

σ_{22} по рассматриваемым теориям достигаются не одновременно согласно уравнений (1) $t = 6T$, а согласно теории пакета – $t = 7T$. При этом, максимальные величины σ_{22} по теории с привлечением независимых гипотез к каждому слою отличаются от соответствующих значений по теории пакета в 3,5 раза. Качественный характер изменения величины σ_{22} (процесс волнообразования) аналогичен поведению величин прогиба. Расчеты в рамках неоднородных оболочек по теории Кирхгофа – Лява для рассматриваемых задач количественно и качественно на исследуемом интервале времени совпадают с результатами согласно теории типа С. П. Тимошенко. В некоторые моменты времени наблюдается разница по величинам u_3 и σ_{22} в пределах 7–10 %, но максимальные значения этих величин в обшивках и заполнителе совпадают.

Список литературы

1 Мейш, В. Ф. Сравнительный анализ динамического поведения трехслойных оболочек в рамках прикладных теорий при нестационарных нагружениях / В. Ф. Мейш, Ю. А. Хамренко // Прикладная механика. – 2003. – Т. 39, № 7. – С. 123–130.

2 Головкин, К. Г. Динамика неоднородных оболочек при нестационарных нагрузках: монография / К. Г. Головкин, П. З. Луговой, В. Ф. Мейш ; под ред. акад. НАН Украины А. Н. Гузя. – Киев : Изд.-полигр. центр «Киевский ун-т», 2012. – 541 с.

УДК 539.3+ 625.8

РЕАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ТЕПЛООВОГО ПОТОКА В ПОКРЫТИИ

В. В. МОЖАРОВСКИЙ, Д. С. КУЗЬМЕНКОВ

Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Республика Беларусь

В. А. КУКАРЕКО

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск

На современном этапе развития машиностроения актуальными задачами является создания новых термостабильных износостойких слоев с градиентной структурой на основе нитридов железа и хрома, а также разработка и создание новых математических моделей расчета напряженного состояния и температуры в покрытиях и основаниях.

Следует отметить, что актуальной научной и практической задачей современного материаловедения является применения новых технологий для упрочнения поверхностного слоя посредством осаждения нитридов, либо диффузионном модифицировании, а также изучение упругих, прочностных и дюрометрических свойств тонких ионно-плазменных покрытий. Как отмечено в работе [1], «покрытия, полученные методом термического напыления, может существенно способствовать уменьшению скорости изнашивания в условиях широкого диапазона скоростей скольжения и различных значений температуры», поэтому поставленная задача является весьма актуальной. В современных исследованиях [2] представлен анализ методик конечных элементов (МКЭ), были проведены опыты определения напряжений и деформаций в модельных образцах в условиях контактного давления и теплового состояния. Ключевой задачей для разработки и создания математической модели расчета напряжений и температур в упругих покрытиях является определение их модулей упругости и решения проблемы упругости тонких покрытий. Известно, что составной частью физической модели и математического описания температурного поля в покрытии и основании, применительно для расчета слоев с градиентной структурой на основе нитридов железа и хрома, является математическая модель полосы (покрытия) и основания. При исследованиях следует учесть влияние температуры (рисунки 1). Так, результаты триботехнических испытаний стали, в процессе трения образцов стали с упрочненным слоем, обработанной ионами азота при 770 К и обладающей наибольшей глубиной азотированного слоя, показали, что сталь обладает высокой износостойкостью. Для более детального изучения этой задачи будем рассматривать теорию расчета термического и контактного взаимодействия.

Рассмотрим реализацию задачи об определении температуры для случая композитного покрытия жестко скрепленного с упругим композитным основанием (подложкой). Пусть на поверхности

задана температура (частный случай, сосредоточенная температура обобщается для произвольного распределения температуры)

$$T_2(x, -h) = T_0 \delta(x - x_0),$$

и необходимо определить температурное поле как в покрытии, так и основании. Реализацию решения задачи будем осуществлять из позиций теории упругости анизотропного тела на основе работ [2–6].

Для рассматриваемой среды необходимо решить уравнения теплопроводности

$$k_{11}^{(m)} \frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2} + 2k_{12}^{(m)} \frac{\partial^2 T_m}{\partial x \partial y} + k_{22}^{(m)} \frac{\partial^2 T_m}{\partial y^2} = 0, \quad m = 1, 2$$

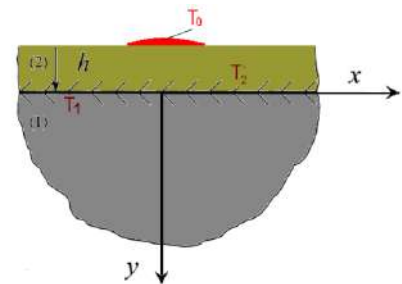


Рисунок 1 – Расчетная схема определения температуры в покрытии

при условии равенства температур и тепловых потоков на границе раздела материалов. Решается задача с помощью преобразования Фурье. Следует отметить, что оригинальный способ решения был предложен в работе [3].

В окончательном варианте приближенное решения [3], представляющее формулы в виде рядов, будет иметь следующий вид:

– для основания

$$T_1 = \frac{2T_0}{\pi} \frac{1}{\eta+1} \sum_0^{\infty} \left(\frac{\eta-1}{\eta+1} \right)^n \frac{|q_2^{(1)} y + (2n+1)q_2^{(2)} h|}{[(x-x_0) + (q_1^{(1)} y + q_1^{(2)} h)]^2 + [q_2^{(1)} y + (2n+1)q_2^{(2)} h]^2},$$

– для покрытия

$$T_2 = \frac{T_0}{\pi} \left\{ \sum_0^{\infty} \left(\frac{\eta-1}{\eta+1} \right)^n \frac{|q_2^{(2)} [y + (2n+1)h]|}{[(x-x_0) + q_1^{(2)} (y+h)]^2 + [q_2^{(2)} (y + (2n+1)h)]^2}, \right.$$

$$\left. q_1 = -\frac{k_{12}}{k_{22}}, \quad q_2 = \frac{\sqrt{k_{11}k_{22} - k_{12}^2}}{k_{22}}, \quad c = \frac{k_{11}k_{22} - k_{12}^2}{k_{22}^2}, \quad \eta = \frac{k_{22}^{(1)} q_2^{(1)}}{k_{22}^{(2)} q_2^{(2)}}, \right.$$

где введены следующие обозначения; k_{ij} – коэффициенты теплопроводности материалов, $i, j = 1, 2$.

В настоящее время разрабатывается компьютерная программа расчета температур и их распределения, как в покрытии, так и основании для различных материалов. Рассматриваются частные случаи, когда покрытие и основание изотропные, а также другие сочетания тепловых свойств материалов. Дополнительно предложен алгоритм расчета тепловых потоков.

Работа выполнена при поддержке БРФФИ, задание № T20YKA – 012.

Список литературы

- 1 **Cholakova, T. M.** Effect of the heat treatment on mechanical and structural properties of CrTiAlN coatings deposited at low temperature / T. M. Cholakova, L. P. Kolaklieva, R. D. Kakanakov // Bulgarian Chemical Communications. – Special Issue G. – 2018. – Vol. 50. – P. 197–204.
- 2 **Jabłoński, P.** Structural FEM analysis of thermal sprayed coatings under conditions of contact pressure and high temperature / P. Jabłoński, P. Czajka // Poznan University of Technology, Institute of Mechanical Technology Conference Paper. – 2017. – P. 40–47.
- 3 **Hsieh, Ming-Hsien.** Analytical investigations for heat conduction problems in anisotropic thin-layer media with embedded heat sources / Ming-Hsien Hsieh, Chien-Ching Ma // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2002. – Vol. 45. – P. 4117–4132.
- 4 **Можаровский, В. В.** О расчете напряженного состояния покрытий из функционально-градиентных и термочувствительных материалов / В. В. Можаровский, Е. М. Березовская // Известия ГГУ им. Ф. Скорины, Гомель. – 2014. – № 3 (84). – С. 86–92.
- 5 **Прусов, И. А.** Термоупругие анизотропные пластинки / И. А. Прусов. – Минск : БГУ, 1978. – 200 с.
- 6 **Можаровский, В. В.** Прикладная механика слоистых тел из композитов / В. В. Можаровский, В. Е. Старжинский. – Минск : Наука, 1988. – 280 с.
- 7 **Можаровский, В. В.** Плоские контактные задачи для анизотропных покрытий с учетом трения / В. В. Можаровский // Трение и износ. – 1992. – Т.13, № 5. – С. 825–836.