

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СТРУКТУРНО УПОРЯДОЧЕННОЙ СБОРКИ БУРОВЫХ ТРЕХШАРОШЕЧНЫХ ДОЛОТ

А.Н.Журавлев, С.В.Толоконников

Самарский государственный технический университет,
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, e-mail: z a n . s a m g t u @ m a i l . r u

Наведено математичні моделі, які є теоретичними основами структурно впорядкованого складання бурових тришарошкових долот, а також проведено їх теоретико-експериментальну перевірку за допомогою числового моделювання в програмному продукті ADAMS.

This work presents mathematical models that are the theoretical foundations of the structurally-ordered assembly of drilling three-cone bits as well as describes their theoretical-experimental check carried out by means of numerical simulation in a software product ADAMS.

Качественные характеристики многорядных опор буровых долот определяются процессами изготовления, сборки и условиями эксплуатации. При тяжелых условиях эксплуатации радиальный зазор в опоре увеличивается во много раз из-за износа роликов, что может привести к заклиниванию роликовой опоры и выходу из строя всего изделия.

атации опор этих изделий с последующим прогнозированием их ресурса.

В настоящее время отсутствуют системные исследования взаимосвязи процессов сборки и эксплуатации опор буровых долот, раскрывающие функциональные закономерности ресурса эксплуатируемого изделия от структурных переменных параметров сборки. В исследованиях, выполненных за последние годы, не в полной мере отражено влияние на расчетный ресурс сборки двухрядных опор, а в опубликованных работах не учтены условия влияния случайной составляющей диаметральных отклонений контактируемых деталей в пределах нескольких селективных групп на качественный показатель сборки.

В качестве расчетных параметров структурно упорядоченной сборки выбираются: угловое относительное смещение комплектов роликов большой и малой беговых дорожек (БРД и МРД); величины радиального и торцевого зазоров по селекции роликовых дорожек опор [3]; высоты подъема секции долота при сборке под сварку с учетом их равномерной нагрузки; взаимосвязанная структура комплекта роликов по условию соседства размерного ряда опоры с расположением зубков на шарошке.

В связи с вышесказанным целью данной научной работы является разработка теоретических основ структурно упорядоченной сборки буровых трехшарошечных долот, позволяющих существенно повысить эксплуатационный показатель изделия (ресурс).

Структурно упорядоченная сборка решает последовательные задачи трех контуров: внутреннего, характеризующего количественные связи геометрии поверхностей подвижных деталей в опоре; внешнего, определяющего размерные связи опор под сварку; и взаимосвязанного контура соседства размерного ряда комплектов роликов и зубков. Эти контуры определяют показатель расчетного времени работы долота, по которому рассчитывается область существования максимально возможного ресурса при данной комплектации изделия, удовлетворяющего условию работы долота без заклинивания его опор.

Исследование процесса взаимодействия деталей опор буровых трехшарошечных долот содержит формирование подцелей, которые включают разработку множества допустимых вариантов сборочных процессов, их предварительную оценку и выбор наилучшего варианта. Основным условием такого исследования является ограниченное число вариантов, включающих комбинаторику структурной составляющей комплектов роликов, прошедших селективный отбор по размерным параметрам. Комбинаторика в случае сборки многорядных роликовых опор долот представляет множество альтернатив парных взаимодействий роликов в комплекте, что составляет основу структурно упорядоченной сборки [1,2].

Учитывая циклический характер эксплуатационных нагрузок, предлагается использовать для определения прогнозируемого ресурса тождество М.И. Крагельского, структурированное на основе теории групп

$$U_{\alpha} \sqrt{S_a^2(m, \varphi) + S_{\gamma}^2} \cdot T^2 = I_{max} - (c_{a,i})^{-1} \cdot X_a - \langle K(\varphi) \cdot c_{\gamma,j}(m, \varphi) \rangle^{\lambda} \cdot \gamma \cdot T, \quad (1)$$

где

$$sign \lambda = \begin{cases} +1, & \text{при } K(\varphi) > 1 \\ 0, & \text{при } K(\varphi) = 1 \\ -1, & \text{при } K(\varphi) < 1 \end{cases} \quad \text{– степень, учитывающая групповые свойства опор;}$$

Методика разработки структурно упорядоченной сборки бурового трехшарошечного долота предназначена для определения качественных и количественных показателей эксплу-

U_α – квантиль нормального распределения с α уровнем достоверности;

$S_a^2(m, \delta)$ – функционал дисперсии зазоров роликовой опоры, рассчитанный в зоне упруго-пластических деформаций в зависимости от структурной составляющей сборки m и угловой переменной δ , мкм²;

S_γ^2 – дисперсия функции скорости изнашивания роликовой опоры, (2.10) (мкм/ч)²;

T – ресурс опоры, значение которого подлежало определению (4.1), ч;

I_{max} – максимально допустимый зазор между роликами, обеспечивающий работу долота без заклинивания опор, мкм;

$c_{a,i}$ – коэффициент вариации функции сборочных зазоров с учетом способа сборки;

X_a – значение рассеивания замыкающего звена комплектов роликов относительно действительных размеров роликовых дорожек шарошки, рассчитанное по методу полной взаимозаменяемости, в пределах одной селективной группы, мкм;

$c_{\gamma,j}(m, \theta)$ – коэффициент вариации функционала скорости изнашивания роликовой опоры в зависимости от структурной составляющей сборки m и угловой переменной θ , устанавливающий связь внешних циклов нагрузок с внутренней структурой сборки роликовых опор;

m – структурная составляющая сборки соединений комплектов роликов БРД и МРД, которая определяется группой подстановок роликов установленными в определенной последовательности с различными значениями действительных диаметральными размерами, например $\langle D_{sr} D_{min} D_{max} \rangle / \langle d_{sr} d_{min} d_{max} \rangle$;

$K(\varphi)$ – структурный коэффициент взаимосвязанного контура сборки роликов БРД, МРД опоры, который равен отношению числа благоприятных исходов n_+ к числу неблагоприятных n_- при заданном φ ;

γ – математическое ожидание скорости изнашивания, определяется по измеренной величине износа роликов за время ресурсных испытаний, мкм/ч;

φ – угловой параметр учитывает изолированность фаз взаимодействия комплектов роликов БРД и МРД при сборке, град.

Ресурс опоры оценивается по значению корней T_{max} , и T_{min} уравнения (1) с учетом групповых свойств:

$$T = \begin{cases} T_{max}, n_{pu}K(\varphi) > 1 \\ \frac{T_{min}}{2}, n_{pu}K(\varphi) = 1, \text{ ч.} \\ T_{min}, n_{pu}K(\varphi) < 1 \end{cases}$$

Далее рассмотрим математические зависимости, по которым были найдены основные управляемые параметры структурно упорядоченной сборки, входящих в тождество (1) по определению прогнозируемого ресурса опоры бурового долота.

Определение дисперсии роликовой опоры S_a^2 в зоне упруго-пластической деформации в зависимости от структурной составляющей m и угловой переменной δ .

$$S_a^2 = \frac{S_{aБРД}^2 + S_{aМРД}^2}{2}, \quad (2)$$

где $S_{aБРД}^2$, $S_{aМРД}^2$ – дисперсии зазоров между роликами и соответственно большой и малой роликовыми дорожками, мкм².

$$S_{aБРД}^2 = \frac{\sum (X_{БРД} - D_{БРД})^2}{N - 1}; \quad (3)$$

$$S_{aМРД}^2 = \frac{\sum (X_{МРД} - D_{МРД})^2}{N - 1}, \quad (4)$$

где: $X_{БРД}$, $X_{МРД}$ – зазоры между роликами и БРД и МРД соответственно, спроецированные на ось действия радиальной силы, мкм;

$D_{БРД}$, $D_{МРД}$ – математические ожидания зазоров между роликами и БРД и МРД соответственно, мкм;

N – количество угловых разворотов δ (количество угловых разворотов для БРД и МРД равно 24).

Определение скорости изнашивания роликов

$$\gamma = \frac{\gamma_{БРД} + \gamma_{МРД}}{2}, \quad (5)$$

где $\gamma_{БРД}$, $\gamma_{МРД}$ – скорости изнашивания роликов соответственно по малой и большой роликовым дорожкам, мкм/ч.

$$\gamma_{БРД} = \frac{\bar{u}_{БРД}}{T_{\Sigma}}; \quad (6)$$

$$\gamma_{МРД} = \frac{\bar{u}_{МРД}}{T_{\Sigma}}, \quad (7)$$

где $\bar{u}_{БРД}$, $\bar{u}_{МРД}$ – средние значения диаметрального износа роликов для БРД и МРД соответственно, мкм (численные значения среднего диаметрального износа больших и малых роликов взяты из актов стендовых испытаний долот аналогичного типа в ОАО “Волгабурмаш”);

T_{Σ} – время наработки, час (стендовые испытания).

Определение максимального износа роликов в опоре I_{MAX} из условия заклинивания роликовой опоры:

$$I_{max} = f(\Delta D, l); \quad (8)$$

$$l \equiv \sum_{i=1}^n \Delta D_i, \quad (9)$$

где ΔD_i – величина износа ролика, мкм;

l – длина ролика, мкм.

Определение дисперсии скорости изнашивания роликов S_γ в зоне упруго-пластических деформаций в зависимости от структурной составляющей m и угловой переменной δ :

$$S_{\gamma}^2 = \frac{\sum (F - D_{\gamma})^2}{N - 1}, \quad (10)$$

где: F – функция износа роликов в опоре, мкм/час;

D_{γ} – математическое ожидание скорости изнашивания роликов в опоре, мкм/час;

$$F = |Y_{БРД} \cdot \gamma_{БРД} + Y_{МРД} \cdot \gamma_{МРД}|, \quad (11)$$

где $Y_{БРД}$, $Y_{МРД}$ – коэффициенты структуры взаимодействия роликов в зоне упруго-пластических деформаций;

$$Y_{iБРД} = \frac{(D_{i+1} - D_i)}{(R_{i+1} + R_i)} \Big|_{i=1, \dots, 15}; \quad (12)$$

$$Y_{jМРД} = \frac{(d_{j+1} - d_j)}{(r_{j+1} + r_j)} \Big|_{j=1, \dots, 14}, \quad (13)$$

где D_i , d_j – диаметры роликов соответственно БРД и МРД, мкм;

R_j , r_j – радиусы роликов соответственно БРД и МРД, мкм.

Определение структурного коэффициента $K(\varphi)$:

$$K(\varphi) = f(\varphi, x); \quad (14)$$

$$K(\varphi) = \frac{n_{++}(n_{--})}{n_{+-}(n_{-+})}, \quad (15)$$

где $n_{++}(n_{--})$ – количество благоприятных исходов (совпадений направления перемещений по БРД и МРД);

$n_{+-}(n_{-+})$ – количество неблагоприятных исходов (несовпадений направления перемещений по БРД и МРД).

Определение коэффициента C_{γ} , устанавливающего связь внешних циклов нагрузок с внутренней структурой сборки роликовых опор:

$$C_{\gamma} = f(\varphi, \theta); \quad (16)$$

$$C_{\gamma} = \frac{\sqrt{D(\xi)}}{E(\xi)}, \quad (17)$$

где $D(\xi)$ – дисперсия случайной величины совпадений зубков с минимальными перемещениями роликов;

$E(\xi)$ – математическое ожидание случайной величины совпадений зубков с минимальными перемещениями роликов.

$$D(\xi) = \frac{\sum (\xi_{ср} - \xi)^2 \cdot \kappa}{M_{\theta} - 1}, \quad (18)$$

где $\xi_{ср}$ – среднееарифметическое значение случайной величины;

ξ – случайная величина совпадений;

κ – частота интервала;

M_{θ} – количество угловых разворотов шарошки (36 разворотов).

Определение коэффициента вариации C_a параметра радиальных зазоров X_a :

$$C_a = \frac{G_a}{X_a}, \quad (19)$$

где G_a – среднеквадратичное отклонение случайной величины параметра сборки комплектов роликов, мкм;

$$G_a = \frac{1}{6} \omega_a, \quad (20)$$

где ω_a – поле рассеивания параметров радиальных зазоров комплектов роликов селективных групп, мкм;

$$X_a = \frac{1}{2} \omega_a. \quad (21)$$

После подстановки значений переменных параметров в целевую функцию (1) определяется прогнозируемый ресурс по разработанной программе в MS Excel. В табл. 1 выборочно представлены значения прогнозируемого ресурса T многорядной опоры долота в зависимости от угла разворота комплектов роликов друг относительно друга φ и структуры комплектов роликов большой и малой роликовой дорожки опоры m .

На следующем этапе рассмотрим размерный анализ сборки под сварку, выполненный в соответствии с разработанной профессором Б.С.Балакшиным теорией размерных цепей и учитывающий свойство внешнего контура, которое сохраняет координаты точки отсчета и направления вектора составляющего звена размерной цепи.

В связи с тем, что конструктивно шарошки всех трех секций долота отличаются по вооружению (это условие необходимо для перекрытия забоя во время работы долота), ресурс опор (секций) долота также получился различным. Это значит, что все секции долота будут находиться в различных условиях эксплуатации. Секция с наименьшим ресурсом выйдет из строя в первую очередь.

В связи с вышесказанным, в соответствии с математической моделью структурно упорядоченной сборки внешнего контура и полученными расчетными данными ресурса опор долота выполняется регулирование высоты подъема каждой секции долота за счет набора концевых мер заданного размера (рис. 1) для последующей их предварительной фиксации в виде выполнения операции прихватки и сварки.

Значения компенсирующих звеньев $A_{\Delta K1}$, $A_{\Delta K3}$ определяются по зависимостям:

$$A_{\Delta K1} = M \cdot T_{1-2}; \quad (22)$$

$$A_{\Delta K3} = M \cdot T_{3-1}, \quad (23)$$

где: M – масштаб, мм/час;

T_{1-2} – разница между средними значениями ресурса первой и второй секций долота, час;

T_{3-1} – разница между значениями ресурса третьей и первой секций долота, час.

Таблица 1 — Прогнозируемый ресурс опоры долота

Структуры комплектов роликов большой и малой роликовых дорожек	Угол поворота комплектов роликов	Расчетный ресурс опоры долота
m	φ, град.	T, ч.
$D_{sr}D_{max}D_{min}/d_{min}d_{max}d_{sr}$	20	45,71
$D_{max}D_{sr}D_{min}/d_{max}d_{sr}d_{min}$	20	41,25
$D_{sr}D_{min}D_{max}/d_{sr}d_{min}d_{max}$	20	29,14
$D_{sr}D_{max}D_{min}/d_{min}d_{max}d_{sr}$	70	34,24
$D_{min}D_{max}D_{sr}/d_{sr}d_{min}d_{max}$	70	28,51
$D_{sr}D_{min}D_{max}/d_{sr}d_{min}d_{max}$	70	21,83

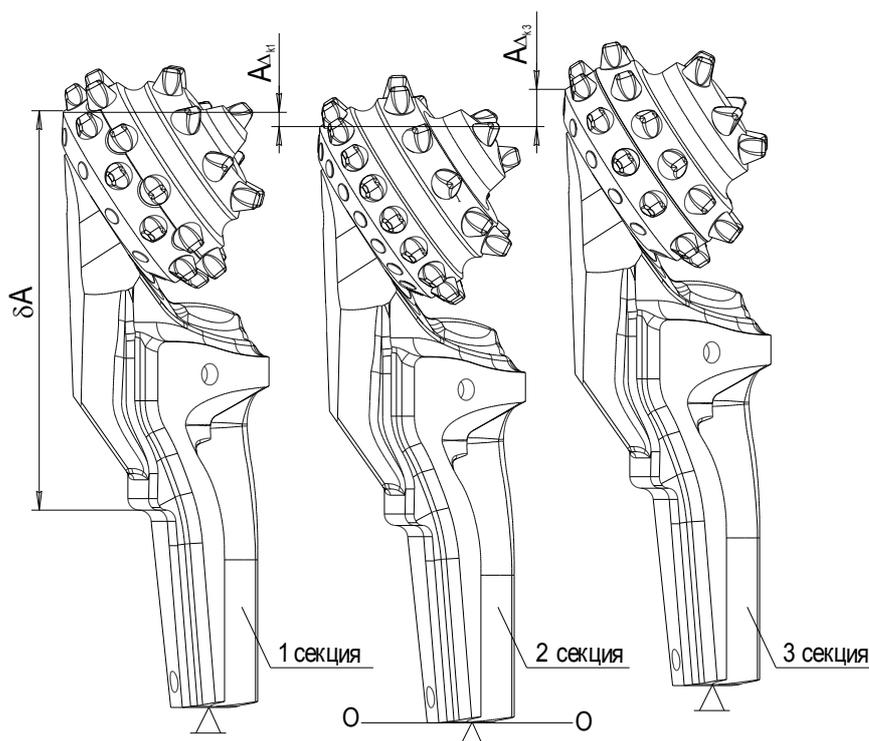


Рисунок 1 – Замыкающие звенья размерной цепи сборки секций под сварку

$$M = \frac{\delta A}{T_{3-2}}, \quad (24)$$

где: δA – допуск на разновысотность, задаваемый конструктором, мм;

T_{3-2} – разница между значениями ресурса третьей и второй секций долота, час.

В табл. 2 выборочно приведены численные значения компенсирующих звеньев A_{AK1} A_{AK3} в зависимости от расчетного ресурса опоры долота и структурной составляющей m.

Для проверки достоверности предлагаемой математической модели структурно упорядоченной сборки используем вычислительный пакет программ ADAMS. Соберем модель трехшарошечного долота $\varnothing 269,9$ мм с забоем (рис. 2). Значения компенсирующих звеньев A_{AK1} A_{AK3} примем равными по третьему варианту структурной составляющей m (табл. 2).

Согласно рекомендуемым режимам бурения на данный типоразмер долота к колонне прикладываем крутящий момент величиной 4,0 кН·м. К долоту вдоль его оси прикладываем сосредоточенную силу величиной 240 кН. В результате взаимодействия шарошек долота с забоем возникают контактные силы, которые определяют параметры этого взаимодействия (контакта), поэтому в ADAMS между каждой из трех шарошек и забоем создаем контакты типа Solid-to-Solid.

Для этого импортируем в ADAMS математические модели долота в сборе и забоя из системы Unigraphics NX4 в формате Parasolid. После того как все необходимые части модели созданы, необходимо указать, каким способом они соединяются. Модель забоя соединяем с неподвижной опорой (фундаментом) через промежуточное тело (цилиндр) двумя скользящими шарнирами, один из которых направлен

Таблица 2 — Численные значения компенсирующих звеньев размерной цепи

№	Структурная составляющая роликов m	Средние значения расчетного ресурса по секциям, час			Разница между средними значениями ресурса, час			M, мм/час	$A_{\Delta K1}$, мм	$A_{\Delta K3}$, мм
		T1	T2	T3	T1-2	T3-2	T3-1			
1	$D_{\max}D_{\min}D_{sr}/d_{\max}d_{\min}d_{sr}$	29,1	27,0	36,0	2,1	9,0	6,9	0,177	0,38	1,22
2	$D_{\max}D_{\min}D_{sr}/d_{\max}d_{sr}d_{\min}$	30,4	28,7	37,7	1,7	9,0	7,3	0,178	0,30	1,30
3	$D_{sr}D_{\max}D_{\min}/d_{\max}d_{sr}d_{\min}$	31,2	29,8	38,7	1,4	8,9	7,5	0,179	0,25	1,35
4	$D_{\min}D_{\max}D_{sr}/d_{\min}d_{\max}d_{sr}$	29,6	27,7	36,7	1,9	9,0	7,1	0,177	0,34	1,26
5	$D_{sr}D_{\max}D_{\min}/d_{\min}d_{\max}d_{sr}$	29,7	27,7	36,8	1,9	9,0	7,1	0,178	0,34	1,26
6	$D_{sr}D_{\max}D_{\min}/d_{\min}d_{sr}d_{\max}$	24,6	21,0	30,2	3,7	9,3	5,6	0,173	0,63	0,97

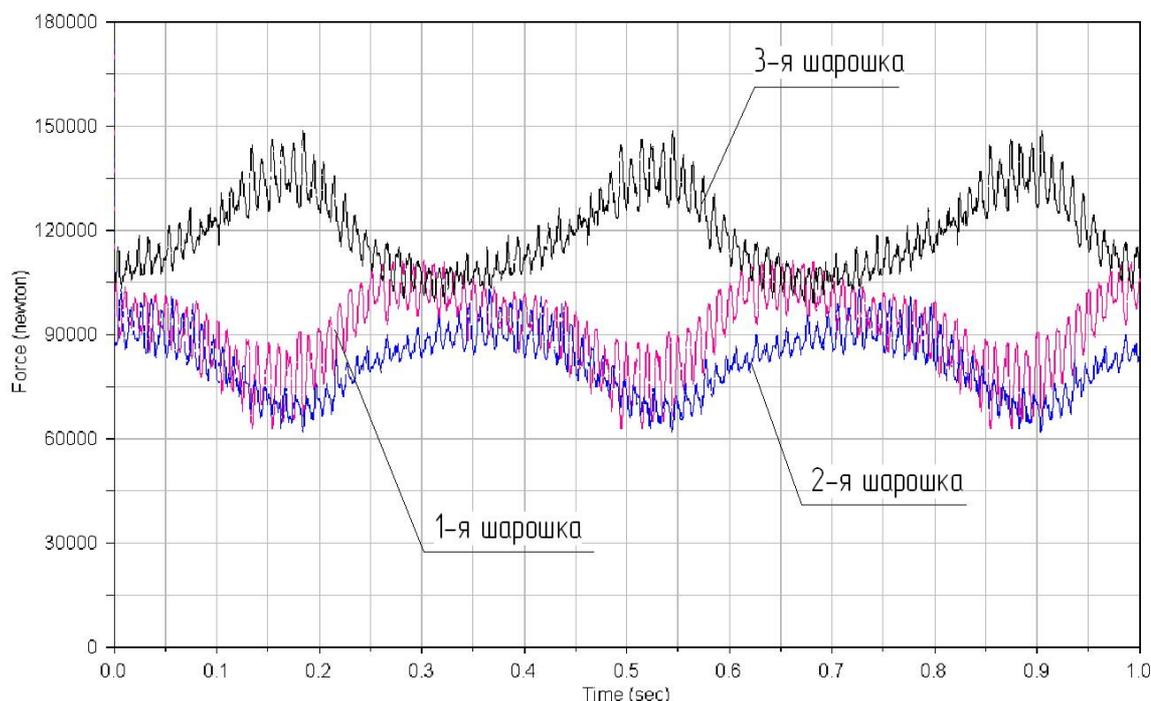


Рисунок 3 – Графики контактных сил

Определяем временной интервал процесса численного моделирования в 1 сек, с количеством шагов по времени 5000 и отправляем на симуляцию.

После окончания процесса симуляции смотрим изменения по времени контактных сил, возникающих между шарошками и забоем. Выводим графики контактных сил для каждой из трех шарошек за время 0,15 сек (рис.3).

Как видно из графиков, у 3-ей шарошки величина контактных сил наибольшая, у 2-ой – наименьшая, что соответствует заложенной в математической модели разности высот секций долота. Тем самым мы получили качественное совпадение результатов работы долота с заложенными на этапе сборки данными по разности высот.

Тематика данной научной работы входит в состав научно-исследовательских работ, проводимых в рамках тематического плана Самарского государственного технического универси-

тета по заданию Федерального агентства по образованию на 2006-2009 годы по теме «Разработка теоретических основ структурно упорядоченной сборки тяжелонагруженных изделий машиностроения», номер государственной регистрации НИР 01.2.006 06882.

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Разработана математическая модель, которая составляет основу структурно упорядоченной сборки, позволяющая выбрать оптимальные параметры соединений (структуру комплектов роликов m , угол разворота комплекта ϕ , величину диаметрального зазора для БРД и МРД X_a), обеспечивая максимально возможные значения расчетного ресурса изделия.

2. Выявлены конструктивно-технологические особенности каждой секции изделия, которые, используя оценку расчетного значения параметров ресурса, позволили оптимизировать параметры сборки под сварку секций (знак и

направлення регулювання секцій по різно-висотності) з метою забезпечення рівної на-груженості опор.

3. Отримані на етапі моделювання в ADAMS результати по контактним силам, що виникають в результаті роботи долота, якісні-чно збігаються з математичною моделлю зби-рки секцій долота під сварку, що підтвер-джує достовірність розробленої математи-чної моделі структурно упорядкованої зби-рки.

1 Журавлев А.Н., Борисов М.А. Структурно упорядоченная сборка под сварку резьбовых соединений алмазных буровых долот // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2007. – № 7. – С. 18-23.

2 Журавлев А.Н., Борисов М.А. Оценка качества структурно упорядоченной сборки под сварку резьбовых соединений. // Известия томского политехнического университета. – 2007. – Том 311. – №2. – С. 27-30.

3 Морозов Л.В., Богомолов Р.М. Селективная компьютерная сборка буровых шарошечных долот // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2003. – №6. – С. 34-38.

УДК 622:621.65

РЕЗУЛЬТАТИ СТЕНДОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПРОМИСЛОВИХ ВИПРОБУВАНЬ ЗМІЦНЕНИХ ПАР ТЕРТЯ ПОРШНЕВИХ НАСОСІВ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ ПРИ ЗВОРОТНО-ПОСТУПАЛЬНОМУ РУСІ

С.І.Гладкий

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 774419

e-mail: yozh@nimg.edu.ua

Выполнены стендовые исследования изнашивания узлов типа «уплотнение-шток» буровых насосов, работающих при возвратно-поступательном движении. Приведены результаты сравнительных стендовых испытаний образцов, полученных по разработанной оптимизированной технологии газотермического напыления, и образцов, изготовленных по стандартным технологиям. Промышленные испытания подтвердили эффективность предложенной технологии плазменного напыления рабочей поверхности штоков буровых насосов порошковыми композиционными покрытиями.

Bench research has been conducted to investigate the detrition of nodes, rod seal type, in drilling pumps that work at alternate motion. In the article there have been given the results of comparative bench tests of spices received due to the developed optimized technology of gas-thermal sputtering and of spices manufactured by standard technologies. The industrial tests have proved the effectiveness of the offered technology connected with the plasma spraying of the operation surfaces of drilling pumps' rods by powder composite coatings.

Для підвищення надійності, довговічності виробів машинобудування та їх економічності актуальною стає проблема вибору матеріалів пар тертя. Особливо важливою ця проблема є для вузлів ущільнення-шток бурових поршне-вих насосів, що працюють в екстремальних умовах (високі швидкості ковзання, великі пи-томі навантаження, високі температури, агре-сивність та абразивність перекачуваного сере-довища тощо.). Для роботи в таких умовах по-трібні матеріали із складним комплексом фізи-ко-механічних властивостей, що забезпечать необхідну довговічність обладнання в цілому.

Ефективним вирішенням проблеми може бути тільки науково обґрунтований підбір ма-теріалів пар тертя з наперед заданим комплексом властивостей, що базується на використан-ні даних стендових досліджень. Такими влас-тивостями володіють композиційні покриття, одержані газотермічним напыленням [1].

Випробування на тертя та зношування здійснювалось на стенді зворотно-поступального

руху за розробленою методикою [2]. Для порі-вняння за аналогічними програмами випробу-вані плазмові покриття, напылені самофлюсо-ючим порошком типу ПГ-10Н-01 (ТУ 48-19-383-86), і зразки із сталі 40Х, зміцнені СВЧ та хро-муванням за стандартними технологіями. Тов-щина плазмових покриттів після доводки скла-дала 0,15-0,20 мм. Враховуючи вимоги до пари тертя „шток-ущільнення” бурового насоса, ви-хідна шорсткість поверхонь всіх металевих зра-зків була однаковою і складала Ra=0,4.

У практиці буріння свердловин з метою економії бурового розчину гуматні, кальцієві (вапнисті, гіпсові, хлоркальцієві) та інші розчи-ни переводять в калієві. Дія таких розчинів ба-зується на специфічній здатності іонів калію вільно проникати у міжплощинний простір, міцно зв'язуючи елементарні частинки породи, попереджаючи їх набрякання і диспергування [3]. Глини стають слабкогідратованими з під-вищеними значеннями механічної міцності і водостійкості. Застосовують калієві бурові