**КРИТЕРИИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ВООРУЖЕНИЯ БУРОВЫХ
ШАРОШЕЧНЫХ ДОЛОТ****THE CRITERIA OF PERFORMANCE OF DRILLING ROLLER
BIT CUTTING STRUCTURE****В. А. Пяльченков**

V. A. Pyalchenkov

Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень

Ключевые слова: бурение; долото; шарошка; вооружение; опора; разрушение; износ
Key words: drill; chisel; cone; drilling bit cutting structure suspension; destruction; wear

От долговечности вооружения шарошек, непосредственно разрушающего горную породу, во многом зависят основные показатели эффективности процесса бурения. Поэтому изучению критериев работоспособности вооружения шарошечных долот посвящено значительное число исследований. Наиболее полно исследованы вопросы долговечности долот с фрезерованным вооружением [1, 2, 3, 4]. Шарошечные долота, оснащенные твердосплавным вооружением, имеют существенные отличия в характере разрушения и повреждения зубков, материал которых хорошо противостоит абразивному изнашиванию, но, имея сравнительно низкую ударную вязкость и невысокое сопротивление действию растягивающих напряжений, имеют склонность к хрупкому разрушению [5, 6].

В процессе бурения шарошки долота перекатываются по забою, и зубки последовательно входят в контакт с породой, подвергаясь при этом сложному силовому воздействию. При взаимодействии зубка с забоем силы, действующие на зубок со стороны разрушаемой породы, постоянно изменяются, изменяя напряженное состояние материала зубка. В результате продольных колебаний долота, вызываемых рядом причин, взаимодействие зубков с породой носит ударный характер [2, 7, 8, 9]. Кроме того, зубки вооружения шарошек не только перекатываются, но и проскальзывают по забою, что приводит к их изнашиванию. Анализ состояния твердосплавного вооружения отработанных в стендовых и промысловых условиях долот различной конструкции, проведенных разными авторами [5,10,11,12], показал, что в процессе работы имеют место самые

разнообразные виды изнашивания и разрушения. В работе [5] установлена следующая классификация видов повреждения и разрушения твердосплавного вооружения долот: ударно-усталостное изнашивание, вызывающее сколы и поломки зубков; абразивное изнашивание; ударно-абразивное изнашивание; гидроабразивное изнашивание; раздавливание зубков; выпадение зубков.

Причем лимитирующим видом изнашивания и разрушения зубков шарошечных долот является ударно-усталостное изнашивание. Большинство исследователей также отмечают, что изменение формы и размеров рабочих поверхностей твердосплавных зубков в процессе абразивного, гидроабразивного и ударно-абразивного изнашивания незначительно и практически не оказывают влияния на их работоспособность. Имеющие место в практике бурения выпадения зубков из тела шарошки и их влияние на работоспособность твердосплавного вооружения по мере совершенствования конструкции и технологии закрепления зубков снижаются.

Анализ литературных источников позволяет сделать вывод о том, что потеря работоспособности твердосплавного вооружения шарошечных долот происходит главным образом в результате разрушения зубков. Эти разрушения имеют весьма разнообразный характер. В работе [13] предлагается все виды разрушения разделить на три группы: поломки; сколы; раздавливание.

Предполагается, что причиной поломок и сколов является действие изгибающего момента, а раздавливание зубков происходит под действием высоких сжимающих нагрузок. В работе [5] высказывается предположение, что сколам и поломкам предшествует выкрашивание рабочих поверхностей зубков, появляющееся в начальный период работы долота на забое. В работе [14] предлагается классифицировать виды разрушения твердосплавных зубков в зависимости от характера внешнего силового воздействия:

- разрушение зубков под действием сжимающих напряжений;
- разрушение зубков под действием касательных напряжений;
- выкрашивание зубков под действием однократных и многократных перегрузок.

Однако такая классификация достаточно условна, так как в реальных условиях взаимодействия долота с забоем зубки находятся в сложном напряженном состоянии, и на них одновременно действует сложный комплекс нормальных и касательных напряжений, вызывающих их разрушение. Исследуя форму поверхности разрушения твердосплавных зубков, автор работы [5] указывает, что на поверхности разрушения можно выделить «две характерные зоны разрушения: зоны зарождения повреждений на поверхности зубков и зоны быстрого развития трещин». Это позволяет автору сделать вывод о том, что разрушение зубков носит главным образом усталостный характер. На долговечность вооружения шарошечных долот и эффективность разрушения горной породы существенное влияние оказывают форма и размеры породоразрушающих элементов. Наиболее полно изучены закономерности разрушения горной породы при статическом и динамическом вдавливании инденторов различной формы в блок горной породы [4, 8, 15].

Результаты исследования по разрушению горных пород при бурении приводятся в работе [16]. Изучению породоразрушающих и прочностных характеристик твердосплавных зубков различной формы посвящена работа [6]. Здесь предпринята попытка выбрать комплексный критерий оценки работоспособности твердосплавных зубков различной формы. На основании этого критерия автором предлагаются твердосплавные зубки с новой, более оптимальной, по его мнению, формой породоразрушающей поверхности. Наиболее существенное влияние на эффективность процесса разрушения горной породы и прочность твердосплавного вооружения шарошечных долот оказывают такие основные параметры вооружения, как диаметр и шаг зубков, величина межвенцовых зазоров, вылет зубков над телом шарошки, схема расположения зубков по венцам и венцов по шарошкам. С момента появления шарошечных долот с твердосплавным вооружением в нашей стране и до настоящего времени

ведутся исследования по оптимизации перечисленных выше основных параметров твердосплавного вооружения. Большая работа по совершенствованию конструкции твердосплавного вооружения долот проведена во ВНИИБТ. С целью определения влияния основных параметров вооружения на эффективность процесса бурения были проведены стендовые и промышленные испытания нескольких серий специально разработанных долот, отличающихся друг от друга лишь одним параметром при неизменности остальных [3]. Это позволило исключить возможность взаимного влияния параметров и получить общие рекомендации по выбору их оптимальных значений. Известны также и другие работы, посвященные изучению влияния параметров твердосплавного вооружения на эффективность работы долот. Большинство этих работ посвящено изучению таких параметров, как диаметр и шаг зубков, расположение зубков по венцам и выбору оптимальных величин этих параметров в соответствии с физико-механическими свойствами разбуриваемых пород. Недостаточно изученным, на наш взгляд, остается вопрос о влиянии размещения венцов на шарошках по радиусу забоя на эффективность бурения и долговечность вооружения долот. В настоящее время размещение венцов на шарошках производится исходя из требования необходимого перекрытия забоя с учетом необходимости равномерного размещения вооружения по шарошкам. На прочностные характеристики твердосплавных зубков существенное влияние оказывает качество их поверхностей. Наличие дефектов в поверхностном слое, являющихся концентраторами напряжений, приводит к интенсификации процесса разрушения зубков. Прочность твердосплавных зубков зависит и от других технологических факторов, например от способа запрессовки зубков [14]. В работе [5] установлено также, что на долговечность твердосплавных зубков влияет жесткость соединения «зубок — шарошка». Уменьшение этой жесткости позволяет повысить долговечность твердосплавного вооружения. Таким образом, долговечность твердосплавного вооружения, лимитируемая разрушением зубков, зависит от большого числа конструктивных и технологических факторов. В известных исследованиях достаточно подробно изучен общий характер разрушений твердосплавных зубков шарошечных долот. Однако большинство исследователей не ставили перед собой задачу анализа количества разрушенных зубков на каждом венце каждой шарошки исследуемого долота. Кроме того, исследования проводились в разные годы на долотах различных типов и размеров, имеющих существенные различия в конструкции вооружения и опорных узлов, поэтому даже имеющиеся в литературе данные затруднительно использовать.

Многими исследователями также установлен неравномерный износ и разрушение элементов вооружения и опорных узлов шарошек. Неравномерный износ наблюдается как при отработке долот, имеющих фрезерованное вооружение [3, 4, 5, 8], так и при отработке долот со штыревым твердосплавным вооружением [5, 13]. При промышленной отработке первых конструкций шарошечных долот с твердосплавным вооружением отмечался их неравномерный износ. Долота выходили из строя главным образом из-за износа вершины первой шарошки, скалывания зубков на периферийных венцах и заклинивания опор шарошек. В последующих конструкциях долот за счет изменения геометрической формы шарошек, увеличения диаметров зубков и изготовления вершин на всех трех шарошках удалось снизить неравномерность износа и разрушения твердосплавного вооружения и повысить эффективность работы долот. Однако полностью устранить неравномерный износ и разрушение твердосплавного вооружения не удастся. В работе [16] отмечается, что наиболее подвержены разрушениям зубки, расположенные на периферийных венцах. К сожалению, количественные данные о разрушениях зубков на венцах и шарошках долот в работе не приводятся.

Как показали исследования [3, 5, 17, 18], интенсивность изнашивания элементов опорных узлов и вероятность заклинивания опор шарошек существенно зависят от первоначальных величин радиальных и осевых зазоров в подшипниках.

Величины же этих зазоров могут изменяться довольно существенно даже в пределах технологического допуска. Поэтому, на наш взгляд, однозначно нельзя объяснить неравномерность износа опор по секциям только технологическими погрешностями изготовления. Таким образом, неравномерность изнашивания и разрушения элементов вооружения и опорных узлов шарошек можно объяснить действием конструктивных и технологических факторов, приводящих к неравномерному распределению усилий по секциям долота и по элементам вооружения и опор шарошек [19, 20, 21]. Неравномерность изнашивания вооружения долот может объясняться и различной величиной проскальзывания венцов шарошек [4, 16, 22]. С увеличением величины проскальзывания интенсивность изнашивания вооружения возрастает. Вместе с тем, проскальзывание существенно изменяет и силовые характеристики процесса взаимодействия вооружения с забоем [14, 23]. С увеличением глубины внедрения зубков возрастает и доля тангенциальной составляющей усилия, действующего на зубок при проскальзывании его по забою [14, 24, 25]. А так как наибольшее проскальзывание из-за несовершенной формы конусов шарошек наблюдается у периферийных венцов [16, 22], то тангенциальные составляющие усилий на зубках периферийных венцов будут больше, чем на зубках средних венцов. Исходя из предположения, что различной степени износа и разрушения рабочих элементов вооружения и опоры соответствуют и различные значения действующих на них нагрузок, а в ряде случаев и перегрузок, весьма важным является изучение характера и степени неравномерности распределения нагрузки по элементам долота и вызывающих ее причин. Знание нагрузочных характеристик элементов шарошечного долота при взаимодействии его с забоем позволит научно обоснованно подходить к вопросам совершенствования вооружения и подшипников опорных узлов шарошек в части рационального их размещения, которое исключало бы перегрузку отдельных рабочих элементов. В известных исследованиях достаточно подробно изучен общий характер разрушений твердосплавных зубков шарошечных долот. Однако большинство исследователей не ставили перед собой задачу определения количества разрушенных зубков на каждом венце каждой шарошки исследуемого долота. Кроме того, исследования проводились в разные годы на долотах различных типов и размеров, имеющих существенные различия в конструкции вооружения и опорных узлов, поэтому даже имеющиеся в литературе данные затруднительно использовать. В связи с этим для получения комплексной качественной и количественной картины изнашивания и разрушения твердосплавного вооружения шарошечных долот нами были обследованы 250 долот типа Ш215, 9ТКЗ-ЦВ-3 и 100 долот типа Ш215, 9К-ПВ, отработанных в промысловых условиях. Степень износа и разрушения вооружения шарошек устанавливалась в результате измерения высоты и определения количества разрушенных зубков отдельно на каждом венце каждой шарошки. Схемы вооружения шарошек исследуемых долот и принятые обозначения венцов приведены на рис.1.

Рис. 1. Схемы вооружения шарошек долот Ш215, 9К-ПВ (а) и Ш215, 9ТКЗ-ЦВ (б)

Исследования показали, что хотя в большинстве случаев работоспособность долот ограничивается стойкостью опоры, долговечность вооружения долот также является недостаточной. Так, из 250-ти обследованных долот Ш215,9ТКЗ-ЦВ 105 долот были полностью сработаны и по опоре, и по вооружению. Характерными причинами потери работоспособности твердосплавных зубков исследованных долот являются их разрушения в результате частичных сколов рабочей поверхности и поломок зубьев. По сложному рельефу поверхностей излома можно предположить, что во многих случаях поломки зубков происходят в результате нескольких частичных сколов. Абразивный износ развивается медленно, вызывая незначительные изменения их размеров и формы. Интенсивное абразивное изнашивание вооружения наблюдается лишь в случаях заклинивания опор шарошек. Выпадение твердосплавных зубков из тела шарошек наблюдалось редко. Следовательно, основной причиной выхода из строя твердосплавного вооружения являются сколы и поломки зубков.

В таблице 1 приведены средние данные по количеству разрушенных зубков в процентах от общего числа зубков на венцах шарошек обследованных долот.

Таблица 1

Состояние вооружения отработанных долот

Тип долота	Номер шарошки	Количество разрушенных зубков, %				
		Венец А	Венец Б	Венец В	Венец Г	В среднем по шарошке
Ш215, 9К-ПВ	I	16,0	42,3	39,5	23,3	30,3
	II	16,7	32,5	38,1	21,5	27,2
	III	25,2	23,9	39,4	15,7	26,1
Ш215, 9ТКЗ-ЦВ-3	I	20,0	32,6	33,0	38,5	31,0
	II	17,6	34,3	39,6	-	30,5
	III	16,0	17,9	42,0	37,2	22,8

Количество разрушенных зубков на различных венцах неодинаково. Для долот Ш215, 9К-ПВ наибольшая доля разрушенных зубков приходится на средние венцы. Так, на первой шарошке долота на венцах Б и В разрушено соответственно 42,3 и 39,5 % зубков, в то время как на венцах А и Г лишь 16,0 и 23,3 %. Для долот типа ТКЗ наибольшая доля разрушений зубков приходится на периферийные и средние венцы, а количество разрушенных зубков на вершинных венцах невелико. У долот типа ТКЗ преобладающим видом разрушения зубков являются поломки. На рис. 2 приведены типичные случаи разрушения вооружения отработанных долот обоих типов.

Рис. 2. Типичные случаи разрушения вооружения отработанных долот Ш215, 9К-ПВ (а) и Ш215,9ТКЗ-ЦВ-3 (б)

Доля разрушенных зубков, приходящаяся в среднем на каждую шарошку, также неодинакова. Наибольшее количество разрушенных зубков у долот обоих типов приходится на первую шарошку.

Вместе с износом и разрушением твердосплавных зубков в обследованных долотах имел место значительный износ опорных поверхностей шарошки, цапфы и тел качения. Это, в свою очередь, приводит к появлению в опоре долот чрезмерных радиальных и осевых зазоров, при которых зачастую происходит выпадение тел качения, разворот роликов и заклинивание шарошек. В таких случаях долото становится непригодным к дальнейшей эксплуатации. Кроме того, при чрезмерном износе шарикового (замкового) подшипника увеличение осевого люфта может привести к зацеплению венцов соседних шарошек, вызывающему скол зубков. Была произведена также оценка состояния опоры по значениям осевого и радиального люфтов, при которых происходило выпадение тел качения, и по количеству заклиненных шарошек. Эти данные сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Состояние опор отработанных долот

Тип долота	Кол-во долот	Кол-во секций	Номер шарошки	Количество шарошек в % к общему числу обследованных		
				осевой люфт >5 мм	выпадение тел качения	заклинивание шарошек
Ш215, 9К-ПВ	100	300	I	8	10	36
			II	10	14	24
			III	4	4	30
Ш215,9ТКЗ-ЦВ-3	250	750	I	2,8	7,2	43,6
			II	3,2	3,2	42,4
			III	3,2	4,4	38,8

Наиболее частой причиной выхода из строя опор исследованных долот является заклинивание (см. табл. 2). Если считать, что шарошки с заклиненной опорой и с выпавшими из них телами качения являются непригодными для дальнейшей эксплуатации, то наиболее часто по этим причинам выходит из строя первая шарошка обоих типов долот, составляя 46 и 50,8 % соответственно для долот Ш215, 9К-ПВ и долот Ш215, 9ТКЗ-ЦВ-3. Обследование показало, что износ опор шарошек происходит весьма неравномерно. Так, если за 100 % принять общее количество долот типа К, непригодных к дальнейшей эксплуатации из-за чрезмерного износа опор шарошек, то у 38 % долот окончательно вышла из строя только опора одной шарошки, у 28 % — двух шарошек и только у 34 % долот вышли из строя опоры всех трех шарошек.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлена значительная неравномерность изнашивания и разрушения твердосплавного вооружения долот, как по венцам, так и по шарошкам, а опорных узлов по секциям. У долот Ш215, 9К-ПВ наибольшее количество зубков разрушается на средних венцах всех шарошек. У долот Ш215, 9ТКЗ-ЦВ-3 наибольшее количество разрушений происходит на средних и периферийных венцах. В целом по шарошкам наибольшая доля разрушений зубков для долот обоих типов приходится на первую шарошку. Наиболее часто также выходят из строя и опорные узлы первых шарошек. Полученные результаты хорошо коррелируют с результатами аналитических и экспериментальных исследований загруженности вооружения и опор шарошечных долот [23, 24, 25, 26].

Список литературы

1. Беликов В. Г., Посташ С. А. Рациональная отработка и износостойкость шарошечных долот. – М.: Недра, 1972. – 160 с.
2. Виноградов В. Н., Сорокин Г. М., Пашков А. Н., Рубарх В. М. Долговечность буровых долот. – М.: Недра, 1977. – 256 с.
3. Мокшин А. С., Владиславлев Ю. Е., Комм Э. Л. Шарошечные долота. – М.: Недра, 1971. – 216 с.
4. Симонов В. В., Выхребцов В. Г. Работа шарошечных долот и их совершенствование. – М.: Недра, 1975. – 240 с.
5. Беляев А. И. Исследование технологических процессов сборки шарошек буровых долот с твердосплавным вооружением: дис... канд. техн. наук. – М., 1977. – 205 с.
6. Богомолов Р. М. Исследование работоспособности твердосплавного вооружения шарошечных долот: автореф. дис. канд. техн. наук. – М., 1975. – 22 с.
7. Балицкий П. В. Взаимодействие бурильной колонны с забоем скважины. – М.: Недра, 1975. – 293 с.
8. Мавлютов М. Р. Разрушение горных пород при бурении скважин. – М.: Недра, 1978. – 215 с.
9. Симонов В. В., Юнин Е. К. Влияние колебательных процессов на работу бурильного инструмента. – М.: Недра, 1977. – 216 с.
10. Линдо Г. В. Исследование эксплуатационной стойкости и совершенствование твердосплавных зубков для шарошечных долот: автореф. дис. канд. техн. наук. – М., 1972. – 26 с.
11. Неупокоев В. Г. Вопросы теории и практики проектирования, производства и эксплуатации буровых шарошечных долот. – Самара: Изд-во Самарского науч. центра РАН, 2000. – 376 с.
12. Попов А. Н., Спивак А. И., Трушкин Б. Н. Изучение механических процессов в горных породах и породоразрушающих инструментах при бурении скважин // Нефтяное хозяйство. – 2002. – № 11. – С. 36-38.
13. Патрикеева Э. М. Исследование влияния некоторых технологических факторов на стойкость штыревых шарошечных долот: автореф. дис. канд. техн. наук. – М., 1966. – 19 с.
14. Михайлин Ю. Г. Исследование и разработка шарошечных долот с зубками из твердого сплава: Автореф. дис. канд. техн. наук. – М., 1980. – 19 с.
15. Спивак А. И., Попов А. Н. Разрушение горных пород при бурении скважин: учеб. для вузов. – М.: Недра, 1994. – 261 с.
16. Эйгелес Р. М. Разрушение горных пород при бурении. – М.: Недра, 1971. – 103 с.
17. Пяльченков В. А. Моделирование загруженности подшипников опоры шарошечного долота // Механика и процессы управления: материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2015. – С. 105-109.
18. Пяльченков В. А. Исследование распределения нагрузки между подшипниками опоры шарошечного долота с использованием фотоупругой модели // Известия вузов. Нефть и газ. – 2014. – № 1. – С. 57-61.
19. Пяльченков В. А. Аналитическое определение реакций в опорах шарошечного долота // Известия вузов. Нефть и газ. – 2014. – № 3. – С. 66-72.
20. Пяльченков В. А. К оценке долговечности подшипников опоры шарошечного долота // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.science-education.ru/120-16677 (дата обращения: 08.01.2015).
21. Пяльченков В. А. Аналитическое исследование деформируемости деталей шарошечного долота // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.science-education.ru/121-17246 (дата обращения: 02.02.2015).
22. Биланенко Н. А. Установление оптимальных кинетических характеристик шарошечных долот с целью повышения эффективности бурения скважин: дис... канд. техн. наук. – Ташкент, 1994. – 219 с.
23. Пяльченков В. А. Методы исследования нагруженности вооружения и подшипников опоры шарошечных долот // Известия вузов. Нефть и газ. – 2015. – № 1. – С. 88-95.
24. Пяльченков В. А. Повышение работоспособности шарошечных долот путем рационального распределения нагрузок по элементам вооружения: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Российский государственный университет нефти и газа имени И. М. Губкина. – Москва, 1983. – 216 с.
25. Долгушин В. В. Развитие методологии моделирования процессов технологии бурения и скважинных механизмов: автореф. дис.... докт. техн. наук. – Тюмень, 2008. – 260 с.
26. Пяльченков В. А. Повышение работоспособности шарошечных долот путем рационального распределения нагрузок по элементам вооружения: автореф. дис.... канд. техн. наук. – Москва, 1983. – 23 с.

Сведения об авторе

Пяльченков Владимир Алексеевич, к. т. н., доцент кафедры «Прикладная механика», Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень, тел. 8(3452)200790, e-mail: pial228@rambler.ru

Information about the authors

Pialchenkov V.A., Candidate of Science in Engineering, associate professor of the chair «Applied mechanics», Tyumen State Oil and Gas University, phone: 8(3452)200790, e-mail: pial228@rambler.ru