

УПОРЯДОЧЕННАЯ СБОРКА ОПОР БУРОВЫХ ШАРОШЕЧНЫХ ДОЛОТ

© 2005 А.Н. Журавлев, И.К. Рыльцев

Самарский государственный технический университет

Предложен новый тип сборки роликовых опор буровых шарошечных долот, позволяющий оценить ресурс собранного изделия на этапе его изготовления.

В подавляющем числе случаев отказы техники, эксплуатируемой в тяжелых условиях, происходят по технологическим причинам, связанным с влиянием случайных составляющих на качество изготовления подвижных соединений. К таким соединениям относятся роликовые опоры буровых шарошечных долот. Подвижные детали роликовых опор буровых шарошечных долот изготавливаются с высокой точностью, но даже такое соединение подвергается риску заклинивания.

Причиной разброса индивидуальных характеристик при сборке роликовых опор является случайная реализация сочетаний параметров размерных рядов беговых дорожек и роликов в комплекте. Технологический процесс сборки подвижных соединений не обеспечивает стабильное значение ресурса изделия, что является проблемой современного машиностроения.

Решение проблемы стабилизации ресурса таких изделий неразрывно связано с совершенствованием и системной разработкой новых технологических методов управления качеством сборки подвижных соединений. Она основывается на учете трех основных факторов: случайного, силового и геометрического.

Для сборочного процесса буровых долот целесообразно применить параметрический метод оптимизации оценок взаимодействия поверхностей сопрягаемых деталей, отличающихся разнообразием связей реальных профилей (случайный фактор), образующих структуру соединения (геометрический фактор).

Системный анализ процессов сборки с заданной эксплуатационной характеристикой изделия заключается в разработке следую-

щих упорядоченных операций сборки: комплектация роликов с заданным циклом последовательности их чередования; сборка опоры качения с разворотом комплектов роликов друг относительно друга; сборка (опор) секций долот под сварку с заданной разновысотностью, которая повышает расчетный ресурс бурового долота за счет перераспределения внешней нагрузки между подвижными элементами. Перечисленные переменные управляемые составляющие процесса сборки позволяют определить технологические параметры, оказывающие влияние на оценку расчетного ресурса буровых шарошечных долот. Сборка должна учитывать индивидуальные свойства взаимодействия поверхностей деталей подвижных соединений и гарантировать повышение расчетного ресурса изделия с заданным уровнем надежности.

Системные исследования процессов упорядоченной сборки позволяют рассматривать множество циклов подвижных деталей как реализацию размерных последовательностей роликов, оценивая эксплуатационные параметры опор качения. Имея исходную технологическую информацию по видам реальных рельефов деталей, можно установить взаимосвязи и с их помощью моделировать эксплуатационные процессы в подвижных соединениях на этапе сборки.

Разнообразие индивидуальных свойств деталей и соединений опор буровых шарошечных долот приводит к разнообразию технологических процессов их сборки. С целью унификации технологических процессов, для которых можно использовать единые принципы их построения, на основе анализа литературных источников разработан класси-

фикатор типов сборки по степени упорядочения размерного ряда соединяемых деталей, который указывает пути совершенствования процесса сборки многорядных опор качения буровых долот (табл. 1).

Указанные в табл. 1 условные обозначения параметров включают: $D_{ш}, d_{ш}, D_{л}, d_{л}, I_{ш,ц}$ – измеренные диаметры соответственно шарошки и цапфы лапы, составляющие I размерную группу с минимальным отклонением зазоров в двухрядном подвижном соединении; $D_{ш}, d_{ш}, d_3, h_3$ - измеренные геометрические параметры шарошки, которые формирует циклы внешних сил; $L_p, l_p, Dp, d_p, I_p, i_p, C_p/u_3$ – длина и диаметры роликов, составляющие заданную структуру i и I селективной группы; $u_p(I_{брд}/I_{мрд})$ – полярный угол фазового смещения комплектов первого ряда роликов относительно комплектов второго ряда; C_p/u_3 – угловое взаимодействие комплекта роликов с циклами внешних сил, $AD_{DK1}, AD_{DK2}, AD_{DK3}$ - параметры разновысотности (опор) секций долота.

Основные параметры классификационных признаков показаны на рис. 1, что составляет основную часть предметной области исследования в виде конструкции опоры бурового шарошечного долота.

Конструкция долота включает три секции, каждая из которых имеет многорядную опору, собранную из унифицированных деталей, включающую цапфу лапы 1, шарошку 2, а также малые ролики 3 и большие ролики

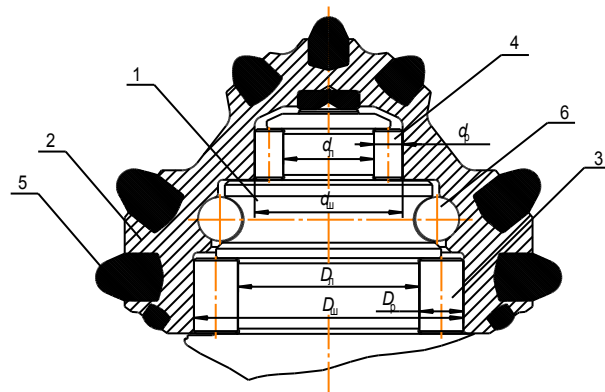


Рис. 1. Опора бурового шарошечного долота

Таблица 1. Классификатор типов сборки по степени упорядочения размерного ряда соединяемых деталей

Тип сборки опор качения	Классификационные признаки соединения			
	Элементы деталей опор качения			Роликовые опоры в конструкции
	Беговые дорожки шарошки и цапфы лапы	Конструктивные параметры шарошки	Ролики	
1. Неупорядоченная сборка	Неразличимы	Неразличимы	Неразличимы	Неразличимы
2. Частично упорядоченная сборка по циклам нагрузок на опоры	Неразличимы	Различимы, $D_{ш}, d_{ш}, d_3, h_3$	Неразличимы	Неразличимы
3. Частично упорядоченная сборка по циклам взаимодействия роликовых дорожек	Различимы, $D_{ш}, d_{ш}, D_{л}, d_{л}, I_{ш,ц}$	Неразличимы	Неразличимы	Неразличимы
4. Упорядоченная сборка по циклам взаимодействия роликов и дорожек	Различимы, $D_{ш}, D_{л}, d_{л}, d_{ш}, I_{ш,ц}$	Неразличимы	Различимы, $L_p, l_p, Dp, d_p, I_p, i_p, C_p/\varphi_3$	Неразличимы
5. Упорядоченная сборка	Различимы, $D_{ш}, d_{ш}, D_{л}, d_{л}, I_{ш,ц}$	Различимы, $D_{ш}, d_{ш}, d_3, h_3$	Различимы, $L_p, l_p, Dp, d_p, I_p, i_p, C_p/\varphi_3$	Различимы, $A_{ДК1}, A_{ДК2}, A_{ДК3}$

4, перемещающиеся соответственно по малой и большой роликовым дорожкам. Шарики 6 служат в опоре замковым подшипником. Долото воспринимает три цикла нагрузок на каждой секции в зависимости от переменного шага зубков 5, которые выполняют работу по отделению грунта в забое.

Моделирование процессов сборки роликовых опор в машиностроении, в частности, в производстве буровых долот, должно включать дополнительные условия, учитывающие индивидуальные свойства поверхностей сопрягаемых деталей роликовых опор. Эти условия предусматривают выбор по параметру реального профиля контактируемых поверхностей оптимальной структуры размерной компоновки комплектовующих роликов, а также позволяют прогнозировать ресурс опор. Управляемым параметром сборки двухрядных роликовых опор выбран набор композиций действительных диаметральных размеров роликов. Такая технология относится к технологии упорядоченной сборки роликовых опор, связывающей их эксплуатационные параметры с параметрами качества сборки [1].

Структурная компоновка роликовых опор требует от селективной сборки оптимизации таких параметров, как последовательность размерного ряда роликов m и угловая ориентация собранных комплектов роликов друг относительно друга j . При этом должно выполняться условие постоянства системы отсчета на всех этапах сборки роликовых опор. Такой тип упорядоченной сборки (табл. 1, тип 5) суммирует пространственные отклонения реальных профилей подвижных деталей с учетом выбранной компоновочной схемы и позволяет моделировать процесс взаимодействия с заданным уровнем вероятности заклинивания.

С помощью статистических экспериментов изучены свойства оценок управления технологией комплектования роликов по параметрам диаметральных зазоров двух комплектов для двух способов сборки. Первый тип относится к неупорядоченной сборке комплектов (табл. 1, тип 1) с произвольным выбором действительных диаметральных размеров роликов в пределах одной селективной группы. Второй тип относится к упорядочен-

ной сборке комплектов (табл. 1, тип 5), который включает структурный параметр действительных размеров роликов трех селективных групп m .

На рис. 2. представлена схема комплектования роликов для большой и малой роликовых дорожек с оптимальной структурой последовательности действительных размеров роликов $D_{\max} D_{sr} D_{\min} / d_{\min} d_{\max} d_{sr}$. Такая комплектация обеспечивает требуемую точность замыкающего звена X_a (диаметральный зазор) за счет размера компенсирующего ролика (D_k/d_k).

По приведенной схеме (рис. 2) оценивается влияние упорядоченной сборки на величину диаметрального зазора комплектов роликов. В результате проведенных исследований разработаны правила комплектования роликов для каждого ряда опоры. Эти правила комплектования роликов предполагают составление размерного ряда диаметров роликов из разных селективных групп с учетом структурной составляющей m . Комплект роликов, составленный из разных селективных групп, стабилизирует случайный процесс формирования функции диаметральных зазоров X_a и позволяет использовать табулированные значения оценки случайного процесса в виде квантили нормального распределения U_6 . Если при комплектации роликов структура отсутствует, то случайный процесс не подчиняется нормальному закону распределения случайных величин X_a , что приводит к доминированию случайного фактора в процессе сборки роликовых опор. Этот недостаток характерен для существующей технологии сборки роликовых опор (табл. 1, тип 1).

Конструкции буровых долот, имеющие двухрядные роликовые опоры, позволяют

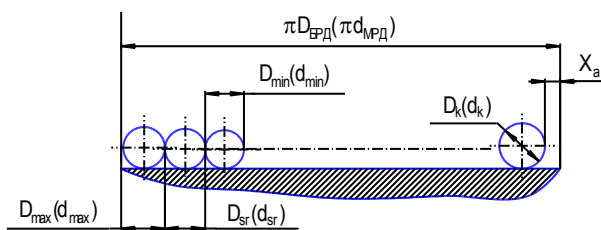


Рис. 2. Схема комплектования последовательности роликов большой и малой роликовых дорожек с заданной структурой

решить технологические задачи сборки подобных изделий, которые обеспечивают совершенствование расчета параметров подвижных соединений, управляя геометрическими показателями качества контактируемых деталей. В качестве расчетных параметров упорядоченной сборки выбираются: угловое относительное смещение комплектов роликов; величины радиального и торцевого зазоров по селекции роликовых дорожек опор; высоты подъема секции долота при сборке под сварку; взаимосвязанная структура комплекта роликов по условию соседства размерного ряда опоры с расположением зубков в шарошке.

Параметр ресурса характеризуется оценками математического ожидания и дисперсии. Оценка математического ожидания параметра ресурса роликовых опор представляет собой результат статистической реализации расчетного ресурса при неограниченном числе перестановок роликов и случайном их положении относительно большой и малой роликовых дорожек. Дисперсия оценивается по рассеянию значений параметра расчетного ресурса при различных угловых положениях роликов в опоре. Решение этой задачи должно определить степень влияния трех факторов сборки на значение расчетного ресурса роликовых опор.

Для расчета ресурса предлагается использовать тождество М.И. Крагельского [2], структурированное на основе теории групп:

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

где $sign \lambda = \begin{cases} +1, n_{pu}K(\varphi) > 1 \\ 0, n_{pu}K(\varphi) = 1 \\ -1, n_{pu}K(\varphi) < 1 \end{cases}$ – степень, учиты-

ваемая групповые свойства опор; U_α – квантиль нормального распределения с β уровнем достоверности; $S_a^2(m, \delta)$ – функционал дисперсии зазоров роликовой опоры, рассчитанный в зоне упругопластических деформаций в зависимости от структурной составляющей сборки m и угловой переменной δ , мкм² (случайный фактор); S_γ^2 – дис-

персия функции скорости изнашивания роликовой опоры, (мкм/ч)² (случайный фактор); T – ресурс опоры, значение которого подлежало определению, ч; I_{\max} – максимально допустимый зазор между роликами, обеспечивающий работу долота без заклинивания опор, мкм (геометрический фактор); $c_{a,i}$ – коэффициент вариации функции сборочных зазоров с учетом способа сборки (геометрический фактор); 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 (геометрический фактор); $c_{\gamma,j}(m, \theta)$ – коэффициент вариации функционала скорости изнашивания роликовой опоры в зависимости от структурной составляющей сборки m и угловой переменной расположения рядов зубков в шарошке θ , устанавливающий связь внешних циклов нагрузок с внутренней структурой сборки роликовых опор (случайный фактор); m – структурная составляющая сборки соединений комплектов роликов большой и малой роликовых дорожек, которая определяется группой подстановок роликов установленными в определенной последовательности с различными значениями действительных диаметральных размеров, например, $\langle D_{sr} D_{\min} D_{\max} \rangle / \langle d_{sr} d_{\min} d_{\max} \rangle$ (геометрический фактор); $K(\varphi)$ – структурный коэффициент взаимосвязанного контура сборки роликов большой и малой роликовых дорожек опоры, который равен отношению числа благоприятных исходов $n_{++}(n_-)$ к числу неблагоприятных $n_+(n_+)$ при заданном φ (случайный фактор); γ – математическое ожидание скорости изнашивания, определяется по измеренной величине износа роликов за время ресурсных испытаний, мкм/ч (силовой фактор); φ – угловой параметр, учитывает изолированность фаз взаимодействия комплектов роликов большой и малой роликовых дорожек при сборке, град (геометрический фактор).

Ресурс опоры, оценивается по значению корней T_{\max} и T_{\min} тождества (1) с учетом груп-

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

После подстановки значений переменных параметров обменного взаимодействия групп роликов большой и малой роликовых дорожек, а также воздействия группы зубков с группой роликов в целевую функцию (1) рассчитывается ресурс по разработанной программе.

С целью установления влияния структурной составляющей сборки m на эксплуатационные параметры использовался гармонический и корреляционный анализы рельефов роликовых дорожек, выработавших свой ресурс в условиях стендовых испытаний. Поскольку конструкция роликовых опор не предусматривает жестких кинематических связей, то в соответствии с общим принципом их структурной взаимосвязи определялась степень стабильности их траекторий при эксплуатации. С этой целью установлено влияние структурной составляющей сборки m на эксплуатационные параметры. В качестве исследуемого параметра выбран деформационный след, оставленный роликами на беговой дорожке подвижной детали после натуральных испытаний изделия.

Для измерения деформационного следа большой и малой роликовых дорожек разра-

ботана измерительная установка, которая реализует схему базирования измеряемой детали, представленную на рис. 3.

Оценка степени стабильности траекторий роликов при эксплуатации по выбранному параметру (соотношения числа роликов к гармонике функции аппроксимирующей деформационный след на дорожке) производилась по алгоритму быстрого преобразования Фурье [3].

Анализ свойств гармонических функций указывает на цикличность деформационного следа, как по малой, так и по большой роликовым дорожкам (рис. 4). Этот факт позволит распространить результаты упорядоченной сборки на граничное взаимодействие роликов с беговыми дорожками во время эксплуатации долот.

Корреляционный анализ роликовой дорожки указывает на наличие кинематических связей между роликами и угловыми положениями зубков. Это является необходимым условием при разработке модели упорядоченной сборки с возможностью прогнозирования ресурса роликовых опор. Наличие групповых свойств является достаточным условием сборки с прогнозированием ресурса, которые характеризуют взаимодействия роликов с роликовыми дорожками. Для этого определяется степень статистической взаимосвязи между роликами и роликовой дорожкой с учетом внешней нагрузки на опору.

В качестве эксплуатационного парамет-

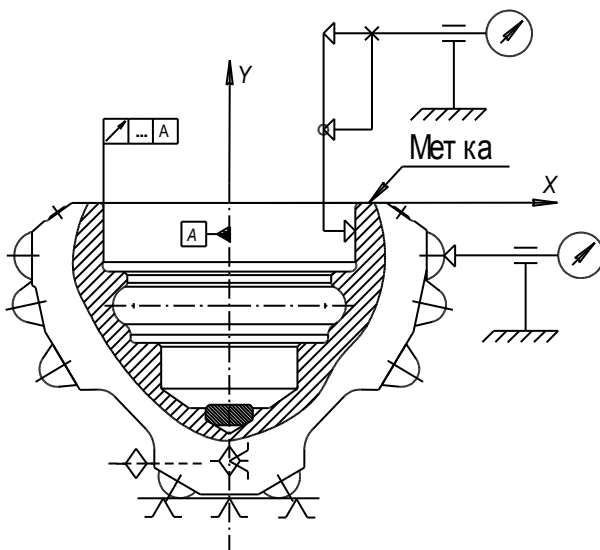


Рис. 3. Схема измерения деформационного следа роликовой дорожки шарошки

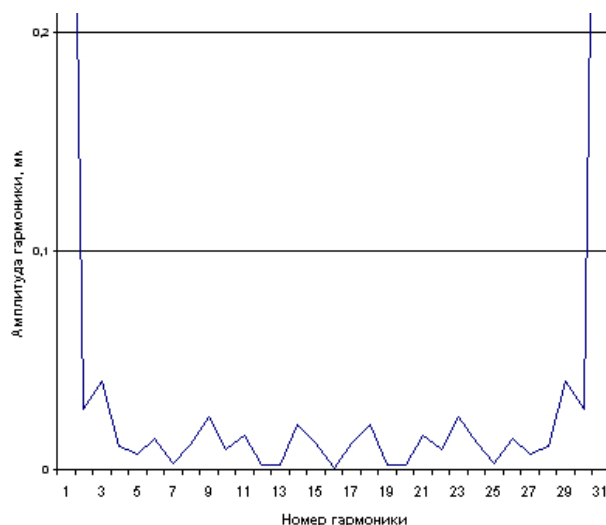


Рис. 4. Взаимно-корреляционная функция деформационного следа роликовой дорожки

ра рассматривается время до возникновения отказа в результате заклинивания опоры. Такой вид отказа является результатом эксплуатационного процесса, требующего времени при взаимодействии подвижных деталей роликовых опор качения. Этот процесс следует рассматривать как пару событий сборки и эксплуатации, первое событие отмечает начало действия, а второе – его завершение. Продолжительность эксплуатации на примере роликовых опор долота определяется интервалом времени между событием - начала бурения и событием – завершения, т.е. наступлением заклинивания. В течение всего этого времени могут происходить другие события, которые не входили в предметную область исследования.

Корреляционный анализ деформированных роликовых дорожек позволил установить свойство стационарности взаимодействия роликов с контактируемыми поверхностями и выявить наличие жестких кинематических

связей в случайном процессе эксплуатации роликовых опор без сепаратора.

Для выбора оптимальных параметров упорядоченной сборки опоры долота используется тождество (1) расчетного ресурса с учетом оценки допустимого износа роликов. С этой целью рассматривалось влияние на ресурс опоры долота не только технологии комплектации роликов, их взаимного расположения и размещения относительно зубков, но и технологии сборки секций под сварку.

В связи с тем, что расчетный ресурс трех опор бурового шарошечного долота различен необходимо применять сборку под сварку, которая заключается в регулировании высоты подъема каждой секции долота (рис. 5) за счет набора концевых мер расчетного размера замыкающих звеньев размерных цепей δA , AD_{DK1} , AD_{DK3} с последующей их предварительной фиксацией в виде выполнения операции прихватки. Предварительная проверка параметров разновысотности AD_{DK1} и AD_{DK3} и

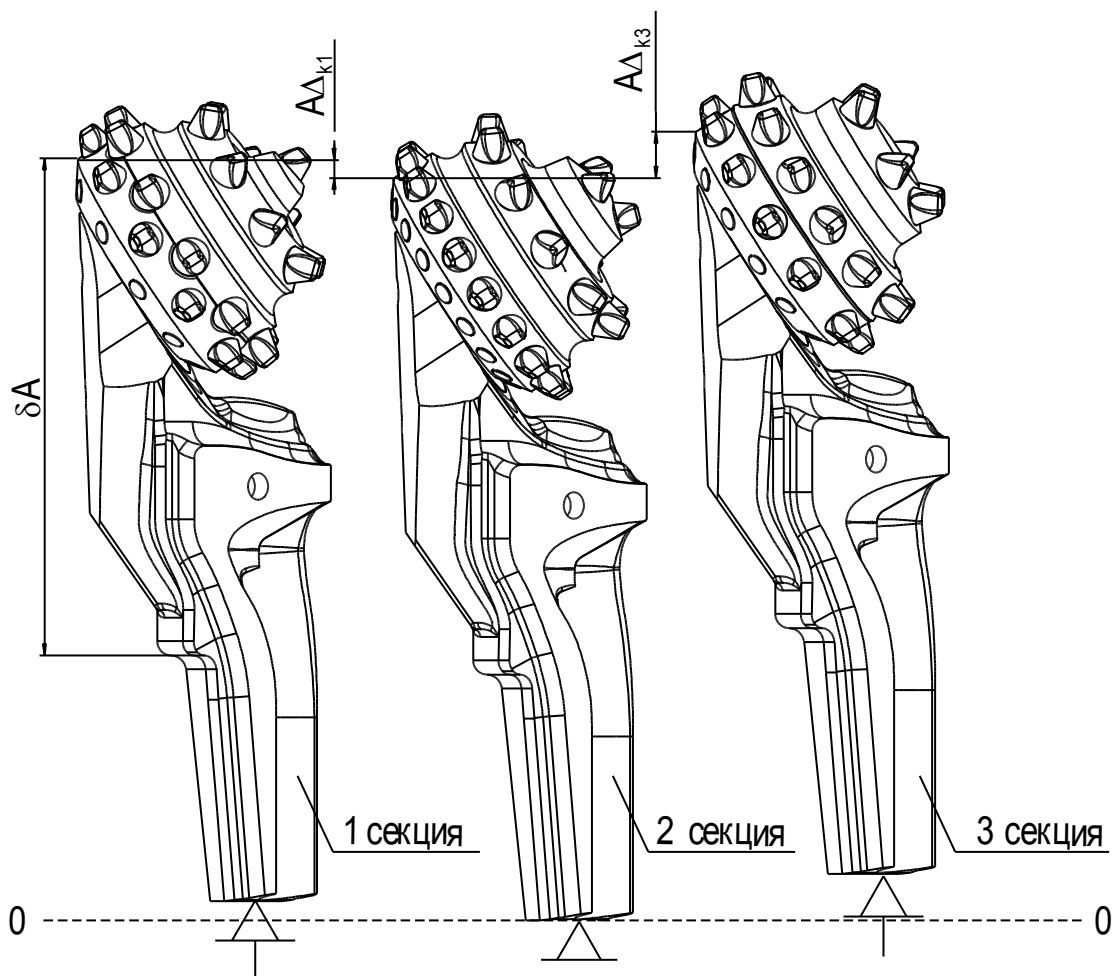


Рис. 5. Развертка размерной цепи сборки трехсекций под сварку

Таблица 2. Расчетные значения оптимальных параметров упорядоченной сборки

Номер секции	Варианты структуры сборки m	Угловое смещение комплектов φ , град.	Компенсирующие звенья размерной цепи, $A_{\Delta K}$, мм.	Расчетный ресурс, T , %
1	$D_{sr} D_{max} D_{min} / d_{max} d_{sr} d_{min}$	20	0,24	80,5
2	$D_{sr} D_{max} D_{min} / d_{max} d_{sr} d_{min}$	20	0	77
3	$D_{sr} D_{max} D_{min} / d_{max} d_{sr} d_{min}$	330	1,35	100

окончательная проварка сварных швов долота по всей длине осуществлялась с помощью электронно-лучевой сварки (перед проваркой швов электронно-лучевой сваркой установленные компенсирующие элементы удаляются). Значения замыкающих звеньев определялись с учетом расчетных значений ресурса. Благодаря сборке под сварку все три секции (опоры) во время эксплуатации будут находиться в равных условиях по нагруженности.

Расчетные значения оптимальных параметров упорядоченной сборки, позволяющие обеспечить максимально возможный ресурс бурового шарошечного долота, представлен в табл. 2.

Проведенные стендовые испытания позволяют получить дополнительные сведения о величине износа роликов и рассчитать скорость их изнашивания γ . Дополнительные сведения о процессе износа роликов дают возможность оценить значения ресурса $T(X)$, который нужно максимизировать. При условии гладкости гиперповерхности функции ресурса $T = T(X)$ эти сведения помогают ускорить процесс оптимизации сборки, не требуя трудоемких испытаний роликов на износ. Стендовые испытания долота показали, что это условие выполняется и позволяет использовать примерное равенство оценки градиента функции ресурса при близости значений скоростей изнашивания $\text{grad } T(\gamma_2) \approx \text{grad } T(\gamma_1)$, если $\gamma_2 \approx \gamma_1$, что позволяет рекомендовать при оценке скорости изнашивания эмпирические данные испытаний аналогичных типов долот.

Имея численные показатели значения скорости изнашивания долота, прошедшего стендовые испытания, можно считать их близкими для другого долота того же типа, собранного по той же технологии.

Согласно акту стендового испытания,

проведенного в ОАО «Волгабурмаш», долото, собранное по типу упорядоченной сборки, имеет показатель по ресурсу выше на 15% чем ресурс аналогичного долота, собранного по серийной технологии и испытанного ранее при тех же режимах.

Выводы по работе

1. Предложен метод упорядоченной сборки, который позволяет выбрать оптимальные параметры соединений (структуру комплектов роликов m , угол разворота комплекта φ , величину диаметрального зазора для малой и большой роликовых дорожек X_a), обеспечивая максимально возможные значения расчетного ресурса изделия.

2. Установлена связь внешних циклических нагрузок со структурой роликовых опор, которая выражается через эффекты однозначности структурной ориентации сопрягаемых деталей с заданной функциональностью, что позволяет сократить влияние случайного фактора на сборочный процесс.

3. Выявлены закономерности между значениями расчетного ресурса и параметрами сборки участвующих в парных взаимодействиях роликов. Данные закономерности использованы при комплектовании роликов и их взаимной ориентации и объясняют изменение значений расчетного ресурса в зависимости от структурных параметров сборки, включающих число роликов, которые участвуют в формировании длины цикла комплекта.

4. Установлено наличие жестких кинематических связей между роликами и роликовыми дорожками при отсутствии сепаратора в опорах. Этот результат получен благодаря корреляционному анализу деформационного следа, оставленного роликами на роликовых дорожках. С учетом данного свойства контакти-

рования роликов стал возможным выбор оптимального параметра угловой ориентации комплектов роликов исходя из степени взаимосвязи между структурой комплектов роликов и циклами внешних нагрузок.

5. Выявлены конструктивно-технологические особенности каждой секции изделия, которые, используя оценку расчетного значения параметров ресурса, позволили оптимизировать параметры сборки под сварку секций с целью обеспечения равной нагруженности опор.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Журавлев А.Н.* Упорядоченная сборка двухрядных роликовых опор // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2004. №10.
2. Трение, изнашивание и смазка: Справочник: В 2 кн./Под ред. *И.В. Крагельского, В.В. Алесина.* М.: Машиностроение, 1978.
3. *Макарова Н.В., Трофимец В.Я.* Статистика в Excel. М.: Финансы и статистика, 2002.

ORDERED ASSEMBLY OF ROCK BIT BEARINGS

© 2005 A.N. Zhuravlev, I.K. Ryltsev

Samara State Technical University

The new type of rock bit roller bearing assembly is proposed. It allows to estimate the assembled product life at the stage of its manufacture.