УДК 539.3

Э.А. Ткаченко, В.Н. Чехов

РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ СЛОИСТЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ДВУХОСНОМ НАГРУЖЕНИИ И ПОВЫШЕННЫХ ЗНАЧЕНИЯХ СРЕДНЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ СЛОЕВ

Введение. Существующие в машиностроении и современной технике покрытия из конструкционных материалов, как правило эксплуатируются в условиях повышенных температур и высоких уровней внешнего сжимающего давления. При анализе их долговечности и несущей способности в технической литературе, как правили, используются локальные критерии прочности основанные на исследовании напряженно деформированного состояния элементов конструкций в сочетании с использованием соответствующего критерия прочности. В этом случае незначительная погрешность в постановке задачи или выборе расчетной схемы может привести к существенным неточностям в оценке напряженного состояния в опасных точках объекта исследования и,как следствие, неправильной оценке указанных выше характеристик процесса его деформирования. Поэтому при наличии сильно сжатых участков поверхности таких покрытий целесообразно также использовать интегральный критерий прочности основанный на анализе устойчивости состояния равновесия такого участка слоистого материал под действием сжимающих усилий. Таким образом приходим к проблеме исследования поверхностной устойчивости в структуре слоистых конструкционных материалов под действием двухосных сжимающих нагрузок и повышенного уровня температурного поля.

В работах [1,2] проблема устойчивости слоистых покрытий под действием сжимающих поверхностных нагрузок была рассмотрена в рамках модели кусочно-однородных сред на основе трехмерной линеаризированной теории устойчивости при малых и конечных докритических деформациях. Однако при этом не учитывались повышенные значения средней температуры слоев.

© Ткаченко Э.А., Чехов В.Н.,2009

Постановка задачи. Зона контакта между элементами конструкций и слоистыми покрытиями моделируется слоистой средой, состоящей из слоистого пакета с ограниченным числом слоев и структурно однородного полупространства, как показано на Рис. 1. Каждый слой и полупространство отнесены к системе локальных лагранжевых координат $\rangle_i^{(k)}$, до деформирования совпадающихс декартовыми координатами.Здесь обозначено $i - \overline{1,3}$, $\hbar = \overline{1, K+1}$, $ж$ - количество слоев в покрытии. Среда сжимаетися распределенными нагрузками интенсивности p_{ii}, как в плоскости слоев, так и в ортоганальном направлении между отдельными слоями, а также между слоями и полупространством предполагаем условия полного контакта. На бесконечности будут выполняться условия затухания возмущения компонент вектора перемещений $\vec{u}$. При этом исследуется неустойчивость в структуре слоистого тела, когда критические значения параметров нагружения и волнообразования зависят только от соотношения между геометрическими и механическими характеристиками отдельных слоев покрытия, а не от размеров и формы всего элемента конструкций в целом. Для определенности считаем, что физико-механические свойства слоев и полупространства описываются моделью линейно упругого трансверсально изотропного или изотропного тела. В литературе $[\![9]\!]$ для исследования задач термоустойчивости тонкостенных элементов конструкций и трехмерных тел $[\![1]\!]$ используется квазистатический подход. При этом предполагается, что температурное поле влияет только на докритическое напряженно-деформированное состояние исследуемого тела. Используя такой подход считаем, что все линеризированные соотношения постановочного характера приведенные в работах $[\![2]\!]$, где рассматривается проблема поверхностной неустойчивости слоистых покрытий под действием сжимающих поверхностных нагрузок, остаются без изменения. Изменяются лишь, входящие в коэффициенты линеаризированных уравнений устойчивости, выражения для докритического напряженного состояния и физико-механические характеристики слоистой среды, если последние существенно зависят от температуры. В рамках такого подхода в зависимости от характера изменения температуры, ее предельного значния $\widehat{T}$, теплофизических, физико-

ISSN 1562-9945

механических и геометрических характеристик среды, вида деформирования и характера силового нагружения, граничных условий на поверхности среды и условий межслоевого контакта могут быть приведены различные матаматические постановки и разработаны методы решения конкретных задач о докритическом термонапряженном состоянии и поверхностной неустойчивости рассматриваемх слоистых тел. В случае высоких уровней однородного температурного поля слоев влияние температурного поля на процесс потери устойчивости слоистого полупространства будем оценивать через значения физико-механических характеристик слоев покрытия и полупространства, определяемых экспериментально при различных значениях температуры. Поскольку задача устойчивости при каждом значении температуры будет рассматриваться с учетом заданных значений физико-механических характеристик среды, то температура T выполняет здесь роль параметра. Таким образом окончательно постановка задачи сводится к постановке изложенной в работах $[\![1\text{-}3]\!]$, но при этом для упругих постоянных α_{ij}, G_{ij} используются их значения, полученные при температуре $T = \widehat{T}$.

Метод решения. Для определения докритических напряжений, обусловленных постоянной температурой, можно использовать соотношения Дюгамеля-Неймана. В случае однородного докритического состояния при плоской деформации, когда материал слоев и полупространства линейно упругий, ортотропный докритические напряжения в i - ом слое имеют вид

$$\sigma_{11,i}^{0} = -p_{11}\left[(1 - y\frac{a_{13}}{a_{33}})_{(T+1)}\frac{(a_{11} - a_{13}^{2}a_{33}^{-1})_{(i)}}{(a_{11} - a_{13}^{2}a_{33}^{-1})_{(T+1)}} - y\frac{a_{13}^{(i)}}{a_{33}^{(i)}}\right] -$$

$$-\theta\left[(\beta_{11} - \beta_{33}\frac{a_{13}}{a_{33}})_{(i)} - (a_{11} - \frac{a_{13}^{2}}{a_{33}})_{(i)}\frac{(\beta_{11} - \beta_{33}\frac{a_{13}}{a_{33}})_{(T+1)}}{(a_{11} - \frac{a_{13}^{2}}{a_{33}})_{(T+1)}}\right], \sigma_{33,i}^{0} = -p_{33} = -p_{11}y \quad (2.1)$$

Здесь обозначено $\beta_{ii} = \alpha_{kl}^{T} c_{iikl}$ при $i = 1,3$, $\widehat{T} = -T_0$ c_{ijkl} - компоненты тензора упругой жесткости ортотропного тела. При получении формул (2.1) использовались условия равенства докритических деформаций $\varepsilon_{11,1}^{0} = \varepsilon_{11,\hbar}^{0} = \varepsilon_{11,\kappa+1}^{0}$.

При однородном докритическом состоянии решение уравнений устойчивости в пределах каждого элемента слоистой среды выражается через функции $\Psi_i^{(k)}$ $(i = 1,3;\ k = \overline{1, K+1.})$, которые в свою очередь удовлетворяют уравнениям

$$\frac{\partial^2 \Psi_i^{(k)}}{\partial {x_3^{(k)}}^2} + \eta_i^{(k)2} \frac{\partial^2 \Psi_i^{(k)}}{\partial {x_1^{(k)}}^2} = 0\,, \tag{2.2}$$

В зависимости от уровня нагружения и физико-механических свойств среды коэффициенты $\eta_i^{(k)}$ могут быть вещественными или комплексными величинами.

Между элементами слоистой среды предполагается выполнение условий полного контакта, которые в возмущениях можно записать

$$\begin{aligned} &P_i^{(k)}(x_1^{(k)}, x_3^{(k)} + 0) = P_i^{(t)}(x_1^{(t)}, x_3^{(t)} - 0), \quad t = k+1, \\ &u_i^{(k)}(x_1^{(k)}, x_3^{(k)} + 0) = u_i^{(t)}(x_1^{(t)}, x_3^{(t)} - 0), \quad i = 1,3 \end{aligned} \tag{2.3}$$

На «бесконечности» выполняются условия затухания

$$u_i^{(K+1)}(x_1^{(K+1)}, x_3^{(K+1)}) \to 0 \text{ при } x_3^{(K+1)} \to -\infty \tag{2.4}$$

На поверхности среды ($x_3^{(1)} = 0$) граничные условия задаем в напряжениях

$$P_i^{(1)}(x_1^{(1)}, 0) = \tilde{P}_i\,. \tag{2.5}$$

Здесь $P_i^{(k)}(x_1^{(k)}, x_3^{(k)})$ - компоненты возмущений главного вектора напряжений на поверхности сопряжения $\hbar$-го элемента среды; $\tilde{P}_i$- компоненты возмущений поверхностной нагрузки. При «мертвых» значениях p_{33} величина $\tilde{P}_i = 0$, а при следящих ⟦2,3⟧.

$$\tilde{P}_i = -p_{33}(N_i \frac{\partial u_\alpha^{(1)}}{\partial x_\alpha^{(1)}} - N_\alpha \delta_{\beta i} \frac{\partial u_\alpha^{(1)}}{\partial x_\beta^{(1)}}) \tag{2.6}$$

Здесь по повторяющимся индексам производится суммирование. Для построения разрешающих характеристических уравнений используется матричный подход, изложенный в работе⟦2,3⟧. Применительно к рассматриваемой задаче оно имеет вид

$$\det\left\| d_{lm} + d_{l,m+2} \right\| = 0\,. \qquad l,m = 1,2 \tag{2.7}$$

Решение для конкретной модели. Считаем материал слоев и полупространства линейно-упругим изотропным. В этом случае имеем зависимости

 ISSN 1562-9945

$$a_{11} = a_{33} = \frac{E(1-\nu\ )}{(1-2\nu\ )(1+\nu\ )}, a_{13} = \frac{E\nu}{(1-2\nu\ )(1+\nu\ )}, G_{13} = \frac{E}{2(1+\nu\ )}. \qquad (3.1)$$

Здесь E и ν -модуль упругости и коэффициент Пуассона. Для определенности считаем , что исследуемое покрытие из трех слоев, сопряжено с однородной полуплоскостью, а нагрузка p_{33} является «мертвой». Температура слоев составляет 600^0С. Материал слоев и полупространства, а также их свойства при указанной температуре приведены в таблице. На Рис. 2 приведеночисленное решение задачи.

Таблица

Матеріали: E(Кг/мм^2) / ν				T^0C
Х18Н10Т	АД1 $^)$	АМг4 $^)$	АМг6	
18700/0,3	1300 / 0,45	1540/0,41	1700/0,4	600
18700/0,3	195 / 0,47	800/0,42	1300/0,41	615
18700/0,3	130 / 0,47	800/0,43	1300/0,41	620
18700/0,3	50 / 0,49	800/0,43	1300/0,41	650

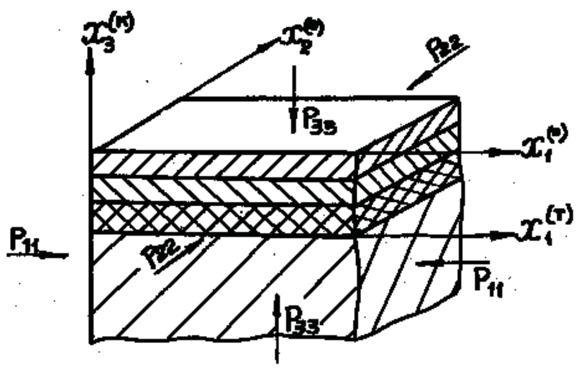

Рисунок 1

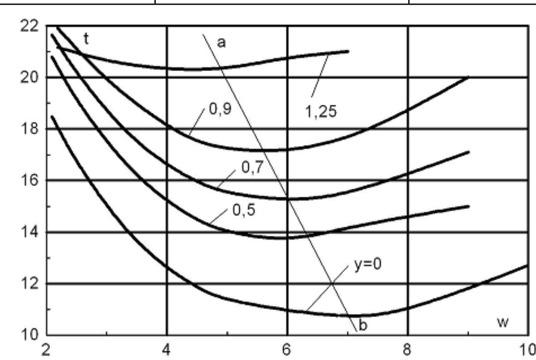

Рисунок 2

Здесь обозначено $t = 10^2(p_{11}/E_4)$; $\omega = (\pi hH)/l.$, где l – общая для всего пакета слоев длина полуволны формы потери устойчивости; цифры возле кривих показуют значення параметра $y = p_{33}/p_{11}$. Анализ решения показал, при выбранных параметрах задачи увеличение давления p_{33} приводит к существенному повышению критических значений нагрузок p_{11} и состояние покрытия можно считать устойчивым. Однако при более высоких значениях температур $T = \widehat{T}$, этот вывод может оказаться неверным. Поэтому необходимо проведение дополнительных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гузь А.Н. Механика разрушения композитных материалов при сжатии.- К.: Наук. думка,1990.-629 с.
2. Гузь А.Н., Чехов В.Н. Поверхностная неустойчивость слоистых материалов при малых и конечных докритических деформациях//Мех. Композитн. материалов.-1984.- № 5. - С. 838 – 84.
3. Ткаченко Э.А. Чехов В.Н. Устойчивость упругого слоистого пакета, сопряженного с двумя полупространствами, при действии сжимающих нагрузок.-2002, 38№11 с. 110-116.

Получено 01.04.2009г.

ISSN 1562-9945