

Дослідження та методи аналізу

УДК 621.91.02:621

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСА АЛМАЗНЫХ БУРОВЫХ ДОЛОТ. 4. УРАВНЕНИЕ ИЗНАШИВАНИЯ

¹Н.А.Бондаренко, ²А.Н.Жуковский, ¹В.А.Мечник¹ Институт сверхтвердых материалов им. В.Н.Бакуля НАН Украины,
г. Киев, ул. Автозаводская, 2, тел. (044) 4675625, e-mail: bond@ism.kiev.ua² Институт математики НАН Украины, г. Киев, ул. Терещенковская, 3, (044) 2346322

Разработан подход для исследования кинетики изнашивания алмазного долота в условиях бурения скважины. Модель учитывает дифференциальное уравнение для абразивного износа, зависимость коэффициента износа от температуры, радиальные и касательные контактные напряжения и зависимость скорости скольжения от радиальной координаты. Окончательные выражения получены в явном виде, позволяют определить износ долота в произвольный момент времени и анализировать различные факторы, влияющие на кинетику данного процесса.

The approach for studying the kinetics of diamond drill bit wear in hole drilling conditions is developed. The model takes account of the differential equation for abrasive wear, the coefficient dependence upon temperature, radial and tangential thermoelastic stresses and sliding velocity. The final expressions are obtained in an explicit form, they enable 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 проблемы

Информация о кинетике изнашивания буровых инструментов для порошковой металлургии и материаловедения является ценным фактором для дальнейшего совершенствования и создания новых сверхтвердых композиционных алмазосодержащих материалов (СКАМ). Эта проблема имеет многочисленные аспекты – от конструкторско-технических, вопросов техники безопасности и охраны окружающей среды до чисто математических и вычислительных. Как уже было показано нами в предыдущих работах [1-4], в процессе бурения скважины породоразрушающие вставки из СКАМ необратимо изменяют свою форму по отношению к форме профиля долота. Это обуславливает изменение области контакта, градиентов температуры и напряжений, а также градиента механических свойств алмазосодержащего слоя композита и тем самым приводит к преждевременному изнашиванию бурового инструмента. Спрогнозировать износостойкость и долговечность таких инструментов в зависимости от физико-механических свойств алмазов и компонентов матрицы, химического состава композита, микрогео-

метрических характеристик алмазосодержащего слоя и конструктивных параметров профиля, технологических режимов бурения и условий охлаждения является одной из важнейших задач математической физики и теории изнашивания. При этом развитие этой проблемы имеет длинную историю и связано с именами классиков естествознания. Экспериментальный путь исследования этих проблем ограничен труднодоступностью зоны контакта инструмент – порода, требует использования дорогостоящего оборудования. Такие исследования проводятся на молекулярном уровне для контрольных образцов СКАМ с целью определения основного направления в улучшении их структуры и свойств. Поэтому необходимо разрабатывать новые подходы на основании аналитических методов, позволяющие детально исследовать кинетику изнашивания алмазных буровых инструментов и эффективность бурения. Они требуют привлечения математических моделей механики сплошных сред: теплопроводности, термоупругости и изнашивания. К особенностям такого моделирования следует отнести еще такие факторы:

1. Сложная геометрическая форма долота и условия его контакта с породой, а также интенсивное тепловыделение за счет трения требует построения специальных граничных условий для взаимосвязанной задачи термоупругости при наличии износа контактирующих тел.

2. Задачу теплопроводности нельзя рассматривать изолировано от забоя потому, что тепловой поток распределяется как в породе, так и в долото. В результате необходимо решать нелинейную контактную задачу связанной термоупругости, когда термоупругие напряжения являются источником теплового потока. Для того, чтобы получить аналитическое решение такой задачи необходимо приблизить форму долота к классическим (например, сферической, полусферическим и т. п.).

3. Буровое долото имеет неоднородную структуру: физико-механические свойства алмазосодержащего слоя существенно отличаются от аналогичных свойств твердосплавной матрицы и корпуса долота.

4. Буровое долото в процессе работы сильно нагревается за счет тепловыделения и охлаждается мощным потоком бурового раствора или жидкости.

Цель работы – получение зависимости износа алмазного долота в процессе бурения скважины с учетом тепловыделения от трения, физико-механических свойств алмазосодержащего слоя. Здесь используются выражения для определения температурных полей и контактных напряжений в алмазном долоте, которые получены нами в работах [2, 4].

2. Формулировка и физические обоснования проблемы

Для многих видов изнашивания сопряженной уравнение скорости износа от давления и скорости относительного скольжения имеет вид [5 – 7]

$$\frac{dW_i}{dt} = K_i p^{m_i}(x, y, t) v^{n_i}(x, y, t), \quad (1)$$

или

$$W_i(x, y, t) = \int_0^t K_i p^{m_i}(x, y, t) v^{n_i}(x, y, t) dt, \quad (2)$$

где: dW_i/dt – скорость изнашивания в произвольный момент времени t ; x и y – координаты точек поверхности; K_i – коэффициент износа, характеризующий материал контактирующей пары; m_i и n_i – параметры закона изнашивания; $p(x, y, t)$ и $v(x, y, t)$ – контактное давление и скорость относительного скольжения в данной точке (x, y) . Для абразивного износа показатели степени $m_i = n_i = 1$.

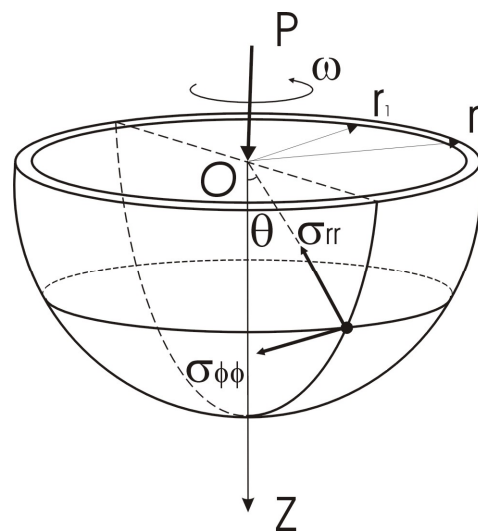
Вышеуказанные уравнения (1) и (2) являются основными при решении задач изнашивания. Безусловно для задачи изнашивания алмазного долота эти соотношения необходимо дополнить начальными и граничными условиями, а также условиями сопряжения на границе раз-

дел сред и привести их к возможности интегрирования.

Отметим, что на современном этапе конструирования буровых инструментов еще не существует решения контактной задачи термоупругости при наличии износа алмазного долота с полным отражением специфических особенностей СКМ и микрогеометрии контактирующих тел. При решении задачи с учетом износа и тепловыделения от трения долота при его работе интересно получить не только выражения, позволяющие определить износ в произвольный момент времени, но и выявить основные факторы, влияющие на кинетику данного процесса. Для этого сформулируем задачу таким образом.

Предположим, что в упругое полупространство вдавливаются с силой P долото в виде половины шара по оси симметрии, а на полусферическую поверхность долота, как и в работе [2], нанесено алмазосодержащее покрытие начальной толщины $h_a = r_2 - r_1$, которое жестко соединено с телом долота, механические и теплофизические свойства покрытия существенным образом отличаются от аналогичных свойств тела долота (стали). Долото вращается вокруг оси Oz с постоянной угловой скоростью ω , а область контакта с полупространством (горная порода) определим поверхностью (рис. 1)

$$\Omega = \left\{ (r, \theta, \varphi) \mid r \in [0; r_2]; \theta \in \left[0; \frac{\pi}{2} \right]; \varphi \in [0; 2\pi] \right\}.$$



P – вертикальная нагрузка; σ_{rr} и $\sigma_{\varphi\varphi}$ – контактные напряжения (радиальные и касательные соответственно); ω – угловая скорость вращения; $h_a = r_2 - r_1$ – толщина алмазосодержащего слоя; r, φ, θ – сферические координаты; $\mu = \cos \theta$.

Рисунок 1 — Схема контакта алмазное долото – порода в процессе бурения скважины

Условия рассматриваются симметричными относительно оси Oz , не зависящими от угла φ .

В области контакта $\Gamma = \left\{ (r, \varphi) \mid r = r_2; \theta \in \left[0; \frac{\pi}{2} \right] \right\}$

приложены нормальные $\sigma_{rr}(r_2, \theta, t)$ и касательные $\sigma_{\varphi\varphi}(r_2, \theta, t)$ контактные напряжения, которые связаны между собой законом Кулона

$$\sigma_{\varphi\varphi}(r, \theta, t) = k\sigma_{rr}(r_2, \theta, t), \quad (3)$$

где k – коэффициент трения (скольжения). Напряжениями $\sigma_{r\theta}(r_2, \theta, t)$ в области контакта пренебрегаем.

Контактное давление $\sigma_{\varphi\varphi}(r_2, \theta, t)$ совершают в единицу времени работу

$$A = \omega r_2 \sin \theta \sigma_{\varphi\varphi}(r_2, \theta, t) = \omega r_2 \sqrt{1 - \mu^2} \sigma_{\varphi\varphi} \times (r_2, \mu, t) = \omega r_2 \sqrt{1 - \mu^2} k \sigma_{rr}(r_2, \mu), \quad (4)$$

подавляющая часть которой идет на теплообразование.

В результате взаимодействия рабочей поверхности алмазного долота с породой и интенсивного тепловыделения происходит ее изнашивание. Перед тем как приступить к решению задачи изнашивания алмазного бурового долота отметим некоторые существенные, по нашему мнению, аспекты.

Известно, что ресурс работы алмазного бурового долота находится в пределах 200–400 часов и зависит прежде всего от физико-механических свойств сверхтвердого композита, абразивных свойств горной породы, технологических режимов бурения и условий охлаждения. Поскольку контактные температуры и напряжения при бурении прочных и абразивных пород, как уже было нами показано в работах [3, 4], быстро выходят на квазиустановившийся режим, то это позволяет считать, что основным видом изнашивания алмазного долота является абразивный. В этом случае коэффициент износа зависит от температуры, контактные давления представляются, как радиальные напряжения $\sigma_{rr}(r_2, \mu)$, а скорость скольжения зависит от угловой координаты θ .

На основании сказанного обобщенное дифференциальное уравнение скорости изнашивания для алмазного долота (1) в процессе бурения скважины принимает вид

$$\frac{dW_*}{dt} = K_i \sigma_{rr}(r_2, \mu) \omega r_2 \sqrt{1 - \mu^2}, \quad (5)$$

где K_i – коэффициент износа рабочей поверхности алмазного бурового долота, зависящий от контактной температуры.

Контактные напряжения $\sigma_{rr}(r_2, \mu)$ определяются по зависимости, установленной нами в работе [4]

$$\sigma_{rr}(r_2, \mu) = \frac{6k_1 P V_p}{100\pi d^2 N}, \quad (6)$$

где: P – вертикальная нагрузка на долото; V_p – объемная доля алмазов (в %) при относительной концентрации $K = 100$; $k_1 \approx 0,78$ – коэффициент, учитывающий долю тепла, поступающего в долото [8]; d – средний диаметр алмазного зерна; N – количество режущих алмазов на рабочей поверхности долота; ω – угловая скорость вращения.

Коэффициент износа K_i определяется в зависимости от контактной температуры соотношением

$$K_i = K_1 + K_2 T(r_2, \mu, t), \quad (7)$$

где: K_1 и K_2 – составляющие линейной зависимости коэффициента износа от температуры; r_2 – внешний радиус сферического долота (с учетом толщины алмазосодержащего слоя $h_a = r_2 - r_1$); $T(r_2, \mu, t)$ – температура на рабочей поверхности долота.

Для общего случая дифференциальное уравнение скорости износа алмазного бурового долота (5) можно проинтегрировать только численными методами потому, что имеем сложные зависимости температуры от времени в переходных условиях. Это важно для исследования работы инструмента на стадии приработки, где происходят нелинейные процессы. Ввиду того, что основной ресурс работы алмазного долота происходит на стационарном режиме, это дает возможность проинтегрировать уравнение (5).

3. Решение задачи

Интегрируя дифференциальное уравнение (5) с использованием линейной зависимости коэффициента износа от температуры (7), получаем следующее выражение для определения износа долота от времени бурения

$$W_* = (K_1 + K_2 T(r_2, \mu, t)) \sigma_{rr}(r_2, \mu) \times \omega r_2 \sqrt{1 - \mu^2} t, \quad (8)$$

где $T(r_2, \mu, t)$ – температура на рабочей поверхности долота, определяемая по решению, полученному нами в работе [2].

Полученное уравнение (8) показывает, что стойкость алмазного бурового долота существенно зависит от угловой координаты θ , при этом ее влияние зависит непосредственно как от контактной температурой $T(r_2, \mu, t)$, так и контактных напряжений $\sigma_{rr}(r_2, \mu)$, а также линейной скорости скольжения $v = \omega r_2 \sqrt{1 - \mu^2}$ рабочей поверхности инструмента. Это имеет принципиальное значение для технологии изготовления буровых долот и оснащения рабочей поверхности его сверхтвердыми композиционными алмазосодержащими материалами.

Для детального анализа изнашивания алмазных буровых долот мы провели исследования зависимости коэффициента износа породоразрушающих вставок алмаз – твердый сплав ВКБ от контактной температуры $T(r_2, \mu, t)$. На основании статистического анализа экспериментальных данных получено следующую зависимость коэффициента износа алмазного долота от контактной температуры:

$$K_i(T) = \begin{cases} K_0, & 0 \leq T \leq 350^\circ C \\ K_1 + K_2 T(r_2, \mu, t), & T > 350^\circ C \end{cases} \quad (9)$$

Коэффициенты K_0 , K_1 и K_2 находим методом наименьших квадратов с условия минимума функционала

$$J(K_1, K_2) = \sum_{i=1}^N (K_1 + K_2 T_i - K_i)^2, \quad (10)$$

где $K_i, i = \overline{1, N}$ экспериментально рассчитанные значения коэффициентов износа при температурах T_i .

Из условий

$$\frac{\partial J}{\partial K_1} = 0, \quad \frac{\partial J}{\partial K_2} = 0 \quad (11)$$

получаем следующую систему уравнений для вычисления коэффициентов K_1 и K_2 :

$$\begin{cases} K_i \frac{(N+1)}{2} N + K_2 \sum_{i=1}^N T_i = \sum_{i=1}^N K_i \\ K_i \sum_{i=1}^N T_i + K_2 \sum_{i=1}^N T_i^2 = \sum_{i=1}^N K_i T_i \end{cases} \quad (12)$$

Решение системы (12) выписываем в виде

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{K_0 M_2 - K_1 M_1}{M_0 M_1 - M_1^2}, \\ K_2 &= \frac{M_0 K_1 - M_1 K_0}{M_0 M_2 - M_1^2}, \end{aligned} \quad (13)$$

где:

$$\begin{aligned} M_0 &= \frac{N+1}{2} N; \quad M_1 = \sum_{i=1}^N T_i; \\ M_2 &= \sum_{i=1}^N T_i^2; \quad K_0 = \sum_{i=1}^N K_i; \quad K_1 = \sum_{i=1}^N K_i T_i. \end{aligned} \quad (14)$$

Таким образом, коэффициенты K_0, K_1 и K_2 имеют значения

$$\begin{aligned} K_0 &= 3,64741 \cdot 10^{-21} \text{ м}^2/\text{Н}, \\ K_1 &= 5,49318 \cdot 10^{-21} \text{ м}^2/\text{Н}, \\ K_2 &= 3,64847 \cdot 10^{-23} \text{ м}^2/(\text{Н} \cdot \text{градус}), \end{aligned}$$

при этом относительная погрешность такого представления не превышает 5%.

Связь между линейным и объемным коэффициентами износа имеет вид

$$K_{i,лин} \approx \frac{K_{i,об}}{2\pi r_2 h_a}, \quad (15)$$

Окончательное уравнение изнашивания алмазного долота в процессе бурения нефтяных или газовых скважин имеет вид

$$\begin{aligned} W_* &= \int_0^t K_1 + K_2 T(r_2, \mu, t) \sigma_{rr}(r_2, \mu) \omega r_2 \times \\ &\times \sqrt{1 - \mu^2} dt = \sigma_{rr}(r_2, \mu) \omega r_2 \sqrt{1 - \mu^2} \times \\ &\times \left(K_1 t + K_2 \int_0^t T(r_2, \mu, t) dt \right). \end{aligned} \quad (16)$$

Таким образом W_* меняется в зависимости от времени, нагрузки, объемной доли алмазов в композиционном материале, количества режущих алмазов на рабочей поверхности инструмента и их среднего диаметра (зернистости), контактной температуры, теплофизических ха-

рактеристик композитов и долота, угловой скорости вращения, радиальной и угловой координат профиля, относительного значения коэффициента теплообмена.