

УДК 621.91.02:621

Н. А. Бондаренко, докт. техн. наук¹; **А. Н. Жуковский**, канд. физ.-мат. наук²;
В. А. Мечник, канд. техн. наук¹; **М. В. Супрун**,
Д. Л. Коростышевский, инженеры¹

¹Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев, Украина,

²Институт математики НАН Украины, г. Киев, Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНОСА АЛМАЗНОГО БУРОВОГО ДОЛОТА

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.

Актуальность

Перспектива создания буровых долот из сверхтвердых композиционных алмазосодержащих материалов (СКАМ), расширения областей их использования требует глубокого исследования процессов, происходящих при изнашивании и определения преобладающих факторов, влияющих на их протекание. В связи с актуальностью данной проблемы начали проводиться систематические исследования изнашивания СКАМ и инструментов на их основе с целью установления фундаментальных закономерностей данного процесса [1, 2]. Однако полученная в них информация об износе и свойствах СКАМ даже для одинакового химического состава крайне противоречива, приводится без учета влияния физико-химических процессов, не учитывает зависимости полученных данных от способа и $p - T - t$ условий спекания. Несмотря на имеющиеся монографии [3 – 8], посвященные данному научному направлению, они в большей части носят описательный характер и имеют чисто утилитарные цели – ознакомить со свойствами СКАМ, их технологией и показать примеры успешного использования в промышленности. Сведения информации в справочники приводят часто по принципу статистического отбора, который является не лучшим, так как не раскрывает природу происходящих процессов и не позволяет полностью объяснить причины изменения износа инструментов из сверхтвердых материалов. Поэтому необходимо разрабатывать новые подходы на основании аналитических методов, позволяющих 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 то, что интенсивное тепловыделение за счет трения требует построения специальных граничных условий для взаимосвязанной задачи термоупругости при наличии износа контактирующих тел.

2. Задачу теплопроводности нельзя рассматривать изолированно от забоя, потому что тепловой поток распределяется как в породе, так и в долото.

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

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

5. Износ долота еще зависит от формы и геометрии профиля, степени оснащенности рабочей поверхности СКАМ и технологических режимов бурения.

На современном этапе конструирования буровых инструментов еще не существует решения задачи износа с полным отражением перечисленных выше особенностей. Для получения аналитического решения такой задачи следует приблизить форму долота к классическому и сделать ряд разумных упрощений.

Цель работы – решение задачи изнашивания для полусферического тела с покрытием с учетом тепловыделения от трения, которое приближенно моделирует работу алмазного долота. Здесь используется выражение для определения температурных полей и контактных напряжений в алмазном долоте, которые получены нами в работах [9, 10].

Формулировка проблемы

Для многих видов изнашивания уравнение скорости износа от давления и скорости относительного скольжения имеет вид [11, 12]:

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

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) .

Вышеуказанные уравнения (1) и (2) вместе с начальными и граничными условиями, а также условиями сопряжения на границе раздела сред являются основными при решении задач изнашивания конкретной пары. Рассмотрим детально уравнения, решения которых может привести к достижению поставленной цели.

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 [9], 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)

$$\Omega = \left\{ (r, q, j) \mid r \in [0; r_2]; \quad q \in \left[0; \frac{P}{2}\right]; \quad j \in [0; 2p] \right\}.$$

Условия рассматриваются симметричными относительно оси Oz , не зависящими от угла φ . В области контакта $\Gamma = \left\{ (r, j) \mid r = r_2; \quad q \in \left[0; \frac{P}{2}\right] \right\}$ 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:

$$s_{jj}(r, q, t) = k s_{rr}(r_2, q, t), \quad (3)$$

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

$$A = \omega r_2 \sin q s_{jj}(r_2, q, t) = \omega r_2 \sqrt{1 - m^2} s_{jj} \times (r_2, m, t) = \omega r_2 \sqrt{1 - m^2} k s_{rr}(r_2, m), \quad (4)$$

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 реше-

нию задачи изнашивания алмазного бурового долота отметим некоторые существенные, по нашему мнению, аспекты.

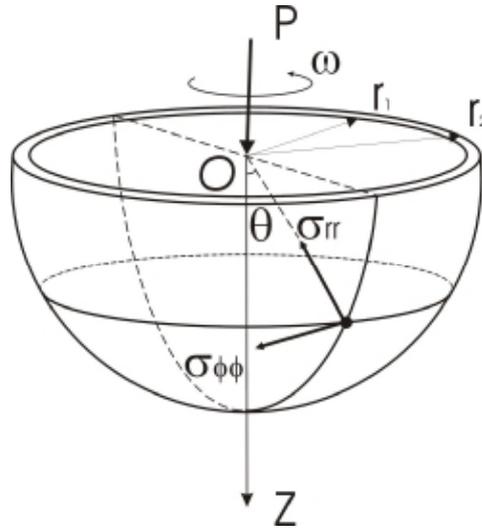


Рис. 1. Схема контакта алмазное долото – порода в процессе бурения скважины.

Известно, что ресурс работы алмазного бурового долота находится в пределах 200 – 400 час 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 горных пород, как уже было нами показано в работах [9, 10], 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 выше обобщенное дифференциальное уравнение скорости изнашивания для алмазного долота (1) в процессе бурения скважины принимает вид:

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

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

ω – угловая скорость вращения.

Контактные напряжения $\sigma_{rr}(r_2, \mu)$ определяются по зависимости, установленной нами в работе [10]:

$$s_{rr}(r_2, m) = \frac{6k_1 P V_p}{100 p d^2 N}, \quad (6)$$

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 [2];

d – средний диаметр алмазного зерна;

N – количество режущих алмазов на рабочей поверхности долота.

Коэффициент износа K_i определяется в зависимости от контактной температуры соотношением:

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

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).

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 [9].

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

Для детального анализа изнашивания алмазных буровых долот мы провели исследования зависимости коэффициента износа породоразрушающих вставок алмаз – твердый сплав ВК6 от контактной температуры $T(r_2, \mu, t)$. На основании статистического анализа экспериментальных данных получена следующая зависимость коэффициента износа алмазного долота от контактной температуры:

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

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 :

$$\begin{cases} K_1 \frac{(N+1)}{2} N + K_2 \sum_{i=1}^N T_i = \sum_{i=1}^N K_i \\ K_1 \sum_{i=1}^N T_i + K_2 \sum_{i=1}^N T_i^2 = \sum_{i=1}^N K_i T_i. \end{cases} \quad (12)$$

Решение системы (12) выглядит следующим образом:

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

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 $K_0 = 3,64741 \cdot 10^{-21} \text{ м}^2/\text{Н}$; $K_1 = 5,49318 \cdot 10^{-21} \text{ м}^2/\text{Н}$; $K_2 = 3,64847 \cdot 10^{-23} \text{ м}^2/(\text{Н} \cdot \text{градус})$, при этом относительная погрешность такого представления не превышает 5 %.

Связь между линейным и объемным коэффициентами износа имеет вид:

$$K_{i, \text{лин}} \approx \frac{K_{i, \text{об}}}{2pr_2 h_a}. \quad (15)$$

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

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

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

Анализ результатов

Контрольные расчеты проведены при бурении песчаника алмазными долотами ИСМ-214,3 Т, оснащенными буровыми вставками одинаковых размеров (диаметром 10 мм, высотой 10 мм и начальной толщиной алмазосодержащего слоя $h_a = 3$ мм), двух различных составов. Буровые вставки первого типа получены на основе шихты алмаз – твердый сплав ВК6 – долото 1, второго алмаз – твердый сплав ВК6 с добавками порошков диборида хрома CrB_2 – долото 2. В обоих случаях использовались природные алмазы при следующем варьировании исходных данных: коэффициент теплопроводности материала композита λ_2 и твердого сплава λ_1 ($\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$) 100 – 200 и 20 – 80; относительная концентрация алмазов $K = 75 - 125$ (что соответствует 3,3 – 5,5 карат алмазов на 1 см^3 шихты); зернистость алмаза $Z = 500/400 - 1250/1000$; относительное значение коэффициента теплообмена α ($\text{кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$) 0,5 – 3,5; угловая координата θ (градус) 10 – 80; контактное давление p (МПа) 1,0 – 3,5; линейная скорость вращения v (м/с) 2,5 – 5,0.

На рис. 2 приведены графические зависимости износа исследуемых долот при бурении песчаника. Их анализ показывает, что износ долот 1 и 2 довольно быстро выходит на квазистационарный режим и существенным образом зависит от материала композита. Так, при одинаковых значениях концентрации и зернистости алмазов и условий бурения, скорость износа долота 2 в два раза меньше аналогичного параметра долота 1. Из анализа полученных результатов вытекает, что введение CrB_2 в состав исходных веществ способствует повышению механических свойств СКМ и тем самым обеспечивает существенное повышение износостойкости долота.

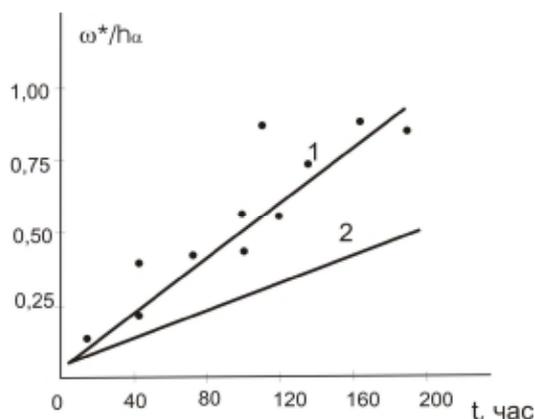


Рис. 2. Зависимости износа долот 1 и 2 от времени бурения при следующих условиях: $\lambda_2 = 120 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; $\lambda_1 = 40 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; $p = 30 \text{ МПа}$; $v = 4 \text{ м}/\text{с}$; $\theta = 80^\circ$; $\alpha = 1,5 \text{ кВт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$; $K = 100$ и $3 = 800/63$; —, • расчетные и экспериментальные данные.

Конечно же, процессы, способствующие улучшению структуры композита с одновременным повышением прочностных свойств, имеют совсем иную природу, носят более универсальный характер, не зависящий от конкретных условий, не учитываются в данной модели. Важно здесь то, что такой подход позволяет дать количественную и качественную оценку износа инструмента при бурении скважин. Высокая сходимость расчетных значений с экспериментальными данными свидетельствует о точности и адекватности предложенной модели.

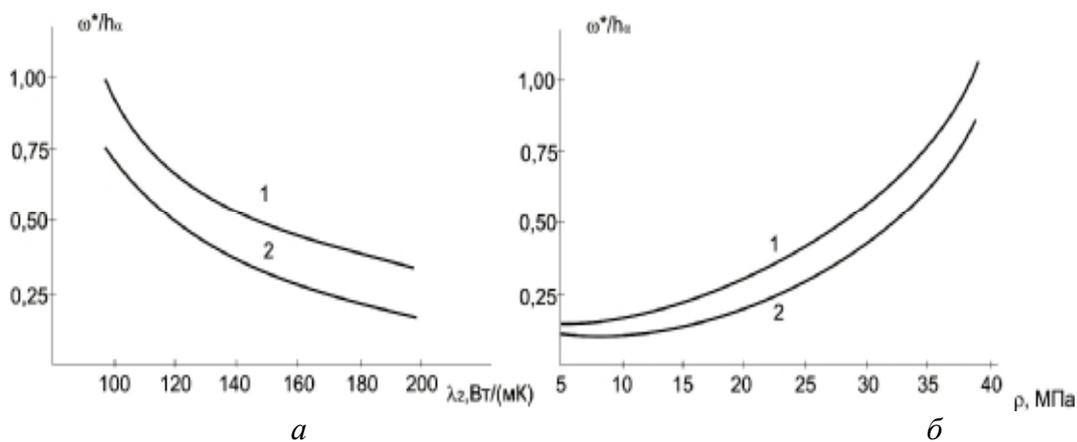


Рис. 3. Зависимости износа алмазного долота от коэффициента теплопроводности материала композита (а) $\theta = 70$ (1) и 50 (2) градус, и контактного давления (б) $\lambda_2 = 120 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, $\theta = 66^\circ$ (1) и 50° (2) в процессе бурения песчаника при: $p = 30 \text{ МПа}$, $\alpha = 1,5 \text{ кВт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, $K = 100$, $3 = 800/630$; $t = 200 \text{ час}$, $v = 4 \text{ м}/\text{с}$, $\lambda_1 = 40 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.

Износ алмазного долота существенно зависит от теплопроводности материала композита (рис. 3, а). Так, при увеличении коэффициента теплопроводности композита λ_2 от 100 до 200 (Вт/(м·К)) наблюдается значительное уменьшение износа инструмента. Дальнейшее его увеличение уже не оказывает такого сильного воздействия, хотя и приводит к уменьшению износа. Полученная информация свидетельствует о том, что для повышения износостойкости буровых долот следует повышать теплофизические характеристики СКМ, которые можно достичь путем использования овализованных алмазов, исключаящих в них микротрещины, и $p - T - t$ условий спекания, обеспечивающих уплотнение исходных веществ в композите. Вполне закономерно и адекватно реальным процессам выглядят зависимости износа алмазных долот от контактного давления p (рис. 3, б). Анализ этого рисунка показыва-

ет, что увеличение p приводит к стремительному увеличению износа инструмента. Это обстоятельство указывает на необходимость оптимизации технологических режимов бурения.

Продолжая обсуждать причины изменения износа алмазного бурового долота, следует отметить, что износ существенно зависит от угловой координаты θ (рис. 4, а). Это связано, в первую очередь, с различными скоростями скольжения режущих элементов на поверхности долота, что и приводит к неравномерному изнашиванию. Для обеспечения равномерного износа инструмента требуется его периферийную рабочую поверхность (по ходу увеличения угловой координаты) оснащать большим количеством буровых вставок. На кинетику износа существенное влияние оказывает относительное значение коэффициента теплообмена α (рис. 4, б) и скорость вращения v (рис. 4, в). Увеличение коэффициента теплообмена α способствует уменьшению износа долота за счет снижения термических воздействий и обеспечения благоприятных условий для выноса разрушенной горной породы из забоя скважины. Увеличение же скорости вращения v долота приводит, наоборот, к повышению температуры на рабочей поверхности и, как следствие для данной конструкции инструмента, к увеличению износа (рис. 4, в).

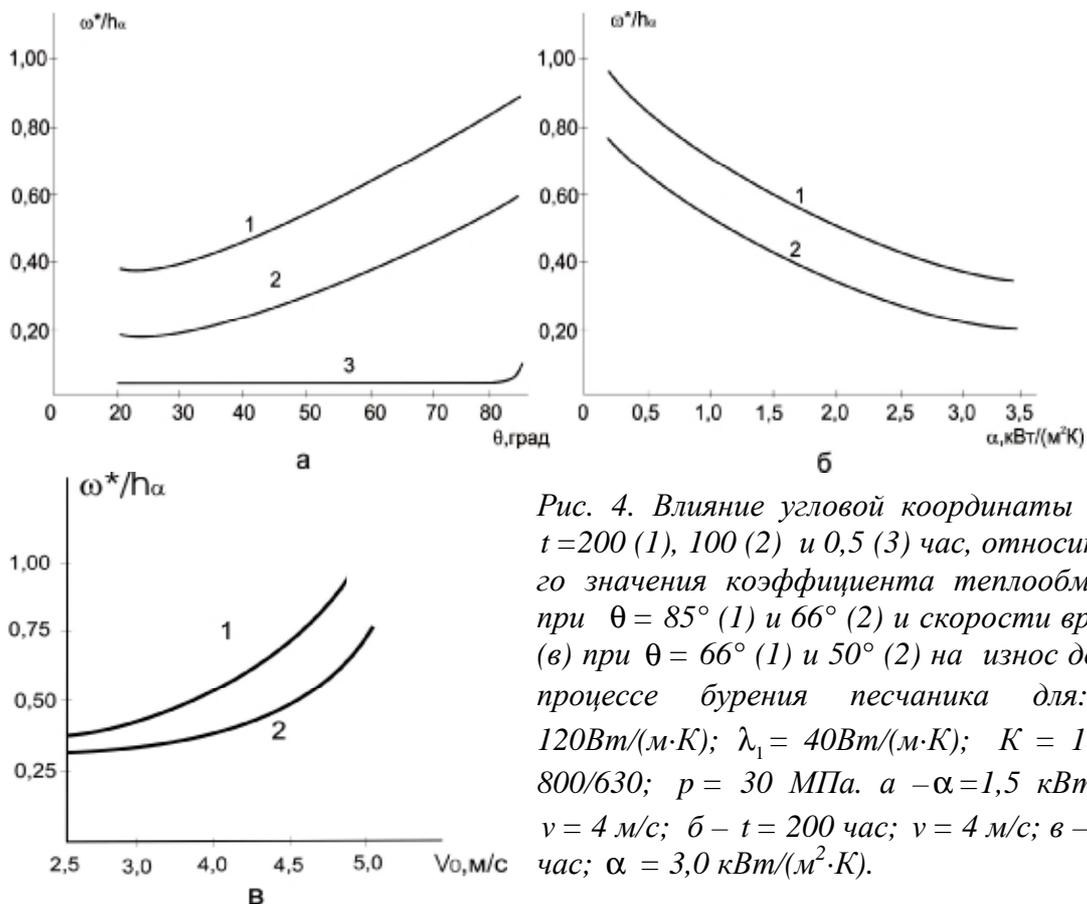


Рис. 4. Влияние угловой координаты (а) при $t=200$ (1), 100 (2) и $0,5$ (3) час, относительного значения коэффициента теплообмена (б) при $\theta = 85^\circ$ (1) и 66° (2) и скорости вращения (в) при $\theta = 66^\circ$ (1) и 50° (2) на износ долота в процессе бурения песчаника для: $\lambda_2 = 120 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; $\lambda_1 = 40 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; $K = 100$; $3 = 800/630$; $p = 30 \text{ МПа}$. а – $\alpha = 1,5 \text{ кВт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, $v = 4 \text{ м}/\text{с}$; б – $t = 200 \text{ час}$; $v = 4 \text{ м}/\text{с}$; в – $t = 200 \text{ час}$; $\alpha = 3,0 \text{ кВт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$.

На основании проведенных исследований можно заключить, что предложенный подход и уравнения, полученные на его основе, позволяют исследовать кинетику износа алмазных долот в процессе бурения, и могут быть использованы для технологии изготовления СКМ при определении их физико-механических свойств.

Выводы

1. Установлено, что износ алмазных буровых долот является следствием процессов, происходящих как на контакте рабочая поверхность – горная порода, так и при спекании СКМ.

2. Выявлено, что износ алмазного долота существенно зависит от теплопроводности материалов композита, концентрации и зернистости алмазов, угловой и радиальной координаты.

нат профиля, относительного значения коэффициента теплообмена и технологических режимов бурения.

3. Причинами неравномерного износа долота является наличие различных скоростей, контактных температур и напряжений на рабочей поверхности инструмента.

4. Показано, что введение порошков CrV_2 в состав исходных веществ композита существенно уменьшает износ инструмента для всех исследуемых параметров.

5. Предложенный подход можно рассматривать как перспективную модель для исследования кинетики изнашивания алмазных буровых инструментов и технологии изготовления СКМ с требуемыми свойствами.

Литература

1. Александров В. А., Жуковский А. Н., Мечник В. А. Температурное поле и износ неоднородного алмазного круга при конвективном теплообмене. – Ч. 1. // Трение и износ. – 1994. – Т. 15, № 1. – С. 27 – 35.
2. Александров В. А., Жуковский А. Н., Мечник В. А. Температурное поле и износ неоднородного алмазного круга при конвективном теплообмене. – Ч. 2. // Трение и износ. – 1994. – Т. 15, № 2. – С. 196 – 201.
3. Вовчановский И. Ф. Породоразрушающий инструмент на основе славутича для бурения глубоких скважин. – К.: Наук. думка. – 1979. – 210 с.
4. Цыпин Н. В. Износостойкость композиционных алмазосодержащих материалов для бурового инструмента. – К.: Наук. думка. – 1983. – 260 с.
5. Инструменты из сверхтвердых материалов / Под ред. Н. В. Новикова. – К.: ИСМ НАНУ, 2001. – 528 с.
6. Арцимович Г. В. Механические основы создания породоразрушающего бурового инструмента. – Новосибирск: Наука. – 1985. – 320 с.
7. Поверхностные свойства расплавов и твердых тел и их использование в материаловедении / Под ред. Ю. В. Найдича. – К.: Наук. думка, 1991. – 280 с.
8. Порошковая металлургия. Спеченные и композиционные материалы / Под ред. В. Шатта. – М.: Металлургия, 1983. – 520 с.
9. Бондаренко Н.А., Жуковский А.Н., Мечник В.А. Температурное состояние алмазных буровых долот // Доповіді НАН України. – 2006. – № 10. – С. 95 – 102.
10. Бондаренко М. О., Мечник В. А. Визначення теплових потоків при руйнуванні породи алмазними буровими вставками // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2006. – № 1. – С. 47 – 49.
11. Хрущев М. М., Бабичев М. А. Абразивное изнашивание. – М.: Наука, 1970. – 252 с.
12. Галин Л. А. Контактные задачи теории упругости и вязкоупругости. – М.: Наука, 1980. – 304 с.

Поступила 04.06.07.