
**НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ,
ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ**

УДК 621.78.015.07

**РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ**© 2025 г. С. В. Карцев^{1, *}, О. В. Бармина¹, С. Г. Елагин¹¹ *Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия*** e-mail: kazob1@mail.ru*

Поступила в редакцию 21.08.2024 г.

После доработки 10.12.2024 г.

Принята к публикации 20.12.2024 г.

Представлены результаты теоретических исследований, целью которых является обоснование напряженно-деформированного состояния высоконагруженных узлов трения мельницы самоизмельчения сырья на первой стадии измельчения ММС-70×23 «Гидрофол», объемом 80 м³, подшипники скольжения которой восстановлены газотермическим напылением. Показана работа системы «подшипник скольжения с покрытием–вращающаяся цапфа». Сформулированы основные направления теоретических исследований и обоснованы направления дальнейших экспериментальных исследований.

Ключевые слова: напыление, покрытие, подшипник, трение, смазка, цапфа

DOI: 10.31857/S0235711925020074, **EDN:** DGKQZB

Важнейшими характеристиками подшипников скольжения, работающих в условиях внешнего трения, является их нагрузочная способность, потери на трение и износостойкость несущих деталей подшипника скольжения. Однако вследствие изнашивания поверхностей трения изменяются размеры сопряжения, диаметр цапфы уменьшается, а внутренний диаметр вкладыша увеличивается, что приводит к возрастанию динамических нагрузок, увеличению потерь на трение и выходу подшипника скольжения из строя [1, 2].

Анализ условий работы подшипников скольжения свидетельствует о том, что в результате недостаточно хороших теплофизических характеристик применяемых материалов происходит их нагревание в процессе работы, что вызывает изменение механических характеристик материала и влияет на напряженное состояние в подшипнике скольжения. Кроме того, на напряженное состояние в подшипнике оказывают влияние условия эксплуатации. Подшипники скольжения мельницы самоизмельчения сырья на первой стадии измельчения ММС-70×23 «Гидрофол» работают в режиме гидродинамической смазки, а во время пуска и остановки машины, работают в условиях граничной смазки.

Работа системы «подшипник скольжения с покрытием–вращающаяся цапфа» представлена на рис. 1.

Покрытие по всему наружному периметру соприкасается с основным материалом подшипника скольжения, а с вращающейся цапфой — лишь некоторой частью внутреннего периметра. При этом в местах контакта цапфы с покрытием, а точнее между цапфой и покрытием, находится тонкая пленка смазочного материала, через

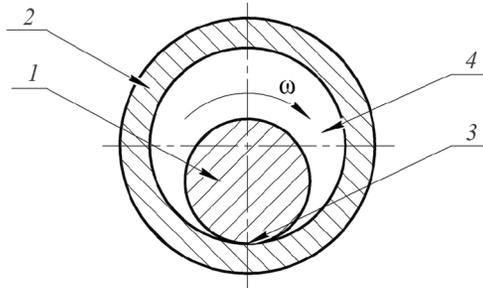


Рис. 1. Схема работы системы «подшипник скольжения с покрытием—вращающаяся цапфа»: 1 — цапфа; 2 — подшипник скольжения с покрытием; 3 — смазка; 4 — зазор.

который происходит непосредственное их взаимодействие. Кроме того, взаимодействие между цапфой и покрытием происходит через различные неровности и находящиеся в смазочном материале частицы. Толщина масляного слоя зависит от частоты вращения цапфы, шероховатости покрытия восстановленного подшипника скольжения и цапфы, структуры материалов покрытия и цапфы и ряда других факторов. В связи с этим проблема определения напряжений на границе «смазка—покрытие» и «смазка—цапфа» представляет собой сложную задачу гидродинамики дисперсных сред. При решении задачи по определению напряженно-деформированного состояния в подшипнике скольжения с покрытием был принят полиномиальный закон распределения напряжений, который представлен выражением

$$\sigma_{r/L}^o = \begin{cases} A_n + B_n \theta + C_n \theta^2, & \theta \in (\theta_1; \theta_2), \\ 0, & \theta \notin (\theta_1; \theta_2), \end{cases}$$

$$\tau_{r\theta/L}^o = \begin{cases} A_\tau + B_\tau + C_\tau \theta^2, & \theta \in (\theta_1; \theta_2), \\ 0, & \theta \notin (\theta_1; \theta_2), \end{cases}$$

где A_n , B_n , C_n , A_τ , B_τ , C_τ — экспериментальные коэффициенты, вычисленные методом наименьших квадратов.

Такое представление закона распределения напряжений является наиболее общим, поскольку коэффициенты A , B , и C определяются на основе теоретических исследований и на основе экспериментальных данных [3–5]. Принятая при расчете схема представлена на рис. 2.

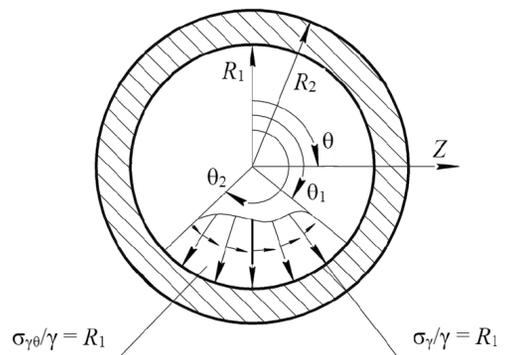


Рис. 2. Расчетная схема определения напряженно-деформированного состояния подшипника скольжения с покрытием.

В данном случае существует двухмерная задача о напряженно-деформированном состоянии в полярной системе координат. Такое состояние имеет место при условии $D \gg H$ и $D \ll H$, где $D = 2R$, а H — толщина покрытия, нанесенного газотермическим напылением.

Для решения задачи введем функцию напряжений $\varphi(r, \theta)$, удовлетворяющую уравнению

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right) \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} \right) = 0. \quad (1)$$

В этом случае компоненты тензора напряжений связаны с функцией напряжений соотношениями

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} \\ \sigma_\theta &= \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} \\ \tau_{r\theta} &= -\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} \right) \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

Компоненты тензора деформаций связаны с напряжениями следующими соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r &= \lambda_1 \sigma_r - \lambda_2 \sigma_\theta \\ \varepsilon_\theta &= \lambda_1 \sigma_\theta - \lambda_2 \sigma_r \\ \gamma_{r\theta} &= \frac{1}{G} \tau_{r\theta} \end{aligned} \right\},$$

где σ_r — радиальная компонента; σ_θ — тангенциальная компонента нормального напряжения; ε_r , ε_θ , $\gamma_{r\theta}$ — радиальная, тангенциальная и сдвиговая компонента деформаций соответственно; G — модуль сдвига; E — модуль упругости; ν — коэффициент Пуассона.

$$\text{При } D \gg H \quad \lambda_1 = \frac{1}{E}; \quad \lambda_2 = \frac{\nu}{E}.$$

$$\text{При } D \ll H \quad \lambda_1 = \frac{1 - \nu^2}{E}; \quad \lambda_2 = \frac{\nu(1 + \nu)}{E}.$$

В случае $D \gg H$, $\sigma_z = 0$, а при $D \ll H$, $\sigma_z = \nu(\sigma_r + \sigma_\theta)$, где σ_z — напряжение в направлении оси OZ .

Общее решение уравнения (1) имеет вид

$$\begin{aligned} \varphi &= a_0 \ln r + b_0 r^2 + c_0 r^2 \ln r + d_0 r^2 \theta + a'_0 \theta + \frac{1}{2} a_1 r \theta \sin \theta + \left(b_1 r^3 + \right. \\ &+ a'_1 r^{-1} + b'_1 r \ln r \left. \right) \sin \theta - \frac{c_1}{2} r \theta \cos \theta + \left(d_1 r^3 + c'_1 r^{-1} + d'_1 r \ln r \right) \cos \theta + \\ &+ \sum_{i=2}^{\infty} \left(a_i r^i + b_i r^{i+2} + a'_i r^{-i} + b'_i r^{-i+2} \right) \cos \theta + \sum_{i=2}^{\infty} \left(c_i r^i + d_i r^{i+2} + \right. \\ &\left. + c'_i r^{-i} + d'_i r^{-i+2} \right) \sin \theta. \end{aligned} \quad (3)$$

С учетом соотношений (2) напряжения примут вид

$$\begin{aligned}
 \sigma_r &= 2b_o + c_o(\ln r + 1) + 2d_o\theta + \frac{a_o}{r^2} + \left[a_1 r^{-1} + 2b_1 r - 2a'_1 r^{-3} + \right. \\
 &\quad \left. + b'_1 r^{-1} \right] \cos \theta + \left[c_1 r^{-1} + 2d_1 r - 2c'_1 r^{-3} + d'_1 r^{-1} \right] \sin \theta + \\
 &\quad + \sum_{i=2}^{\infty} \left[(i - i^2) a_i r^{i-2} + (i - 2 + i^2) b_i r^i - (i + i^2) a'_i r^{-i-2} + \right. \\
 &\quad \left. + (i^2 - i + 2) b'_i r^{-i} \right] \cos i\theta + \sum_{i=2}^{\infty} \left[(i - i^2) c_i r^{i-2} + d_i (i + 2 - i^2) r^i - \right. \\
 &\quad \left. - (i + i^2) c'_i r^{-i+2} + (-i^2 - i + 2) d'_i r^{-i} \right] \sin i\theta; \\
 \\
 \sigma_\theta &= -a_o r^{-2} + b_o + c_o(2 \ln r + 3) + 2d_o\theta + \left[6b_1 r + 2a'_1 r + \right. \\
 &\quad \left. + b'_1 r^{-1} \right] \cos \theta + \left[6d_1 r + 2c'_1 r^{-3} + d'_1 r^{-1} \right] \sin \theta + \sum_{i=2}^{\infty} \left[(i^2 - i) a_i r^{i-2} + \right. \\
 &\quad \left. + (i^2 + 3i + 2) b_i r^i + (i^2 + i) a'_i r^{-i-2} + (i^2 - 3i + 2) b'_i r^{-i} \right] \cos i\theta + \\
 &\quad + \sum_{i=2}^{\infty} \left[(i^2 - i) c_i r^{i-2} + (i^2 + 3i + 2) d_i r^i + (i^2 + i) c'_i r^{-i-2} + \right. \\
 &\quad \left. + (i^2 - 3i + 2) d'_i r^{-i} \right] \sin i\theta; \\
 \\
 \tau_{r\theta} &= d_o + a'_o r^{-2} + (2b_1 r - 2a'_1 r^{-3} + b'_1 r^{-1}) \sin \theta + \\
 &\quad + (-2d_1 r + 2c'_1 r^{-3} + d'_1 r^{-1}) \cos \theta + \sum_{i=2}^{\infty} \left[(i^2 - i) a_i r^{i-2} + (i^2 + i) b_i r^i - \right. \\
 &\quad \left. - (i^2 + i) a'_i r^{-i+2} - (i^2 - i) b'_i r^{-i} \right] \sin \theta - \sum_{i=2}^{\infty} \left[(i^2 - i) c_i r^{i-2} + (i^2 + i) d_i r^i - \right. \\
 &\quad \left. - (i^2 - i) c'_i r^{-i} - (i^2 - i) d'_i r^{-i} \right] \cos i\theta.
 \end{aligned}$$

Для решения задачи о распределении напряжений в системе «покрытие–цапфа» введем в рассмотрение две функции напряжений φ_1 и φ_2 , описывающие напряженное состояние в нанесенном покрытии и цапфе [6, 7].

Полное решение задачи будет получено, если удовлетворить условие идеального механического контакта на границе «покрытие–цапфа», а также граничные условия при $r = R_1$ и $r \rightarrow \infty$. В этом случае для определения неизвестных коэффициентов $a_o, b_o, c_o, d_o, a'_o, a_i, b_i, a'_i, b'_i, c_i, d_i, c'_i, d'_i$ рассмотрим систему уравнений

$$\begin{aligned}
 \sigma_r^1 \Big|_{r=R1} &= \sigma_r^o = A_n + B_n \theta + C \theta^2, \\
 \tau_{r\theta}^1 \Big|_{r=R1} &= \tau_{r\theta}^o = A_t + B_t \theta + C_t \theta^2, \\
 \sigma_r^1 \Big|_{r=R1} - \sigma_r^2 \Big|_{r=R2} &= 0, \\
 \tau_{r\theta}^1 \Big|_{r=R1} - \tau_{r\theta}^2 \Big|_{r=R2} &= 0, \\
 U^1 \Big|_{r=R1} - U^2 \Big|_{r=R2} &= 0, \\
 \sigma_r^2 \Big|_{r \rightarrow \infty} &= 0, \\
 \sigma_\theta^2 \Big|_{r \rightarrow \infty} &= 0, \\
 \tau_{r\theta}^2 \Big|_{r \rightarrow \infty} &= 0, \\
 U^2 \Big|_{r \rightarrow \infty} &= 0.
 \end{aligned} \tag{4}$$

Ввиду того, что в рассматриваемом случае имеет место многосвязная область, все компоненты тензора напряжений и перемещений должны быть однозначными функциями координат r и θ . В этой связи в (3) необходимо приравнять к нулю коэффициенты d_o, c_o, b_o .

Случай $d_o \neq 0$ соответствует распределению напряжений в кольце с трещиной, а при $c_o \neq 0$ и $b_o \neq 0$ — распределение перемещений неоднозначно.

С учетом вышеизложенного для покрытий получим

$$\begin{aligned}
 \sigma_{r\theta} &= \frac{a_o}{r^2} + \left[a_1 r^{-1} + 2b_1 r - 2a_1' r^{-3} + b_1' r^{-1} \right] \cos \theta + \\
 &+ \left[c_1 r^{-1} + 2d_1 r - 2c_1' r^{-3} + d_1' r^{-1} \right] \sin \theta + \sum_{i=2}^{\infty} \left[(i - i^2) a_i r^{i-2} + (i + 2 - i^2) b_i r^i - \right. \\
 &- \left. (i + i^2) a_i' r^{-i-2} - (i^2 + i + 2) b_i' r^{-i} \right] \cos \theta + \sum_{i=2}^{\infty} \left[(i - i^2) c_i r^{i-2} + d_i (i + 2 - i^2) r^i - \right. \\
 &- \left. (i + i^2) c_i' r^{-i-2} - (i^2 + i - 2) b_i' r^{-i} \right] \sin \theta, \\
 \sigma_{\theta\theta} &= \frac{a_o}{r^2} + \left(6b_1 r + 2a_1' r^{-3} + b_1' r^{-1} \right) \cos \theta + \left(6d_1 r + 2c_1' r^{-3} + d_1' r^{-1} \right) \sin \theta + \\
 &+ \sum_{i=2}^{\infty} \left[(i - i^2) a_i r^{i-2} + (i + 2 - i^2) b_i r^i - (i + i^2) a_i' r^{-i-2} + \right. \\
 &+ \left. (-i^2 - i + 2) b_i' r^{-i} \right] \cos i\theta + \sum_{i=2}^{\infty} \left[(i - i^2) c_i r^{i-2} + d_i (i + 2 - i^2) r^i - \right. \\
 &- \left. (i + i^2) c_i' r^{-i-2} + (-i^2 - i + 2) d_i' r^{-i} \right] \sin \theta,
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
U_1 = & -\frac{a_o}{r} + \cos\theta \left[a_1 \lambda'_1 \ln r + b_1 r^2 (\lambda'_1 - 3\lambda'_2) + a'_1 r^{-2} (\lambda'_1 + \lambda'_2) + \right. \\
& \left. + b'_1 \ln r (\lambda'_1 - \lambda'_2) \right] + \sin\theta \left[c_1 \lambda'_1 \ln r + d_1 r^2 (\lambda'_1 - 3\lambda'_2) + c'_1 r^{-2} (\lambda'_1 + \lambda'_2) + \right. \\
& \left. + d'_1 \ln r (\lambda'_1 - \lambda'_2) \right] + \sum_{i=2}^{\infty} \left\{ -i(\lambda'_1 + \lambda'_2) a_i r^{i-1} - [(i-2)\lambda_1 - (i+2)\lambda_1 - \right. \\
& \left. -(i+2)\lambda_2] b_i r^{i-1} + i(\lambda_1 + \lambda_2) a'_i r^{-1-i} + [(i+2)\lambda_1 - (i-2)\lambda_2] b_i r^{i-1} \right\} \cos i\theta + \\
& + \left\{ -i(\lambda_1 + \lambda_2) c_i r^{i-1} + [(i-2)\lambda_1 - (i+2)\lambda_2] d_i r^{i+1} + i(\lambda_1 + \lambda_2) c'_i r^{-i-1} + \right. \\
& \left. + [(i+2)\lambda_1 - (i-2)\lambda_2] d'_i r^{-i+1} \right\} \sin i\theta,
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
V_1 = & \sin\theta \left[-a_1 (\lambda'_1 \ln r + \lambda'_2) + b_1 r^2 (5\lambda'_1 + \lambda'_2) + a'_1 r^{-2} (\lambda'_1 + \lambda'_2) + \right. \\
& \left. + b_1 (1 - \ln r) (\lambda'_1 - \lambda'_2) \right] - \cos\theta \left[c_1 (\lambda'_1 \ln r + \lambda'_2) + d'_1 r^2 (5\lambda'_1 + \lambda'_2) + \right. \\
& \left. + c'_1 r^{-2} (\lambda'_1 + \lambda'_2) + d'_1 (1 - \ln r) (\lambda'_1 - \lambda'_2) + \sum_{i=2}^{\infty} \left\{ i(\lambda'_1 + \lambda'_2) a_i r^{i-1} + \right. \right. \\
& \left. \left. + \left[\lambda'_1 (i+4) + \lambda'_2 \left(i - 2 - \frac{4}{i} \right) \right] b_i r^{i+1} + i(\lambda'_1 + \lambda'_2) a'_i r^{-i+1} + \left[\lambda'_1 (i+4) + \right. \right. \right. \\
& \left. \left. + \left(i + 2 - \frac{4}{i} \right) \lambda'_2 \right] b'_i r^{-i+1} \right\} \sin i\theta - \left\{ i(\lambda'_1 + \lambda'_2) c_i r^{i-1} + \left[\lambda'_1 (i+4) + \right. \right. \\
& \left. \left. + \lambda'_2 \left(i + 2 - \frac{4}{i} \right) \right] d_i r^{i+1} + i(\lambda'_1 + \lambda'_2) c'_i r^{-i-1} + \left[\lambda'_1 (i+4) + \right. \right. \\
& \left. \left. + \left(i + 2 - \frac{4}{i} \right) \lambda'_2 \right] d'_i r^{-i+1} \right\} \cos i\theta \right\}.
\end{aligned}$$

Для второй области, т.е. для основы, с учетом того, что при $r \rightarrow \infty$ компоненты тензора напряжений равны нулю

$$\begin{aligned}
\sigma_{r2} = & -\frac{\bar{a}_o}{r^2} + \left(-2\bar{a}'_1 r^{-3} + \frac{\lambda_2}{\lambda_1^2} \bar{b}'_1 r^{-1} \right) \cos\theta + \left(\bar{c}'_1 r^{-1} - 2\bar{c}'_1 r^{-3} + \bar{d}'_1 r^{-1} \right) \sin\theta + \\
& + \sum_{i=2}^{\infty} \left[-i(i+i^2) \bar{a}'_i r^{-i-2} - (i^2+i-2) \bar{b}'_i r^{-i} \right] \cos i\theta + \sum_{i=2}^{\infty} \left[-i(i+i^2) \bar{c}'_i r^{-i-2} - \right. \\
& \left. - (i^2+i-2) \bar{d}'_i r^{-i} \right] \sin i\theta, \\
\tau_{r\theta 2} = & \frac{\bar{a}'_o}{r^2} + \left(-2\bar{a}'_1 r^{-3} + \bar{b}'_1 r^{-1} \right) \sin\theta - \left(-2\bar{c}'_1 r^{-3} + \bar{d}'_1 r^{-1} \right) \cos\theta + \\
& + \sum_{i=2}^{\infty} \left[-(i^2+i) \bar{a}'_i r^{-i-2} - (i^2-i) \bar{b}'_i r^{-i} \right] \sin i\theta - \sum_{i=2}^{\infty} \left[-(i^2-i) \bar{c}'_i - (i^2-i) \bar{d}'_i r^{-i} \right] \cos i\theta,
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
U_2 &= -\frac{\bar{a}_0}{r} + \cos \theta \bar{a}'_1 r^{-2} (\lambda_1^2 + \lambda_2^2) + \sin \theta \bar{c}'_1 r^{-2} (\lambda_1^2 + \lambda_2^2) + \\
&+ \sum_{i=2}^{\infty} \left\{ i (\lambda_1^2 + \lambda_2^2) \bar{a}'_i r^{-i-1} + [(i+2)\lambda_1^2 - (i-2)\lambda_2^2] \bar{b}'_i r^{-i+1} \right\} \cos i\theta + \\
&+ \sum_{i=2}^{\infty} \left\{ i (\lambda_1^2 + \lambda_2^2) \bar{c}'_i r^{-i-1} + [(i+2)\lambda_1^2 - (i-2)\lambda_2^2] \bar{d}'_i r^{-i+1} \right\} \sin i\theta, \\
V_2 &= \left[\bar{a}'_1 (\lambda_1^2 + \lambda_2^2) r^{-2} + \bar{b}'_1 \frac{(\lambda_1^2)^2 - (\lambda_2^2)^2}{\lambda} \right] \sin \theta - \left[\bar{c}'_1 (\lambda_1^2 + \lambda_2^2) r^{-2} + \right. \\
&+ \left. \bar{d}'_1 \frac{(\lambda_1^2)^2 - (\lambda_2^2)^2}{\lambda} \right] \cos \theta + \sum_{i=2}^{\infty} \left\{ i (\lambda_1^2 + \lambda_2^2) \bar{a}'_i r^{-i-1} + [\lambda_1^2 (i+4) + \right. \\
&+ \left. \left(i + 2 - \frac{4}{i} \right) \lambda_2^2] \bar{b}'_i r^{-i+1} \right\} \sin i\theta + \sum_{i=2}^{\infty} \left\{ i (\lambda_1^2 + \lambda_2^2) \bar{c}'_i r^{-i-1} + [\lambda_1^2 (i+4) + \right. \\
&+ \left. \lambda_2^2 \left(i + 2 - \frac{4}{i} \right) \right] \bar{d}'_i r^{-i+1} \right\} \cos i\theta.
\end{aligned}$$

Для того, чтобы удовлетворить граничным условиям при $r = R_1$, касательная и нормальная нагрузка на границе разложена в ряд Фурье на интервале $\theta \in (0, 2\pi)$ и представлена в виде

$$\sigma_z^0 = A_{on} + \sum_{i=1}^{\infty} (A_{in} \sin i\theta + B_{in} \cos i\theta),$$

$$\tau_{r\theta}^0 = A_{ot} + \sum_{i=1}^{\infty} (A_{it} \sin i\theta + B_{it} \cos i\theta),$$

где

$$\begin{aligned}
A_{on} &= \frac{A_n}{2} (\theta_2 - \theta_1) + \frac{C_n}{6} (\theta_2^3 - \theta_1^3); \\
B_{in} &= \frac{A_n}{2} (\sin i\theta_2 - \sin i\theta_1) + C_n \left[\left(\frac{\theta_2^2}{i} - \frac{2}{i^3} \right) \sin i\theta_2 + \frac{2\theta_2^2}{i^2} \cos i\theta_2 - \right. \\
&\quad \left. - \left(\frac{\theta_1^2}{i} - \frac{2}{i^3} \right) \sin i\theta_1 - \frac{2\theta_1^2}{i^2} \cos i\theta_1 \right]; \\
A_{in} &= B_n \left[-\frac{\theta_2}{i} \cos i\theta_2 + \frac{1}{i^2} \sin i\theta_2 + \frac{\theta_1}{i} \cos i\theta_1 - \frac{1}{i^2} \sin i\theta_1 \right]; \\
A_{ot} &= \frac{A_t}{2} (\theta_2 - \theta_1) + \frac{C_t}{6} (\theta_2^3 - \theta_1^3);
\end{aligned}$$

$$B_{it} = \frac{A_t}{2} (\sin i\theta_2 - \sin i\theta_1) + C_t \left[\left(\frac{\theta_2^2}{i} - \frac{r}{i^2} \right) \sin i\theta_2 + \frac{2\theta_2}{i^2} \cos i\theta_2 - \right. \\ \left. - \left(\frac{\theta_1^2}{i} - \frac{r}{i^2} \right) \sin i\theta_1 - \frac{2\theta_1}{i^2} \sin i\theta_1 \right]; \\ A_{it} = B_t \left[-\frac{\theta_2}{i} \cos i\theta_2 + \frac{1}{i^2} \sin i\theta_2 + \frac{\theta_1}{i} \cos i\theta_1 - \frac{1}{i^2} \sin i\theta_1 \right].$$

Входящие в выражения для компонент напряжений и перемещений коэффициенты определяются численно с использованием программ для персональных компьютеров из первых шести соотношений (4) путем приравнивания множителей при одинаковых степенях $\cos i\theta$ и $\sin i\theta$.

Для оценки прочности нанесенного покрытия и подшипника скольжения использовали критерий Мизеса

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_z - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2 + 6(\tau_{r\theta}^2 + \tau_{z\theta}^2 + \tau_{rz}^2)} \leq \sigma_T,$$

где σ_T — предел текучести материала.

Поскольку в основном материалы, нанесенные газотермическим методом подвержены хрупкому разрушению, а пределы прочности на растяжение σ^p и на сжатие σ^c различны, т.е. $\sigma^p \neq \sigma^c$, то для оценки их прочности использован критерий П. П. Баландина [3, 8]:

$$\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \sigma_y - \sigma_x \sigma_z - \sigma_y \sigma_z + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2) - \\ - (\sigma^p - \sigma^c)(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) = \sigma^p \sigma^c.$$

Предел прочности на сдвиг τ_b выражается через σ^p и σ^c следующим образом:

$$\tau_b = \sqrt{\frac{\sigma^p \sigma^c}{3}}.$$

Анализ результатов расчетов с использованием программ для персональных компьютеров показывает, что с увеличением диаметра цапфы максимальные радиальные напряжения и прочность сцепления покрытия снижаются [3, 9, 10].

Выводы. Использование в разработанной расчетно-теоретической модели напряженно-деформированного состояния системы «подшипник скольжения с покрытием—цапфа» полиномиального закона распределения напряжений позволило определить радиальные, тангенциальные и эквивалентные напряжения в покрытии подшипника скольжения.

Финансирование. Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Института машиноведения им. А. А. Благоднарова. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Работнов Ю. Н.* Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1979. 744 с.
2. *Карцев С. В.* Теоретическое и экспериментальное обоснование процесса снижения остаточных напряжений в износостойких покрытиях // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2021. № 2. С. 33.

3. Пузряков А. Ф., Кравченко И. Н., Соколов И. К. и др. Технологии нанесения защитных и износостойких покрытий повышенной прочности. М.: Эко-Пресс, 2013. 300 с.
4. Кравченко И. Н., Коломейченко А. В., Баранов Ю. Н., Пузряков А. А. Модель определения остаточных напряжений в плазменных покрытиях // Технология машиностроения. 2017. № 5. С. 59.
5. Барвинок В. А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий. М: Машиностроение, 1990. 384 с.
6. Иваницhev Д. А. Моделирование напряженно-деформированного состояния анизотропных пластин методом граничных состояний // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2022. Т. 19. № 2. С. 17.
7. Nayebpashae N., Seyedein S. H., Aboutalebi M. R. et al. Finite element simulation of residual stress and failure mechanism in plasma sprayed thermal barrier coatings using actual microstructure as the representative volume // Surface and Coatings Technology. 2016. V. 291. P. 103.
8. Capek J., Pala Z., Kovarik O. Residual stresses determination in textured substrates for plasma sprayed coatings // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2015. V. 82 (1). P. 012112.
9. Croom B. P., Bumgardner C., Li X. Unveiling residual stresses in air plasma spray coatings by digital image correlation // Extreme Mechanics Letters. 2016. V. 7. P. 126.
10. Gorynin A. G., Gorynin G., Golushko S. Mathematical modeling of three-dimensional stress-strain state of homogeneous and composite cylindrical axisymmetric shells // J. of Siberian Federal Universit. Mathematics and Physics. 2024. Т. 17. № 1. С. 27.