ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

INTERNATIONAL WORKSHOP

**«Multiscale Biomechanics and Tribology
of Inorganic and Organic Systems»**

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

**«Перспективные материалы с иерархической структурой
для новых технологий и надежных конструкций»**

**VIII ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ,
ПОСВЯЩЕННАЯ 50-ЛЕТИЮ ОСНОВАНИЯ
ИНСТИТУТА ХИМИИ НЕФТИ**

«Добыча, подготовка, транспорт нефти и газа»

DOI: 10.17223/9785946218412/123

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ И ДЛИТЕЛЬНОСТИ ВНЕШНЕГО ИМПУЛЬСА НА ДИНАМИКУ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА МЕЖДУ ТОНКОЙ ПЛЕНКОЙ И ПОДЛОЖКОЙ

Парфенова Е.С., Князева А.Г.
ИФПМ СО РАН, Томск

Поверхностная обработка концентрированными потоками энергии позволяет получать новые материалы с уникальными свойствами, которые отвечают современным технологическим требованиям. Наибольший интерес в этой области представляют низкоэнергетические сильноточные электронные пучки, с помощью которых можно формировать твердые растворы, интерметаллиды и нитриды в приповерхностном слое металлов и сплавов, что приводит к значительному улучшению физико-механических и эксплуатационных свойств [1,2]. В работе [3] показано, что при воздействии на поверхность пучками электронов в режиме отсутствия плавления в поверхностных слоях и объеме металлических материалов наблюдаются значительные изменения состава и структуры. Обработка электронными пучками также используется для улучшения адгезии системы покрытие-подложка [2,4].

Кроме таких процессов как нагрев, фазообразование, перемешивание и т.д., в момент взаимодействия потока электронов с поверхностью мишени происходит генерация упругих волн механических возмущений [5]. Все указанные процессы протекают одновременно, поэтому их экспериментальное исследование затруднено. В отличие от экспериментальных работ, математическое моделирование позволяет детально исследовать процесс обработки на всех его стадиях, изучить роль каждого возникающего явления в отдельности и выявить взаимосвязь между интересующими процессами.

В литературе встречаются модели для исследования особенностей термоупругих волн, вызванных воздействием высокоэнергетических источников на поверхности материалов, но стоит отметить, что редко встречаются связанные модели электронно-лучевой обработки, в которых учитываются одновременно протекающие процессы разной физической природы.

В настоящей работе представлена связанная математическая модель начальной стадии процесса взаимодействия потока электронов с поверхностью металла с предварительно нанесенной тонкой пленкой. Предположим, что возникающие напряжения - упругие, скорости, ускорения и деформации малы, тогда для описания взаимодействия волн концентрации, тепловых волн и волн напряжений (деформаций) при воздействии потока электронов необходимы уравнение баланса массы (1), уравнение теплопроводности (2) и уравнение движения (3). Определяющие соотношения соответствуют теории обобщенной термоупругой диффузии. Внутренняя граница разделяет материалы с разными свойствами (покрытие - А, подложка - В). Для каждой из областей необходимо записать свои уравнения:

$$\frac{\partial C_k}{\partial t} + t_{Dk} \frac{\partial^2 C_k}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_k \frac{\partial C_k}{\partial x} - \frac{B_k C_k}{\rho_k} \frac{\partial \sigma_k}{\partial x} \right], \quad (1)$$

$$\rho_k C_{\sigma k} \left[t_{qk} \frac{\partial^2 T_k}{\partial t^2} + \frac{\partial T_k}{\partial t} \right] = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_{Tk} \frac{\partial T_k}{\partial x} \right] - \alpha_{Tk} T_k \frac{\partial \sigma_k}{\partial t} - t_{qk} \frac{\partial}{\partial t} \left[\alpha_{Tk} T_k \frac{\partial \sigma_k}{\partial t} \right], \quad (2)$$

$$\frac{\rho_k}{E_k} \frac{\partial^2 \sigma_k}{\partial t^2} + \rho_k \alpha_{Tk} \frac{\partial^2 T_k}{\partial t^2} + \rho_k \Delta \alpha_k \frac{\partial^2 C_k}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 \sigma_k}{\partial x^2}, \quad (3)$$

где C_k - концентрация диффузанта в покрытии ($k=A$) и в подложке ($k=B$); ρ_k - плотности материалов, кг/м³; σ_k - компонента тензора напряжений в материалах $k=A$ и $k=B$ в направлении облучения; T_k - температура, К; α_{Tk} - коэффициенты теплового расширения, К⁻¹; $C_{\sigma k}$ - теплоемкость, Дж/(кг К); t_{Dk} - время релаксации потока массы к равновесному

Секция 3. Проблемы компьютерного конструирования материалов с иерархической структурой

состоянию, с; t_{qk} - время релаксации потока тепла к равновесному состоянию, с; B_k - коэффициент переноса массы под действием напряжений; D_k - коэффициент диффузии, м²/с; λ_{Tk} - коэффициент теплопроводности, Вт/(м К); $\Delta\alpha_k = \alpha_k - \alpha_0$ - разность коэффициентов концентрационного расширения диффузанта α_k и основного α_0 материала; E_k - модуль упругости, Па; $k = A, B$.

Граница раздела материала покрытия и подложки находится на расстоянии h от левой границы, соответствующей началу координат. Полагаем, что на границе раздела имеет место идеальный контакт, тогда

$$x = h: u_A = u_B, \quad \sigma_A = \sigma_B, \quad C_A = C_B, \quad J_A = J_B, \quad J_{qA} = J_{qB},$$

где u_A, u_B - компоненты вектора перемещений в направлении Ox слева и справа от границы.

Граничные и начальные условия имеют вид:

$$\begin{aligned} x = 0: J_A &= 0, \quad J_{qA} = q_0 \varphi(t), \quad \sigma_A = \sigma_0 \varphi(t), \\ x \rightarrow \infty: C_B &= 0, \quad \sigma_B = 0, \\ t = 0: C_k &= \begin{cases} 1.0, & 0 \leq x \leq h \\ 0.0, & x > h \end{cases}, \quad \sigma_k = 0, \quad T_k = T_0, \quad \frac{\partial C_k}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial \sigma_k}{\partial t} = 0. \end{aligned}$$

где $\varphi(t)$ - функция внешнего воздействия:

Синусоидальный импульс -

$$\varphi(\tau) = \begin{cases} A \sin\left(\frac{\pi\tau}{\tau_{imp}}\right), & \tau \leq \tau_{imp} \\ 0, & \tau > \tau_{imp} \end{cases},$$

Прямоугольный импульс -

$$\varphi(\tau) = \begin{cases} A, & \tau \leq \tau_{imp} \\ 0, & \tau > \tau_{imp} \end{cases}.$$

Представленная модель позволяет изучать взаимодействие нелинейных волн разной физической природы, распространяющихся совместно в неизотермических условиях. Предполагается, что частицы обладают энергией, достаточной для генерации упругих волн механических возмущений в поверхности мишени, и приводят к изменению температуры. Модель учитывает конечность времен релаксации потоков тепла и массы и взаимодействие волн различной физической природы - диффузия, напряжения (деформации) и температура. Разработанный численный алгоритм основан на неявной разностной схеме.

Взаимодействие изучаемых процессов приводит к искажениям на волнах деформации и температуры.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, направление III.23.

1. Konovalov S.V. et al. Structure of titanium alloy, modified by electron beams and destroyed during fatigue // Letters on materials. 2017. Т. 7. № 3. С. 266-271.
2. Углов В.В., Квасов Н.Т., Петухов Ю.А., Кудактин Р.С., Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф., Тересов А.Д., Асташинский В.М., Кузьмицкий А.М. Структурно-фазовые превращения в системе титан-кремний, модифицированной сильноточным электронными пучками и компрессионными плазменными потоками // Поверхность. Рентген, синхротр. и нейтрон. исслед. 2012. №4. С. 9-16.
3. Lu J., Wei D.Q., Wang R., Sui X.M., Yin J.W. Surface polishing and modification of 3Cr2Mo mold steel by electron beam irradiation // Vacuum. 2017. V.143. P. 283-287.
4. Ласковнев А.П., Иванов Ю.Ф., Петрикова Е.А. и др. Модификация структуры и свойств эвтектического силумина электронно-ионно-плазменной обработкой. Минск: Беларус. навука, 2013. 287 с.
5. Бойко В.И., Скворцов В.А., Фортон В.Е., Шаманин И.В. Взаимодействие импульсных пучков заряженных частиц с веществом. М.: Физматлит, 2003. 288 с.