. 2 приведены полученные зависимости минимальной температуры капли расплава T_D от температуры поверхности подложки T_W для указанных материалов.

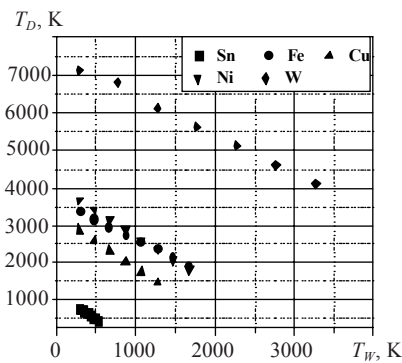


Рис. 2

Область температур, расположенная выше зависимости, соответствует тем значениям температур капли, при которых капля прочно сцепляется с поверхностью подложки. Область ниже зависимости характеризуется недостаточно высокими температурами нагретой капли для прочного сцепления ее с поверхностью подложки. Чем ниже температура подложки, тем большую температуру должна иметь капля расплава наносимого материала.

Для оценки адекватности полученных результатов проведены экспериментальные исследования влияния температуры частиц и подложки на адгезию для системы олово – олово с использованием экспериментальной установки и методики [3]. В соответствии с результатами расчетов (см. рис. 2) были выбраны соотношения температур капли и подложки, которые располагались как вблизи полученной зависимости, так выше и ниже ее. После экспериментов фиксировался факт закрепления или отслоения частицы от поверхности подложки. Для всех экспериментов прочное закрепление частицы на поверхности соответствовало температурам капли и подложки, расположенным выше граничной линии.

Аналогичные расчеты с учетом зависимости коэффициентов теплопроводности и теплоемкости от температуры были проведены для материалов подложки и капли, соответствующие реальным условиям нанесения покрытий, в частности сталь – сталь, вольфрам – сталь. Экспериментальные данные, полученные с использованием плазмохимического стенда на основе электродугового плазматрона при температурах, соответствующих области адгезии, согласуются с расчетными данными.

Немаловажным аспектом, связанным с прочным сцеплением частиц с поверхностью подложки, является глубина проплавления подложки при выпадении на нее частицы или капли расплава. Для частиц вольфрама и карбида вольфрама, выпадающих на стальную подложку, получены зависимости глубины проплавления подложки L от температуры капли T для частиц высотой $5 \cdot 10^{-4}$, $2 \cdot 10^{-4}$ и 10^{-4} м (на рис. 3 соответственно 1, 2, 3).

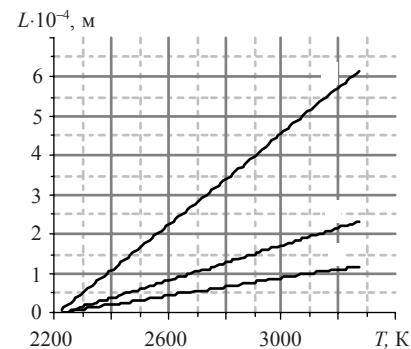


Рис. 3

Таким образом, полученные расчетные и экспериментальные результаты позволяют определить оптимальные величины температур капли и подложки, глубину проплавления для обеспечения качественного нанесения упрочняющего покрытия на защищаемый материал.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант №09-08-00488а.

Список литературы

1. Кудинов В.В. и др. Нанесение покрытий плазмой. М.: Наука, 1990. 408 с.

2. Немова Т.Н., Колесников А.А., Мамонтов Г.Я. // Изв. вузов. Физика. 2009. Т. 52, №7/2. С. 157–162.

3. Немова Т.Н., Кузнецов Г.В., Колесников А.А., Колесникова Е.А. // Изв. вузов. Физика. 2009. Т. 52, №7/2. С. 152–156.

4. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 599 с.

THE TEMPERATURE FIELD OF A SUBSTRATE IN THE CONTACT AREA WITH A MELT DROP

T.N. Nemova, E.A. Kolesnikova

A 3D-temperature field history of a melt drop–substrate system has been calculated. The method of temperature equalization for small consecutive areas that does not require the use of differential equations is proposed. The method is tested on a standard problem of evaluating the temperature field of a solid sphere. The change in the position of the boundary of the melt in the drop–substrate system is determined.

Keywords: temperature field, drop, padding, point of contact, liquid.