

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСА АЛМАЗНЫХ БУРОВЫХ ДОЛОТ. 6. ТЕРМОУПРУГОЕ СОСТОЯНИЕ

¹Н.А.Бондаренко, ²А.Н.Жуковский, ¹В.А.Мечник

¹Институт сверхтвердых материалов им. В.Н.Бакуля НАН Украины,
г. Киев, ул. Автозаводская, 2, тел. (044) 4675625, e-mail: bond@ism.kiev.ua

²Институт математики НАН Украины, г.Киев, ул. Терещенковская, 3, тел. (044) 2346322

Решена осесимметричная задача термоупругости для сферического алмазного долота в условиях бурения скважин. Особенностью этой задачи является то, что сами напряжения зависят от температуры нелинейно, а условия равновесия включают компоненты вектора объемной силы. Решение задачи получено в виде рядов по полиномам Лежандра и сферическим функциям, позволяет определить компоненты квазистатических термоупругих напряжений в произвольный момент времени и проанализировать основные факторы, влияющие на кинетику данного процесса.

The axisymmetric problem of thermoelasticity for spherical diamond bit in hole drilling conditions is solved. The peculiarity of the problem is in that stresses themselves depend on temperature nonlinearly but the equilibrium conditions include the components of volume force vector. The problem solution is represented in terms of Legendre polynomials and spherical functions which enables to define the components of quasi-static thermoelastic stresses at a random point of time and to analyze the main factors influencing on kinetics of the given process.

1. Актуальность. Решение задачи механики контактного взаимодействия двухслойных полусферических тел с упругим полупространством с учетом тепловыделения от трения представляет интерес в технологии изготовления буровых долот при назначении физических свойств сверхтвердых композиционных алмазосодержащих материалов (СКАМ) и для прогнозирования их работоспособности. В работах [1-4] построены математические модели для определения нестационарных температурных полей и износа для полусферического тела с покрытием, которое приближенно моделирует работу алмазного долота.

Не останавливаясь на роли и важности результатов работ [1-4] отметим, что для анализа прочности, термостойкости и правильной эксплуатации алмазных буровых долот имеет важное значение термоупругое состояние, которое существенно зависит как от внешних нагрузок, так и распределения температуры в алмазосодержащем слое. Температурные напряжения способствуют образованию пластических деформаций, приводящих к потере прочностных свойств СКАМ и преждевременному изнашиванию бурового долота. В настоящее время влияние этих факторов на работу такого инструмента изучено недостаточно. Это связано, главным образом, из-за сложности учета в исходных уравнениях и граничных условиях физико-механических свойств как СКАМ, так и горной породы, а также специфической формы долота и условий его контакта с породой. В этом случае задачу теплопроводности нельзя рассматривать изолированно от забоя потому, что тепловой поток распределяется как в инструмент, так и в породу. В результате необходимо решать нелинейную задачу связанной термоупругости, когда термоупругие напряжения являются источниками теплового потока. Для

получения ее аналитического решения необходимо сделать ряд разумных упрощений.

В настоящей работе, которая является продолжением [1-4], сформулирована и решена связанная контактная задача термоупругости для внедренного в упругое полупространство полусферического тела с алмазосодержащим покрытием, которое приближенно моделирует работу алмазного долота.

2. Физические предпосылки и математическая постановка задачи. Пусть в упругое полупространство (горную породу) вдавливается вращающееся вокруг оси Z с постоянной угловой скоростью ω долото в виде половины двухслойного шара с силой P , которая приложена по оси симметрии.

Сферическое долото, находящееся в контакте с горной породой под нагрузкой (рис. 1)

$$\Omega_1 = \{(r, \theta, \varphi) \mid r \in [0; r_2]\}$$

$$\theta \in \left[0; \frac{\pi}{2}\right]; \varphi \in [0; 2\pi];$$

рассматриваем в сферической системе координат: $x = r \sin \theta \cdot \cos \varphi$; $y = r \sin \theta \cdot \sin \varphi$; $z = r \cos \theta$.

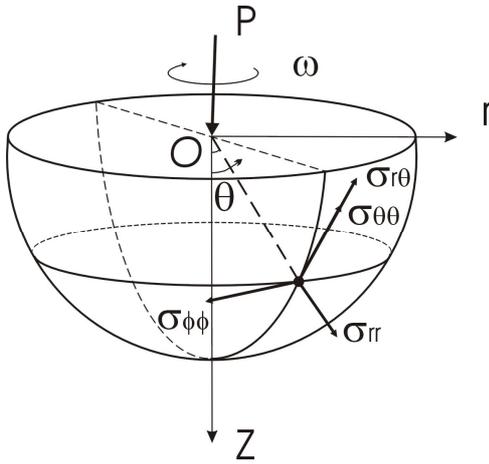
Условия рассматриваем симметричными вокруг оси Z т.е. независимыми от угла φ . В области контакта имеем радиальные $\sigma_{rr}(r_2, \theta, t)$ и касательные $\sigma_{r\theta}(r_2, \theta, t)$ составляющие общих термоупругих напряжений, которые связаны между собой законом Кулона:

$$\sigma_{r\theta}(r_2, \theta, t) = k \sigma_{rr}(r_2, \theta, t), \quad (1)$$

где k – коэффициент трения (скольжения).

Контактное давление $\sigma_{r\theta}(r_2, \theta, t)$ совершает в единицу времени работу:

$$\begin{aligned} Q(\theta, t) &= \omega r_2 \sigma_{r\theta}(r_2, \theta, t) = \\ &= \omega r_2 k \sigma_{rr}(r_2, \theta, t), \end{aligned} \quad (2)$$



г, θ, φ – сферические координаты; P – вертикальная нагрузка; ω – скорость вращения; σ_{rr} , $\sigma_{r\theta}$, $\sigma_{\theta\theta}$ и $\sigma_{\phi\phi}$ – компоненты общин термоупругих напряжений; $\mu = \cos \theta$.

Рисунок 1 — Схема контакта алмазного долота с породой

подавляющая часть которой идет на теплообразование и нагревание покрытия.

Для определения температуры и термоупругих напряжений в области контакта необходимо решить связанную осесимметричную задачу термоупругости для сферического долота:

$$\frac{1}{\chi_i} \frac{\partial T_i}{\partial t} = \Delta T_i, \quad t > 0, \quad (3)$$

$$T_H(\theta, t) = T_1(r_2, \theta, t) = T_2(r_2, \theta, t), \quad \theta \in \left[0; \frac{\pi}{2}\right]; \quad (4)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} - \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=r_2} = \alpha(T_H(\theta, t) - T_{жс}) + Q(\theta, t), \quad \theta \in \left[0; \frac{\pi}{2}\right]; \quad (5)$$

$$\frac{\partial T_i}{\partial \theta} = 0, \quad \theta = \frac{\pi}{2}, \quad r \in [0; +\infty]; \quad (6)$$

$$T_i(r, \theta, 0) = T_0; \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{r\phi} &= 0; \quad \sigma_{\theta\phi} = 0; \\ \sigma_{rr} &= \bar{\sigma}_{rr} + \bar{\bar{\sigma}}_{rr}; \quad \sigma_{\theta\theta} = \bar{\sigma}_{\theta\theta} + \bar{\bar{\sigma}}_{\theta\theta}; \\ \sigma_{\phi\phi} &= \bar{\sigma}_{\phi\phi} + \bar{\bar{\sigma}}_{\phi\phi}; \\ \sigma_{r\theta} &= \bar{\sigma}_{r\theta} + \bar{\bar{\sigma}}_{r\theta}; \quad \varepsilon_{kj} = \bar{\varepsilon}_{kj} + \bar{\bar{\varepsilon}}_{kj}. \end{aligned} \quad (8)$$

Здесь $i = 1$ относится к долоту, а $i = 2$ к горной породе, в которой находится долото:

$$\Omega_2 = \left\{ (r, \theta) \mid r \in [r_2; +\infty]; \theta \in \left[0; \frac{\pi}{2}\right] \right\};$$

$\bar{\sigma}_{kj}, \bar{\varepsilon}_{kj}$ – напряжения и деформации соответственно, связанные с изменением температуры и выражаются с помощью термоупругого потенциала Φ :

$$\Delta \Phi = \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha_T (T - T_{жс}). \quad (9)$$

Уравнения равновесия для вращающегося долота имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\sigma}_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial \bar{\sigma}_{r\theta}}{\partial \theta} + 2\bar{\sigma}_{rr} - \bar{\sigma}_{\theta\theta} - \bar{\sigma}_{\phi\phi} + \bar{\sigma}_{r\theta} \operatorname{ctg} \theta \right) + \\ + \gamma \omega^2 r \sin^2 \theta = 0; \\ \frac{\partial \bar{\sigma}_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial \bar{\sigma}_{\theta\theta}}{\partial \theta} + (\bar{\sigma}_{\theta\theta} - \bar{\sigma}_{\phi\phi}) \times \right. \\ \left. \times \operatorname{ctg} \theta + 3\bar{\sigma}_{r\theta} \right) + \\ + \gamma \omega^2 r \sin \theta \cos \theta = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Соотношения для деформаций:

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}_{rr} &= \frac{\partial u_r}{\partial r}; \quad \bar{\varepsilon}_{\theta\theta} = \frac{1}{r} \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + u_r \right); \\ \bar{\varepsilon}_{\phi\phi} &= \frac{1}{r} (u_r + \operatorname{ctg} \theta \cdot u_\theta); \end{aligned} \quad (11)$$

$$\bar{\varepsilon}_{r\theta} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \frac{u_\theta}{r} + \frac{\partial u_\theta}{\partial r} \right);$$

$$\bar{\varepsilon}_{r\phi} = \bar{\varepsilon}_{\theta\phi} = 0,$$

где u_r, u_θ – компоненты вектора перемещений.

Уравнения для напряжений имеют вид:

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_{rr} &= \frac{E}{1+\nu} \left(\bar{\varepsilon}_{rr} + \frac{\nu}{1-2\nu} e \right); \\ \bar{\sigma}_{\theta\theta} &= \frac{E}{1+\nu} \left(\bar{\varepsilon}_{\theta\theta} + \frac{\nu}{1-2\nu} e \right); \\ \bar{\sigma}_{\phi\phi} &= \frac{E}{1+\nu} \left(\bar{\varepsilon}_{\phi\phi} + \frac{\nu}{1-2\nu} e \right); \\ \bar{\sigma}_{r\theta} &= \frac{E}{1+\nu} \bar{\varepsilon}_{r\theta}; \quad \bar{\sigma}_{r\phi} = 0; \quad \bar{\sigma}_{\theta\phi} = 0, \end{aligned} \quad (12)$$

где: E – модуль упругости; ν – коэффициент Пуассона материала покрытия,

$$e = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 u_r) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (u_\theta \sin \theta); \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \Delta = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right) + \\ + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} \right). \end{aligned} \quad (14)$$

3. Решение задачи. Для решения температурного поля и термоупругого состояния алмазного долота рассматриваем установившийся режим, который более всего подходит к исследованию таких инструментов.

После замены:

$$\rho = \frac{r}{r_2}; \mu = \cos \theta; \quad (15)$$

$$u_i(\rho, \mu) = \frac{T_i(\rho, \mu) - T_{жс}}{T_k - T_{жс}},$$

для установившегося режима получим следующую задачу для определения температурных полей:

$$\frac{1}{\rho^2} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho^2 \frac{\partial u_i}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial}{\partial \mu} \times \quad (16)$$

$$\times \left((1 - \mu^2) \frac{\partial u_i}{\partial \mu} \right) = 0, i = 1, 2;$$

$$u_1(1, \mu) = u_2(1, \mu) = u_*(\mu), \quad (17)$$

$$\mu \in [0; 1]$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial \rho} - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \frac{\partial u_1}{\partial \rho} \Big|_{\rho=1} = hu_*(\mu) + \quad (18)$$

$$+ q_0 \sigma_{rr}(1, \mu),$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial \mu} = 0, \quad \mu = 0, \quad \rho \in [0; +\infty], \quad (19)$$

где

$$h = \frac{\alpha r_2}{\lambda_2}; q_0 = \frac{\omega r_2^2 k}{\lambda_2 (T_k - T_{жс})}. \quad (20)$$

Применяем к этой задаче конечное четное преобразование Лежандра по переменной μ :

$$\bar{u}_{i,2n}(\rho) = \int_0^1 u_i(\rho, \mu) P_{2n}(\mu) d\mu \quad (21)$$

с формулой обращения:

$$u_i(\rho, \mu) = \sum_{n=0}^{\infty} (4n + 1) \bar{u}_{i,2n}(\rho) P_{2n}(\mu). \quad (22)$$

В результате имеем вспомогательную задачу:

$$\frac{d^2 \bar{U}_{i,2n}}{d\rho^2} + \frac{2}{\rho} \frac{d\bar{U}_{i,2n}}{d\rho} - \quad (23)$$

$$- \frac{2n(2n+1)}{\rho^2} \bar{U}_{i,2n} = 0, \quad i = 1, 2;$$

$$\bar{U}_{1,2n}(1) = \bar{U}_{2,2n}(1) = \bar{U}_* \quad (24)$$

$$\frac{d\bar{U}_{2,2n}}{d\rho} - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \frac{d\bar{U}_{1,2n}}{d\rho} = \quad (25)$$

$$= h\bar{U}_* + q_0 b_{2n}, \rho = 1,$$

где

$$b_{2n} = \int_0^1 \sigma_{rr}(1, \mu) \cdot P_{2n}(\mu) d\mu. \quad (26)$$

Решение уравнения (23) представим в виде:

$$\bar{U}_{1,2n}(\rho) = A_{2n} \rho^{2n}, \rho \in [0; 1], \quad (27)$$

$$\bar{U}_{2,2n}(\rho) = B_{2n} \rho^{-(2n+1)}, \rho \in [1; +\infty]. \quad (28)$$

где коэффициенты A_{2n} и B_{2n} находим из условий (24) – (25):

$$\begin{cases} A_{2n} = B_{2n}; \\ -(2n+1)B_{2n} - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} 2nA_{2n} = hA_{2n} + q_0 b_{2n}, \end{cases} \quad (29)$$

откуда

$$A_{2n} = - \frac{q_0 b_{2n}}{2n+1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} 2n + h}. \quad (30)$$

Тогда решение температурного поля в алмазном долоте имеет вид:

$$U_1(\rho, \mu) = - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{q_0 (4n+1) \cdot b_{2n} \cdot P_{2n}(\mu) \rho^{2n}}{2n \left(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right) + h + 1}. \quad (31)$$

Для определения термоупругого потенциала $\Phi(\rho, \mu)$ имеем уравнение [5]:

$$\frac{1}{\rho^2} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho^2 \frac{\partial \Phi}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial}{\partial \mu} \times \left((1 - \mu^2) \frac{\partial \Phi}{\partial \mu} \right) = \quad (32)$$

$$= \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha_T r_2^2 (T_k - T_{жс}) U_1(\rho, \mu),$$

где α_T – линейный коэффициент температурного расширения.

Частное решение уравнения (32) ищем в виде:

$$\tilde{\Phi}(\rho, \mu) = \sum_{n=0}^{\infty} f_{2n}(\rho) P_{2n}(\mu). \quad (33)$$

Подставляя (33) в (32), получим выражение для определения термоупругого потенциала:

$$\tilde{\Phi}(\rho, \mu) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha_T (T_k - T_{жс}) \times \quad (34)$$

$$\times r_2^2 A_{2n} \frac{4n+1}{2(4n+3)} \rho^{2n+2} \cdot P_{2n}(\mu)$$

Окончательные выражения для определения температурных и упругих напряжений имеют вид:

$$\bar{\sigma}_{rr} = \frac{E}{(1+\nu)r_2^2} \left(\frac{\partial^2 \tilde{\Phi}}{\partial \rho^2} - \Delta \tilde{\Phi} \right) = \quad (35)$$

$$= \frac{E}{1-\nu} \alpha_T \times (T_k - T_{жс}) \sum_{n=1}^{\infty} A_{2n} \times$$

$$\times \frac{(4n+1)(4n^2 - 2n - 4)}{4n+3} \rho^{2n} P_{2n}(\mu);$$

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_{\theta\theta} &= \frac{E}{(1+\nu)r_2^2} \times \\ &\times \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 \tilde{\Phi}}{\partial \theta^2} - \Delta \tilde{\Phi} \right) = \\ &= -\frac{E}{(1-\nu)} \alpha_T (T_k - T_{жс}) \sum_{n=1}^{\infty} A_{2n} \frac{(4n+1)}{4n+3} \times \\ &\times \rho^{2n} \left((2n+2)^2 P_{2n}(\mu) - \mu \frac{dP_{2n}}{d\mu} \right); \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_{\varphi\varphi} &= \frac{E}{(1+\nu)r_2^2} \times \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \mu \frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial \mu} - \Delta \tilde{\Phi} \right) = \\ &= -\frac{E}{(1+\nu)} \alpha_T (T_k - T_{жс}) \sum_{n=1}^{\infty} A_{2n} \times \frac{4n+1}{4n+3} \rho^{2n} \times \\ &\times \left((6n+4)P_{2n}(\mu) + \mu \frac{dP_{2n}}{d\mu} \right); \end{aligned} \quad (37)$$

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_{r\varphi} &= \frac{E}{2(1+\nu)r_2^2} \times \\ &\times \left[\frac{\partial}{\partial \rho} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial^2 \tilde{\Phi}}{\partial \rho \partial \theta} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial \theta} \right) \right] = \\ &= \frac{E}{2(1+\nu)} \alpha_T (T_k - T_{жс}) \times \\ &\times \sum_{n=1}^{\infty} A_{2n} \frac{4n+1}{4n+3} \rho^{2n} (2n+1) \times \sqrt{1-\mu^2} \frac{dP_{2n}}{d\mu}. \end{aligned} \quad (38)$$

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_{rr} &= \frac{E}{1+\nu} \sum_{n=0}^{\infty} [c_{2n} 2n(2n-1) \times \\ &\times (\rho r_2)^{2n-2} + d_{2n} (2n+1) \times \\ &\times (4n^2 - 2n - 2 - 2\nu) \times (\rho r_2)^{2n}] P_{2n}(\mu); \end{aligned} \quad (39)$$

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_{\theta\theta} &= -\frac{E}{1+\nu} \times \sum_{n=0}^{\infty} \{ c_{2n} (4n^2 P_{2n}(\mu) - \mu P'_{2n}(\mu)) \times \\ &\times (\rho r_2)^{2n-2} + d_{2n} [(2n+1) \times \\ &\times (4n^2 + 8n + 2 + 2\nu) P_{2n}(\mu) - \\ &- (2n+5-4\nu) \mu P_{2n}(\mu)] (\rho r_2)^{2n} \}; \end{aligned} \quad (40)$$

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_{\varphi\varphi} &= \gamma \omega^2 r^2 (1-\mu^2) + \frac{E}{1+\nu} \times \\ &\times \sum_{n=0}^{\infty} \{ c_{2n} (2n P_{2n}(\mu) - \mu P'_{2n}(\mu)) \times \\ &\times (\rho r_2)^{2n-2} + d_{2n} [(2n+1) \times (2n-2-2\nu-8n\nu) \times \\ &\times P_{2n}(\mu) - (2n+5-4\nu) \times \mu P'_{2n}(\mu)] (\rho r_2)^{2n} \}. \end{aligned} \quad (41)$$

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_{r\theta} &= -\frac{E}{1+\nu} \times \sum_{n=0}^{\infty} [c_{2n} (2n-1) (\rho r_2)^{2n-2} + \\ &+ d_{2n} (4n^2 + 4n - 1 + 2\nu) \times (\rho r_2)^{2n}] \times \\ &\times \sqrt{1-\mu^2} P'_{2n}(\mu). \end{aligned} \quad (42)$$

Проектируя внешние и внутренние упругие силы по направлению оси Z получим следующие интегральные уравнения:

$$\begin{aligned} P &= \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\frac{\pi}{2}} (\sigma_{rr} \cos \theta - \sigma_{r\theta} \sin \theta) \times r_2^2 \sin \theta d\theta = \\ &= 2\pi r_2^2 \int_{-1}^0 (\mu \sigma_{rr} - \sqrt{1-\mu^2} \sigma_{r\theta}) d\mu; \end{aligned} \quad (43)$$

а на поверхности долота:

$$\int_{-1}^0 [\sigma_{r\theta}(r_2, \mu) - k \sigma_{rr}(r_2, \mu)] d\mu = 0. \quad (44)$$

Полученные выражения (35) – (42) и (8) позволяют определить составляющие температурных и общих термоупругих напряжений в алмазном долоте при бурении нефтяной или газовой скважины. Подставляя (8) в (43) – (44) и (30) получим систему уравнений для определения неизвестных коэффициентов c_{2n} , d_{2n} и A_{2n} , где в соотношении для A_{2n} , входит параметр

$$\begin{aligned} b_{2n} &= \frac{1}{4n+1} [c_{2n} 2n(2n-1) r_2^{2n-2} + \\ &+ d_{2n} (2n+1) (4n^2 - 2n - 2 - 2\nu) r_2^{2n}] \end{aligned}$$

Для решения этой системы удобно использовать итерационный метод: найдя на i -том шаге $c_{2n}^{(i)}$, $d_{2n}^{(i)}$ определяем по уравнению (30) коэффициент $A_{2n}^{(i+1)}$, потом из соотношений (43) – (44) находим $c_{2n}^{(i+1)}$, $d_{2n}^{(i+1)}$. На начальном этапе принимаем $c_{2n}^{(0)} = d_{2n}^{(0)} = 0$. Процесс заканчивается при условии

$$\begin{aligned} |c_{2n}^{(i+1)} - c_{2n}^{(i)}| &\leq \varepsilon; \quad |d_{2n}^{(i+1)} - d_{2n}^{(i)}| \leq \varepsilon; \\ |A_{2n}^{(i+1)} - A_{2n}^{(i)}| &\leq \varepsilon, \quad \text{где } \varepsilon \sim 10^{-4}. \end{aligned}$$

4. Анализ результатов. Для реализации изложенного решения были проведены расчеты термоупругого состояния алмазного долота ИСМ – 214,3 Т в процессе бурения кварцевого песчаника при следующем варьировании исходных данных.

Сверхтвердый композиционный алмазосодержащий материал (покрытие): толщина алмазосодержащего слоя до износа $h_a = 3$ мм; коэффициенты теплопроводности материала композита λ_2 и корпуса долота (сталь) λ_1 (Вт/(м·К)) 120 и 40 соответственно; относительная концентрация алмазов $K = 100$ (что соответствует 4,4 карат алмазов на 1 см³ шихты); зернистость ал-

мазов $z = 800/630$ мкм; относительное значение коэффициента теплообмена α (кВт/(м²·К)) 0,5 – 3,5; угловая координата θ (градус) 10 – 80; контактные давления p (МПа) 1 – 80; линейная скорость скольжения v (м/с) 2,5 – 5; время бурения t (с) 1000; плотности композита ρ_2 и корпуса долота ρ_1 (Г/см³) 14,4 и 1,8 соответственно; модуль Юнга $E = 640$ ГПа; предел прочности при сжатии $\sigma = 5,6$ МПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0,22$; коэффициент линейного расширения $\alpha_T = 7,6 \cdot 10^{-10}$ К⁻¹.

Кварцевый песчаник: $E = 0,47$ МПа; $\sigma = 1,45$ МПа; $\nu = 0,25$; $\rho = 2,543$ Г/см³; $\lambda = 2,2$ Вт/(м·К).

На рис. 2 приведены зависимости радиальных температурных напряжений $\bar{\sigma}_{rr}$ от радиальной координаты ρ при бурении кварцевого песчаника алмазным долотом ИСМ – 214,3 Т для разных значений угловой скорости ω и угловой координаты θ , которые вычислены по формуле 35.

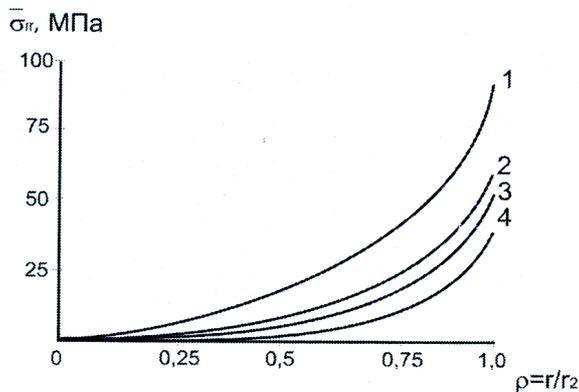


Рисунок 2 – Зависимости радиальных температурных напряжений $\bar{\sigma}_{rr}$ при бурении кварцевого песчаника алмазным долотом ИСМ–214,3 Т от радиальной координаты ρ для $\lambda_2 = 120$ Вт/(м·К); $\lambda_1 = 40$ Вт/(м·К); $\alpha_1 = 1,5$ кВт/(м²·К); $P = 12000$ кг; $K = 100$; $z = 800/630$ мкм и угловой скорости ω (с⁻¹): 6 (1) при $\theta = 36^\circ$; 4 (2), $\theta = 36^\circ$; 6 (3), $\theta = 0^\circ$; 4 (4), $\theta = 0^\circ$

Их анализ показывает, что максимальные значения $\bar{\sigma}_{rr}$ достигаются на границе контакта рабочая поверхность долота – горная порода, они существенно зависят от скорости вращения ω и координаты θ . При увеличении этих параметров происходит увеличение теплового потока и соответственно $\bar{\sigma}_{rr}$. Тангенциальные $\bar{\sigma}_{r\theta}$ и касательные $\bar{\sigma}_{r\theta}$ составляющие температурных напряжений также существенно зависят от координат ρ и θ (рис. 3, а, б). Их максимальные значения при бурении кварцевого песчаника достигаются на границе контакта долото – порода.

В отличие от $\bar{\sigma}_{rr}$ они имеют меньшие значения и отличаются характером распределения по угловой координате θ . Наименьшие значения $\bar{\sigma}_{\theta\theta}$ и $\bar{\sigma}_{r\theta}$ достигаются при $\mu = \cos \theta = 0,5$ (см. рис. 3, а и 3, б соответственно). Они суще-

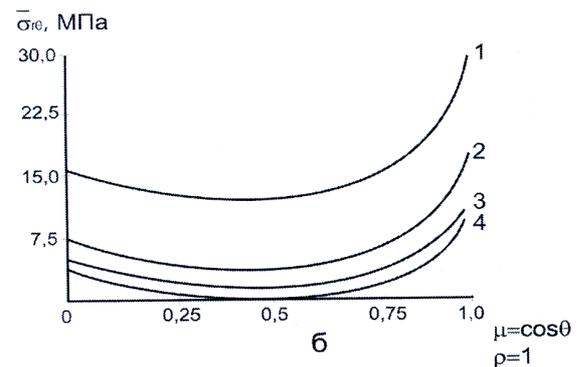
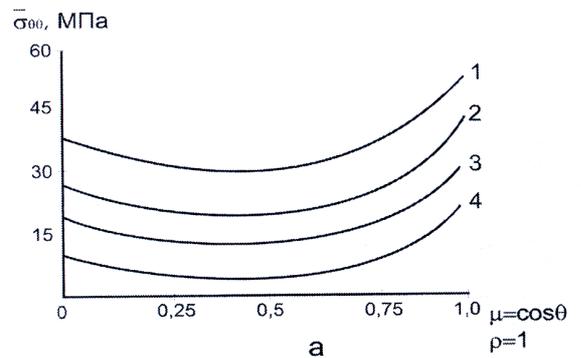


Рисунок 3 – Зависимости тангенциальных $\bar{\sigma}_{\theta\theta}$ (а) и касательных $\bar{\sigma}_{r\theta}$ (б) составляющих температурных напряжений от угловой координаты θ при бурении кварцевого песчаника для $\rho = 1$ и тех же условий, что и на рис. 2

ственно зависят от угловой скорости ω , вертикальной нагрузки P , относительного значения коэффициента теплообмена α_1 . Так, например, при увеличении α_1 от 1,5 кВт/(м²·К) до 3,5 кВт/(м²·К) $\bar{\sigma}_{\theta\theta}$ и $\bar{\sigma}_{r\theta}$ уменьшаются более чем в 2 раза для всех изучаемых условий бурения (рис. 4, а, б).

Для общих термоупругих напряжений σ_{ij} сохраняются в принципе те же тенденции, что и для температурных $\bar{\sigma}_{ij}$, хотя и есть существенные отличия. Радиальные σ_{rr} и касательные $\sigma_{r\theta}$ составляющие термоупругих напряжений всегда являются сжимающими для всех условий бурения (рис. 5, а, б), а тангенциальные $\sigma_{\theta\theta}$ могут менять знак (рис. 5, в). Они, как и температурные напряжения $\bar{\sigma}_{ij}$ существенно зависят от угловой θ и радиальной ρ координат, вертикальной нагрузки P и скорости ω . Максимальные значения общин радиальных термоупругих напряжений σ_{rr} и касательные $\sigma_{r\theta}$ достигаются на рабочей поверхности долота при $\theta = 18^\circ$ и $\theta = 90^\circ$ (см. рис. 5, а и 5, б соответственно), однако $\sigma_{r\theta}$ имеют меньшие величины относительно σ_{rr} . В отличие от σ_{rr} и $\sigma_{r\theta}$ общие тангенциальные напряжения $\sigma_{\theta\theta}$ на рабочей поверхности долота при $\theta = 18^\circ$ имеют наименьшие значения (см. рис. 5, в) и при увеличении θ они линейно возрастают и достигают максимальных значений при $\theta = 90^\circ$.

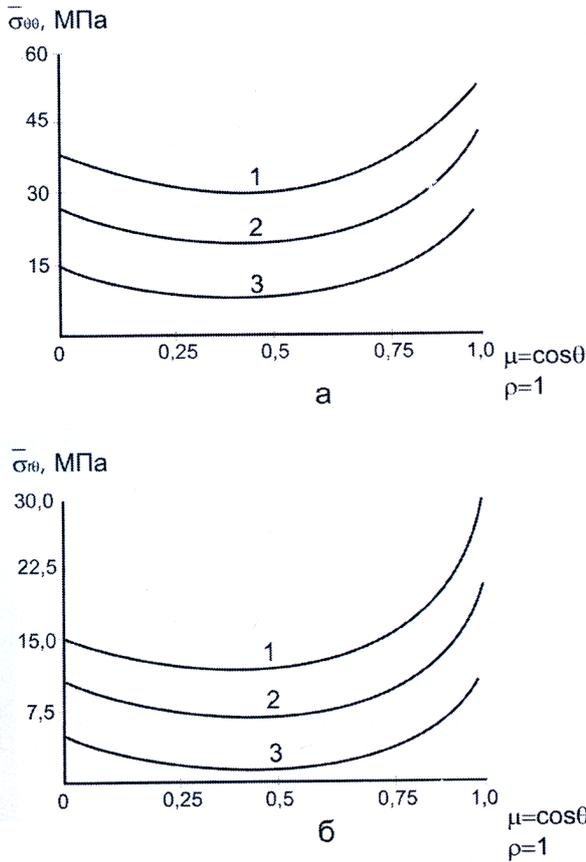


Рисунок 4 – Зависимости тангенциальных $\bar{\sigma}_{\theta\theta}$ (а) и касательных $\bar{\sigma}_{r\theta}$ (б) составляющих температурных напряжений при бурении кварцевого песчаника долотом ИСМ–214,3 Т при значениях коэффициента теплообмена α_1 (кВт/(м²·К)): 1 – 1,5; 2 – 2,5 и 3 – 3,5 для $P = 12000$ кг, $\omega = 6$ с⁻¹, $\rho = 1$, $\lambda_2 = 120$ Вт/(м·К) и $\lambda_1 = 40$ Вт/(м·К)

Продолжая обсуждать термоупругое состояние алмазного долота отметим, что при бурении песчаника общие термоупругие напряжения σ_{ij} имеют большие значения, чем при бурении гранита (см. рис. 5, кривые 2 и 1 соответственно). Это связано с тем, что абразивные характеристики кварцевого песчаника превышают аналогичные свойства гранита. В результате чего при бурении песчаника возникают тепловые потоки, которые приводят к увеличению контактных температур и термонапряжений, что еще раз указывает высокие требования к упругим характеристикам материала матрицы композита и условия охлаждения.

На основании проведенных исследований сделаем следующие выводы:

1. Решена осесимметричная задача термоупругости для сферического алмазного долота в процессе бурения скважины. Особенностью этого решения является то, что сами напряжения зависят от температуры нелинейно, а условия равновесия включают компоненты вектора объемной силы. Решение задачи получено в виде рядов по полиномам Лежандра и сферическим функциям.

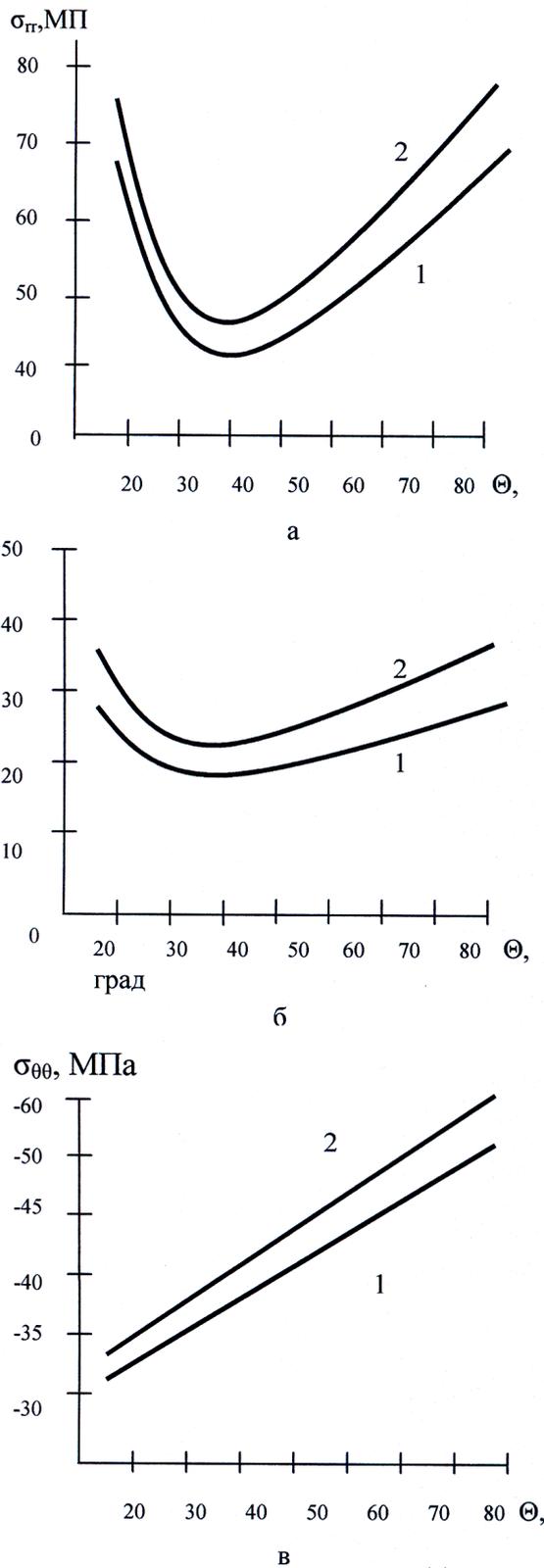


Рисунок 5 – Зависимости радиальных (а), касательных (б) и тангенциальных (в) составляющих общих термоупругих напряжений от угловой координаты θ при бурении гранита (1) и кварцевого песчаника (2) алмазным долотом ИСМ–214,3 для: $\rho = 1$; $\omega = 6$ с⁻¹; $P = 12000$ кг; $\alpha_1 = 1,5$ кВт/(м²·К); $\lambda_2 = 120$ Вт/(м·К); $\lambda_1 = 40$ Вт/(м·К); $K = 100$ и $z = 800/630$ мкм

2. Установлено, что максимальные значения радиальных температурных $\bar{\sigma}_{rr}$, тангенциальных $\bar{\sigma}_{\theta\theta}$ и касательных $\bar{\sigma}_{r\theta}$ напряжений при бурении абразивных горных пород алмазным долотом достигаются на границе контакта инструмент – порода, они существенно зависят от радиальной и угловой координат профиля и скорости вращения.

3. Показано, что при увеличении относительного значения коэффициента теплообмена α_1 от 1,5 до 3,5 кВт/(м²·К) все составляющие температурных напряжений уменьшаются более чем в 2 раза.

4. Общие термоупругие напряжения σ_{ij} существенно зависят от угловой и радиальной координат и отличаются от $\bar{\sigma}_{ij}$. Максимальные значения σ_{rr} и $\sigma_{r\theta}$ достигаются на рабочей поверхности долота при $\theta = 18^\circ$ и 90° , а тангенциальные напряжения $\sigma_{\theta\theta}$ при $\theta = 18^\circ$ имеют наименьшие значения и при увеличении θ они возрастают.

5. Полученные результаты имеют научное и прикладное значение для технологии изготовления алмазных буровых долот и могут быть использованы для решения задачи изнашивания таких инструментов.

Литература

1 Бондаренко Н.А., Жуковский А.Н., Мечник В.А. Исследование износа алмазных буровых долот. 2. Нестационарная задача теплопроводности для алмазного бурового долота в процессе его работы // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2006. – № 2 (19). – С. 54–58.

2 Бондаренко Н.А., Жуковский А.Н., Мечник В.А. Исследование износа алмазных буровых долот. 3. Анализ температурных полей // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2006. – № 3 (20). – С. 87-90.

3 Бондаренко Н.А., Жуковский А.Н., Мечник В.А. Исследование износа алмазных буровых долот. 4. Уравнение изнашивания // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2006. – №4(21). – С.16-19.

4 Бондаренко Н.А., Жуковский А.Н., Мечник В.А. Исследование износа алмазных буровых долот. 5. Кинетика износа // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2007. – № 1(22). – С.34-37

5 Коваленко А.Д. Основы термоупругости. – Киев: Наук. думка, 1970. – 307 с.

УДК 622.24.051

ПРО РЕЗЕРВИ КОМПЛЕКСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ ТРИШАРОШКОВОГО ДОЛОТА ДЛЯ НИЗЬКООБЕРТОВОГО БУРІННЯ

Я.М. Дрогомирецький, М.Й. Бурда, В.В. Татарин

ІФНТУНГ, 76019, Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 48241,
e-mail: zvd@nimg.edu.ua

Рассматриваются резервы возможных комплексных исследований относительно износостойкости элементов тришарошечного долота для низковращательного бурения с учетом конструктивных особенностей опор, существующих пар трения в опорах, а также технологических и эксплуатационных факторов, влияющих на износостойкость элементов тришарошечного долота.

Reserves of possible complex researches of three-cone bit's elements wearing for low-speed drilling taking into account bearings' constructional features, existing tribological situations in bearings and technological and operational factors that influence on three-cone bit's elements wearing are considered.

Вступ

В національній програмі “Нафта і газ України до 2010 року” значна увага приділяється питанню щодо паливно-енергетичного комплексу, розв’язок якого не можливий без пошукових робіт, буріння нових розвідувальних і експлуатаційних свердловин на нафту і газ як на суші, так і на шельфі. Незважаючи на постійне удосконалення техніки і технології буріння, витрати на буріння свердловин все ж залишаються високими. Ці витрати тісно пов’язані, зокрема із використанням різних типів породо-

руйнівного інструменту, його зносостійкістю та надійністю.

Буріння свердловин на Україні проводиться, в основному, тришарошковими долотами, частка яких складає близько 80 % всього об’єму буріння.

Дослідження тришарошечних доліт і режимів їх експлуатації при бурінні свердловин засвідчили, що найефективнішим при проведенні свердловин є низькообертівний режим.

Разом з тим, вказані резерви підвищення техніко-економічних показників роботи тришарошечних доліт при бурінні глибоких і надгли-