

УДК 539.3

В.Н. Чехов, Э.А.Ткаченко

УСТОЙЧИВОСТЬ СЛОИСТЫХ ПОКРЫТИЙ В ТРИБОСОПРЯЖЕНИИ ПРИ ЖИДКОСТНОЙ СМАЗКЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ КОНТАКТА

Введение. При эксплуатации элементов конструкций триботехнического назначения в зоне контакта сопрягаемых поверхностей покрытий используются различные виды смазочных материалов. В зависимости от вида применяемого для этого материала, функционального его назначения и условий эксплуатации в литературе выделяют различные классы смазочных материалов и видов смазки. В частности [3] отмечено, что смазочные материалы могут быть твердыми или жидкими. В первом случае между контактирующими между собой поверхностями в трибосопряжении возникает контакт сухого трения. В случае жидкой смазки в зависимости от толщины слоя смазки выделяют граничный, смешанный и жидкостный виды смазки. В последнем случае при полном отделении неровностей контактирующих поверхностей возникает упругогидродинамический и гидростатический виды смазки, которые реализуются при очень высоких давлениях, действующих на поверхностях контакта сопрягаемых покрытий. При выборе расчетной схемы в задачах расчета устойчивости слоистых покрытий триботехнического назначения в работах [2,4], проблема сводится к исследованию поверхностной потери устойчивости в слоистой среде, сопряженной со структурно однородным полупространством. Реакция взаимодействия контактирующих между собой тел заменяется системой равномерно распределенных поверхностных нагрузок. Исходя из указанных выше характерных особенностей рассматриваемого здесь вида смазки считаем, что при ее использовании в расчетной схеме реакцию взаимодействия сопрягаемых элементов конструкций необходимо моделировать поверхностными распределенными нагрузками следящего типа. Поэтому ниже в рамках модели кусочно-однородных сред рассматривается задача потери устойчивости и определения критических значений параметров нагружения и волнообразования в

слоистой полуограниченной среде, находящейся в поле действия сжимающих распределенных нагрузок, когда к граничной поверхности ее приложена система распределенных нагрузок следящего вида. Как правило в зоне контакта элементов триботехники имеет место повышенный уровень температуры, поэтому при расчетах на устойчивость покрытий необходимо учитывать температурный фактор.

§1 Постановка задачи; основные соотношения. Для решения задачи используется трехмерная линеаризованная теория устойчивости при малых докритических деформациях, когда основное состояние определяется по геометрически линейной теории [1]. Для учета температуры используется квазистатический подход, когда температурное поле влияет только на значения компонент докритического напряженно-деформированного состояния и не учитывалось при получении линеаризованных уравнений устойчивости. Объект исследования моделируется слоистой средой, состоящей из слоистого покрытия, сопряженного со структурно однородным основанием. Слоистая среда находится под действием сжимающих в плоскости слоев статической распределенной нагрузкой интенсивности p_1 . К поверхности покрытия приложена система сил p_3 следящего характера. Материал слоев и основания считаем линейно упругим трансверсально - изотропным сжимаемым. Поверхность покрытия нагревается от температуры естественного состояния T_0 до рабочей температуры \hat{T} . При этом величина $\delta = [(T - T_0)/T_0] > 1$. Между отдельными элементами слоистой среды предполагаем выполнение условий абсолютно жесткого силового и идеального теплового контактов. Исследуется поверхностная форма потери устойчивости покрытия. В работе [1] рассмотрены различные подходы для исследования поставленной задачи. Следуя этой работе считаем, что соотношения постановочного характера из работы [2], где не учитывалось влияние температуры на устойчивость покрытий, сохраняются без изменения. Изменяются только выражения для компонент докритического напряженного состояния и физико-механические характеристики отдельных слоев и полупространства. В силу принятой постановки и расчетной схемы предполагаем, что в окрестности приповерхностной зоны, где реализуется возмущенное

напряженное состояние, температурное поле изменяется несущественно. Поэтому температурное поле в этой зоне можно считать однородным. В этом случае докритическое напряженное состояние рассматриваемой слоистой среды является кусочно – однородным [4]. Уравнения устойчивости в пределах каждого элемента слоистой среды в имеют вид

$$\left[(a_{11} - p_{11}) \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + (G_{12} - p_{22}) \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + (G_{13} - p_{33}) \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} \right] u_1 + \quad (1)$$

$$+ (a_{12} + G_{12}) \frac{\partial^2 u_2}{\partial x_1 \partial x_2} + (a_{13} + G_{13}) \frac{\partial^2 u_3}{\partial x_1 \partial x_3} = 0. \quad (1,2,3, \text{Curl}).$$

Связь между компонентами возмущений напряжений σ_{ij} и перемещений u_i используем в виде

$$\sigma_{ij} = \delta_{ij} a_{ik} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + (1 - \delta_{ij}) G_{ij} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

В соотношениях (1),(2) через a_{ij}, G_{ij} обозначены упругие постоянные материала слоистой среды, а через x_i -лагранжевы координаты, до деформирования совпадающие с декартовыми. Координата x_3 направлена по нормали к поверхности покрытия. Компоненты возмущений поверхностных следящих нагрузок \tilde{P}_i будут

$$\tilde{P}_i = -p_3 \left(N_i \frac{\partial u_\alpha}{\partial x_\alpha} - N_\alpha \delta_{\beta i} \frac{\partial u_\alpha}{\partial x_\beta} \right). \quad (3)$$

Здесь обозначено: δ_{ij} - символ Кронекера; N_i - единичный орт нормали к поверхности, к которой приложена следящая нагрузка в недеформированном состоянии; p_3 - интенсивность нагрузки на поверхность, которая определяется нормалью N_3 . По повторяющимся индексам в формулах (2),(3) предполагается суммирование. Для исследования устойчивости покрытия использован статический метод Эйлера и соответствующие ему критерии устойчивости. Поскольку в общем случае следящая нагрузка не является консервативной, для его использования необходимо выполнение достаточных условий его применимости. Когда нагрузка p_3 приложена к части S_0 поверхности слоистого тела, ограниченной кривой L , такие условия имеют вид [1].

$$\int_L (u_3^{(1)} u_m^{(2)} - u_3^{(2)} u_m^{(1)}) dL = 0, \quad (4)$$

где u_3 - возмущения перемещений, направленных вдоль нормали к поверхности

S_0 , а u_m - по нормали к кривой L в плоскости S_0 . Условия механического кон - такта между отдельными элементами слоистой среды в возмущениях принимают вид

$$P_i^{(k)}(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, x_3^{(k)}) \Big|_{x_3^{(k)} = -h_k} = P_i^{(t)}(x_1^{(t)}, x_2^{(t)}, x_3^{(t)}) \Big|_{x_3^{(t)} = 0},$$

$$u_i^{(k)}(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, x_3^{(k)}) \Big|_{x_3^{(k)} = -h_k} = u_i^{(t)}(x_1^{(t)}, x_2^{(t)}, x_3^{(t)}) \Big|_{x_3^{(t)} = 0} \quad (t = k+1) \quad (5)$$

В соотношениях (5) обозначено : h_k - толщина k - го слоя; k - порядковый номер слоя ($k = \overline{1, T}$). На «бесконечности» для полуплоскости имеем условия затухания возмущений

$$u_i^{(T+1)}(x_1^{(T+1)}, x_2^{(T+1)}, x_{(T+1)}) \Big|_{x_3^{(T+1)} \rightarrow -\infty} \rightarrow 0. \quad (6)$$

На поверхности покрытия ($x_3^{(1)} = 0$) граничные условия в возмущениях будут

$$P_i^{(1)}(x_1, x_2, 0) = \tilde{P}_i \quad (7)$$

Задача нахождения критических значений параметров задачи обуславливающих поверхностную неустойчивость слоистых покрытий сводится к исследованию на собственные значения краевой задачи (1), (5)-(7) при соответствующих значениях компонентов докритического напряженного состояния и физико - механических характеристик покрытия и полупространства. В качестве основных параметров задачи определяются параметры волнообразования $\omega_{кр} = (\pi H)/l$ и нагружения $t_{кр} = 10^2 (p_1/E_3)$, характеризующие соответственно длиной полуволны формы потери устойчивости l_i и величиной интенсивности сжимающей нагрузки p_1 .

§2. Решение для конкретной задачи. Влияние следящих поверхностных нагрузок при повышенных температурах на устойчивость слоистого покрытия рас-

смотрим на примере двухслойного покрытия (первый слой - высоколигированная сталь 3X13; второй - латунь Л62; основание -

чугун МСЧ 28-48) в рамках плоской деформации в плоскости x_1Ox_3 . Для решения задачи использован матричный подход, изложенный в работах [2,4-6]. Расчеты проводились при двух значениях температуры \hat{T} - 20⁰С и 270⁰С. Необходимые значения физико-механических и теплофизических характеристик элементов слоистой среды приведены в таблице [4]. Влияние повышенного температурного поля на поверхностную устойчивость покрытия можно оценить за счет учета измененных физико-механических характеристик отдельных элементов рассматриваемой слоистой среды. При решении задачи фиксировались параметры: $n_k = E_k/E_{T+1}, y = p_3/p_1, \nu_k, \rho_k = h_k/H$. При $\theta \neq 0$ значения коэффициентов α_k^t выбирались из таблицы; $H = \sum_{k=1}^T h_k$. При $\hat{T} = 20^0$, имеем : $n_1 = 1,88; n_2 = 0,83; \nu_1 = 0,278; \nu_2 = 0,32; \nu_3 = 0,23$; . При $\hat{T} = 270^0$ С имеем $n_1 = 1,875; n_2 = 0,63; \nu_1 = 0,29; \nu_2 = 0,42; \nu_3 = 0,25$. В обоих случаях было принято $\rho_1 = 0,15; \rho_2 = 0,85$. Отсюда следует, что при повышении температуры покрытия на 250⁰ в основном изменились два параметра n_2 и ν_2 , величина которых обусловлена свойствами второго слоя. Анализ решения задачи показал, что совместное воздействие следящих поверхностных нагрузок и повышенного температурного поля может привести к поверхностной неустойчивости слоистых покрытий, первоначально находящихся в состоянии устойчивого равновесия. Например при нормальной температуре $\hat{T} = 20^0$ состояние равновесия покрытия можно считать устойчивым ($t_{kp} = 25,55$) на всем диапазоне изменения параметра $y = p_3/p_1$.

Тем -ра \hat{T}^0	Материал	Модуль Юнга $E \times 10^{-6}$ (кг/см ²)	Коэффиц. Пуассона ν	Коэфф. линейн. расширения $\alpha_t \times 10^5$ (1/град)
20	Сталь 3Х13	2,25	0,278	1,4
20	Латунь Л62	1,02	0,32	2,6
20	Чугун МСЧ 28-48	1,2	0,23	1,1
270	Сталь 3Х13	2,8	0,29	1,4
270	Латунь Л62	0,8	0,42	2,6
270	Чугун МСЧ 28-48	1,15	0,25	1,1

При $T = 270^{\circ}C$ имеем $t_{кр} = 17,85$, что составляет 69 % от первоначального значения этой величины. Можно ожидать, что при более высоких значениях температуры величина $t_{кр}$ будет уменьшаться и состояние равновесия покрытия может стать неустойчивым. Этот вывод имеет место лишь для выбранных параметров слоистой среды. В других случаях необходимо проводить дополнительные исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гузь А.Н. Основы трехмерной теории устойчивости деформируемых тел. К.; Наук. думка.-1986.-511с.
2. Гузь А.Н., Чехов В.Н. Поверхностная неустойчивость слоистых материалов при малых и конечных докритических деформациях//Мех. Композитн. материалов.-1984.- № 5. - С. 838-845
3. Справочник по триботехнике. В 3-х томах. Т.2. Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения. Под редакцией Хебды М., Чичинадзе А.В. - М.: Машиностроение, 1990. - 416с.
4. Ткаченко Э.А. Устойчивость слоистых покрытий триботехнического назначения под действием следящих нагрузок// Прикл. механика.-1999.- №6.- с. 32-38.
5. Ткаченко Э.А., Чехов В.Н. Совместное влияние температуры и поверхностных сжимающих нагрузок на устойчивость многослойных упругих покрытий при малых докритических деформациях// Прикл. механика.-1998.-34,№8.-С.-32 -39.
6. Чехов В.Н. Поверхностная неустойчивость слоистой среды, сопряженной с однородным полупространством // Прикл. механика.- 1984.- № 11.-С. 35-42.

Получено 15.06.2007 г.