

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ, СОПРОВОЖДАЮЩИХ ОБРАБОТКУ МАТЕРИАЛА С ПОКРЫТИЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СТОЧНИКА

Н.В. Букрина, А.Г. Князева

ИФПМ СО РАН, 634021, пр. Академический 2/1, Томск

Предложена трехмерная модель электронно-лучевой обработки материала с предварительно нанесенным порошковым слоем, который может претерпевать усадку в процессе обработки. Кинетика процесса усадки описана с помощью известных моделей диффузионного спекания. Задача решается численно. Определяются характеристики квазистационарной стадии процесса, размер и форма зоны термического влияния и ванны расплава и рельеф поверхности в зависимости от параметров источника нагрева и кинетики процесса усадки. Предложен способ оценки напряжений, сопровождающих обработку.

Введение

Элементы многих машин и агрегатов современной техники работают при высокой температуре, что приводит зачастую к преждевременному износу. Один из возможных способов предотвращения преждевременного износа заключается в нанесении покрытий и их последующей термической обработке с использованием высокоэнергетических источников.

Целью настоящей работы было численное исследование влияния различий в свойствах основы и покрытия, а также усадки порошкового слоя, предварительно нанесенного на основу, на характеристики электронно-лучевой обработки поверхности - ширину и форму ванны расплава, размер зоны термического влияния, величину максимальной температуры и т.д.

Математическая постановка задачи

Рассмотрим прямоугольный параллелепипед размером $1 \times 1 \times 0,5$ см, на поверхность которого нанесен слой порошка толщиной h . По поверхности покрытия движется источник нагрева со скоростью V , энергия которого распределена по закону

$$q(x, y, t) = \begin{cases} q_0 \exp\left(-\left(\frac{x-Vt}{R}\right)^2\right), & y < y_0 \\ 0, & y > y_0 \end{cases}$$

где величины y_0 — определяется шириной сканирования, R — эффективный радиус источника. Такая форма источника соответствует пилообразным колебаниям электронного луча [1].

При условии малой толщины покрытия математическая постановка задачи о термической обработке [2] включает уравнение теплопроводности

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

граничное условие на поверхности $z = 0$:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = -c_1 \rho_1 h_1 \frac{\partial T}{\partial t} + q(x, y, t) - \sigma \varepsilon (T^4 - T_c^4) + h_1 \cdot A \quad (2)$$

$$\text{где } A = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \right) + Q k(T) h_1'$$

третье слагаемое в (2) учитывает теплоотдачу по закону Стефана-Больцмана и условие

$$z = z_k: \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial z} = 0. \quad (3)$$

На противоположной стороне параллелепипеда и на всех остальных поверхностях отсутствуют источники и стоки тепла, поэтому на остальных плоскостях ставятся условия, аналогичные (3). В начальный момент времени температура задана: $t = 0: T = T_0$.

Теплофизические свойства в общем случае зависят от температуры. Для учета этих зависимостей данные эксперимента, взятые в литературе, можно аппроксимировать полиномами 2-3 степени в зависимости от типа данных. В окрестности температур фазовых переходов (плавления — кристаллизации и перехода от одной модификации в другую), в соответствии с теоретическими представлениями, теплоемкость веществ резко возрастает (в классической термодинамической теории стремится к бесконечности), что также учитывалось в модели.

Толщина порошкового слоя меняется в процессе нагрева в результате усадки. Из всего набора литературных данных выбрано эмпирическое уравнение, предложенное Ивенсенем В.А. [3], которое хорошо описывает усадку в результате спекания. На основе этой модели получено кинетическое уравнение вида

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -k(T) \cdot h^\alpha \quad (4)$$

$$k(T) \approx k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad \alpha = \frac{2-m}{m}$$

где α , k_0 , E — определяются процессами, проходящими на микроуровне, m — некоторая постоянная. Тепловыделение в химической реакции, сопровождающей усадку, учтено в граничном условии (2).

Подробные расчеты проведены для основы из стали (Fe) и покрытий трех типов — Fe, Al_2O_3 и TiN.

Начальная толщина покрытия, плотность мощности источника с плотностью потока q_0 и V , варьировались:

$$h_1 \in [0; 0.05] \text{ см}, \quad q_0 \in [10^3 - 10^5] \text{ Вт/см}^2.$$

Задача решалась численно по неявной разностной схеме второго порядка точности по пространству и первого по времени, с использованием расщепления по координатам и линейной прогонки [4].

О сходимости разностной задачи и точности решения судили, сравнивая результаты расчетов, полученные при различных значениях шагов разностной сетки друг с другом, а также сопоставляя численное решение с известными аналитическими решениями в различных предельных случаях.

Анализ численных результатов

В расчетах определялись максимальная температура в области прогрева, ширина и форма ванны расплава и размер зоны термического влияния. Граница ванны расплава определялась по температуре плавления по результатам вычисления поля температур. За внешнюю границу зоны термического влияния принимали координаты, где температура не превышала 700-900 К; ниже этой температуры в экспериментальных исследованиях не наблюдаются видимые изменения структуры вещества в процессе термической обработки.

Анализ численных исследований показал, что для выбранных материалов нестационарная стадия процесса термической обработки движущимся источником нагрева является весьма малой по сравнению со временем обработки материала, что иллюстрирует рис. 1.

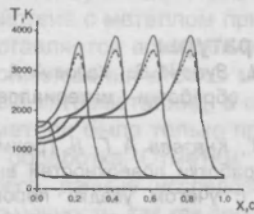


Рис.1 Распределение температуры вдоль оси движения источника в различные моменты времени с учетом (сплошная кривая) и без учета (пунктирная линия) усадки порошкового слоя 1) $t=0,002$; 2) $t=0,025$; 3) $t=0,15$; 4) $t=0,275$; 5) $t=0,4$; 6) $t=0,525$; 7) $t=0,65$ с. $q_0=1 \cdot 10^5$ Вт/см², $h_1=0,05$ см. $k_0=5 \cdot 10^3$

Сплошная кривая соответствует расчету с учетом усадки порошкового слоя, пунктирная – расчету без учета усадки. Плато на температурных кривых соответствует температуре плавления. Данный расчет проведен для случая, когда покрытие и основа – низкоуглеродистая сталь.

На рис.2-3 представлена эволюция во времени размеров и формы зоны термического влияния (светло-серый цвет) и ванны расплава (темно-серый цвет) для случая обработки материала без покрытия (рис.2), с покрытием (рис.3) без учета усадки.

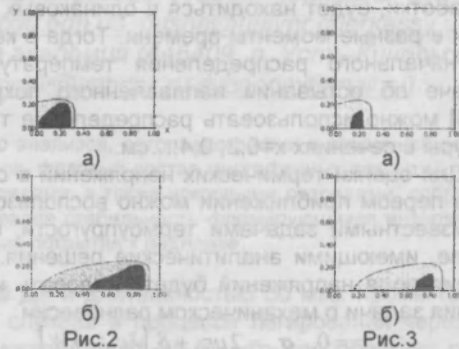
Видно, что появление покрытия при фиксированных параметрах источника нагрева приводит к изменению, как зоны термического влияния, так и формы ванны расплава. Учет усадки порошкового слоя приводит к появлению особенностей, связанных с изменением толщины покрытия в зоне обработки.

В целом усадка приводит к уменьшению толщины покрытия в зоне прогрева и, следовательно, к уменьшению затрат тепла на прогрев покрытия.

Для реальных технологических процессов такие данные позволяют выбрать параметры ис-

точника, которые дадут размер зоны термического влияния и формы ванны расплава заданных размеров.

Результаты расчетов, полученные для покрытий с другими свойствами (Al_2O_3 , TiN), в основном, аналогичны показанным выше, но обнаружены некоторые эффекты, связанные с различием температур плавления материалов.



Динамика изменения размеров и формы ванны расплава (темный цвет соответствует $T > T_m$) и зоны термического влияния (серый цвет соответствует $T > 900$ К) в различные моменты времени а) $t=0,625$, б) $t=2,125$ с. Рис. 2. $h_1=0$ см, Рис. 3. $h_1=0,05$ см при. $q_0=5 \cdot 10^4$ Вт/см², $k_0=5 \cdot 10^3$, $\alpha=0,5$, $E=253 \cdot 10^3$ Дж/моль

Исследования показали, что на динамику процесса усадки существенно влияет параметр k_0 . С увеличением параметра k_0 , происходит значительное более быстрое уменьшение толщины покрытия и, следовательно, увеличение температуры. В этом случае возможны такие ситуации, когда материал основы расплавляется до того как плавится покрытие и усадка происходит в твердой фазе. Ванна расплава формируется под твердофазным покрытием. Влияние константы k_0 иллюстрирует рис. 4.

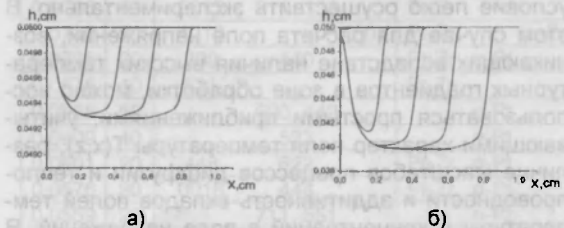


Рис.4 Распределение толщины покрытия в различные моменты времени 1) $t=0,025$; 2) $t=0,125$; 3) $t=0,625$; 4) $t=1,125$; 5) $t=1,625$; 6) $t=2,125$ с. для различных значений параметра k_0 : а) $k_0=5 \cdot 10^6$ и б) $k_0=9 \cdot 10^6$. Параметры источника: $q_0=5 \cdot 10^4$ Вт/см², $V=0,4$ см/с, $R=0,05$ см, $y_0=0,2$ см, $h_1=0,05$ см.

Формирование переходной (диффузионной) зоны между покрытием и основой происходит в результате перераспределения легирующих элементов. Так как характерная скорость этого процесса много меньше (на порядок) скорости прогрева за счет теплопроводности, совместное решение задач теплопроводности и диффузии представляет значительные трудности. В [5] было предложено анализировать формирование диффузионной зоны на основе специальной модели стадии остывания наплавленного покрытия. В [6] для совместного анализа разнородных процессов был разработан специальный алгоритм. Задача

об остывании наплавленного покрытия может быть сформулирована с использованием результатов решения трехмерной тепловой задачи. Очевидно, что на установившейся стадии распределение температуры вдоль оси y в сечениях $x=0,2; 0,4; 0,6; 0,8$ см (см. рис. 1) совпадают. Следовательно, можно утверждать, что каждое сечение, попавшее в зону квазистационарной обработки, будет находиться в одинаковых условиях в разные моменты времени. Тогда в качестве начального распределения температуры в задаче об остывании наплавленного покрытия [5, 6] можно использовать распределение температуры в сечениях $x=0,2; 0,4; \dots$ см.

Для оценки термических напряжений в образце в первом приближении можно воспользоваться известными задачами термоупругости, в том числе, имеющими аналитические решения. Эволюция поля напряжений будет следовать из решения задачи о механическом равновесии

$$\sigma_{y,j} = 0, \quad \sigma_y = 2\mu\epsilon_y + \delta_y[\lambda\epsilon_{xx} - \kappa W] \quad (5)$$

$$W = 3\alpha_T(T - T_0), \quad T = T(t, x, y, z),$$

с граничными условиями, зависящими от условий на поверхностях образца (отсутствие напряжений или жесткая фиксация положения поверхностей). Вследствие того что процессы деформирования и теплопроводности имеют существенно различные пространственные масштабы (различающиеся на 3-4 порядка), для совместного решения задач можно воспользоваться алгоритмом, описанным в [6], и исследовать эти два физических процесса на разных, но согласованных разностных сетках.

При условии $y_0 = H_y$ (т.е. при ширине сканирования, равной поперечному размеру образца с покрытием), где H_y — размер образца вдоль оси Oy , поле температуры становится двумерным. Это условие легко осуществить экспериментально. В этом случае для расчета поле напряжений, возникающих вследствие наличия высоких температурных градиентов в зоне обработки, можно воспользоваться простыми приближениями, учитывая характер поля температуры $T(x, z)$, различие масштабов процессов диффузии и теплопроводности и аддитивность вкладов полей температуры и концентраций в поле напряжений. В (5) имеем

$$W = 3 \left[\alpha_T(T - T_0) + \sum_{i=1}^n \alpha_i(C_i - C_{i0}) \right],$$

где C_i — концентрация элементов и фаз α_i — коэффициенты концентрационного расширения.

Такой подход позволяет проследить за эволюцией поля напряжений как в процессе обработки (на квазистационарной стадии), так и в ходе остывания наплавленного покрытия.

Заключение

В работе предложена модель термической обработки внешним концентрированным источником энергии поверхности трехмерного образца с предварительно нанесенным покрытием в режиме оплавления поверхности. Проведены численные исследования поставленной задачи с учетом и без учета усадки порошкового слоя. Разработан алгоритм расчета поля напряжений, сопровождающих технологический процесс. Полученные результаты могут быть использованы при формулировке задачи оптимизации процесса обработки с целью повышения эксплуатационных характеристик системы основа - покрытие.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 06-08-81006_Бел_а.

Список литературы

1. Рыкалин Н. Н., Зуев И. В., Углов А. А. Основы электронно-лучевой обработки материалов. М.: Наука 1978. — 535с.
2. Букрина Н. В., Князева А. Г. // Трехмерная модель термической обработки поверхностей внешним источником энергии с учетом усадки порошкового слоя. Сборник докладов международной конференции. «Физико — химические процессы в неорганических материалах». Кемерово, 2004. — т.2. — с.376-380.
3. Ивенсен В. А. Кинетика уплотнения металлических порошков при спекании. М.: Наука, 1971. — 400с.
4. Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л. А. Численное моделирование процессов тепло-массообмена. М.: Наука, 1984. — 285с.
5. Князева А. Г., Прибытков Г. А., Дураков В. Г. // Формирование диффузионной зоны в подложке в процессе электронно-лучевой наплавки покрытий: 6th Int. Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. Proceeding. Tomsk, 2002. — с.613-616.
6. Букрина Н. В., Князева А. Г. // Алгоритм численного решения задач неизотермической диффузии, встречающихся в процессах поверхностной обработки: Физическая мезомеханика. 2006. — Т.9. — № 2. — с. 55-62.

MODELLING OF PHYSICAL PHENOMENA ACCOMPANYING THE TREATMENT OF MATERIAL WITH COATING WITH USING OF HIGH-ENERGY SOURCE

N.V. Bukrina, A.G. Knyazeva

Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS

2/1, Pr. Akademicheskii, Tomsk, 634021, Russia

(3822)28-68-31, fax (3822) 49-25-76, e-mail: bookr@mail.ru

The three-dimensional model of electron-beam treatment of the material is formulated taking into account the powder layer shrinkage. Shrinkage kinetics is described on the base of the known concept of diffusion sintering. The problem is solved numerically using non-explicit different schema and double sweep - method. The characteristics of heat-affected zone and melt bath were found for various parameters of external source. The method of tension estimation accompanying the treatment is formulated.