

ТЕХНОЛОГИЯ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

УДК 621.785

Г.Я. БЕЛЯЕВ, Г.Г. ЕЖЕНКОВ, Н.М. СКИБА,
Е.Н. СТАШЕВСКАЯ, М.А. ЧЕБЛУКОВ, В.Н. АНДОСКИН,
Н.Д. ДЕРКАЧ, Н.М. БУТЫРЕВ

ФОРМИРОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЯХ ТЕРМОСТОЙКИХ ОПОР ЗАБОЙНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Повышение термостойкости забойного двигателя (турбобура) – одна из важнейших задач в решении комплекса вопросов, связанных с бурением сверхглубоких (СГ) скважин. Опыт эксплуатации забойных двигателей при бурении Кольской СГ-3 показал, что, начиная с глубины 8...9 тыс. м, происходит заметное уменьшение их межремонтного периода. Это связано в первую очередь с увеличением забойной температуры (на указанной глубине бурения она составила 180...190 °С). Наиболее уязвимыми в этих условиях оказались опорные узлы двигателя – резинOMETаллические радиальные опоры скольжения.

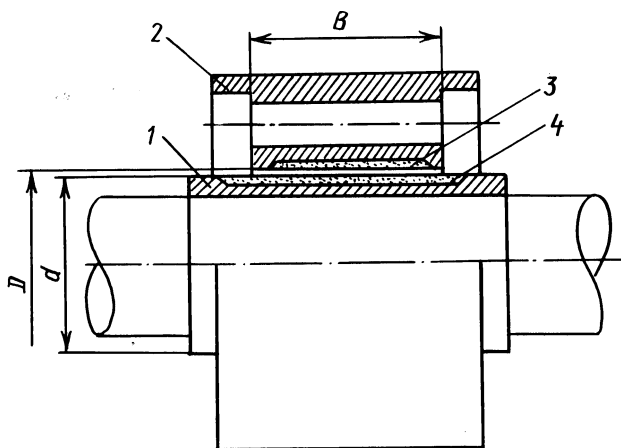


Рис. 1. Термостойкая опора забойного двигателя:

1 – втулка вала; 2 – наружная втулка; 3 и 4 – износостойкое покрытие

На рис. 1 представлена конструкция термостойкой радиальной опоры турбины секции забойного двигателя. Поверхности трения опоры должны быть защищены износостойким покрытием. Работа по его формированию проводилась по трем направлениям.

1. По технологии БашНИИНП износостойкие покрытия из металллокерамического антифрикционного сплава на радиальных опорах формировались методом спекания. Износостойкий слой содержит карбид вольфрама, кобальт, никель, медь и хром. Спекание проводили в защитной атмосфере водорода [1].

2. В Пермском филиале ВНИИБТ за основу была принята технология получения защитных покрытий борид никеля – никель. Рабочая поверхность наружной обоймы подвергалась диффузионному борированию. Рабочая поверхность внутренней обоймы в процессе электрохимического осаждения покрывалась никель-боридным слоем толщиной 0,5...0,8 мм.

3. В БПИ использовалась технология формирования покрытий газотермическим напылением и индукционной центробежной наплавкой. Работа предусматривала: выбор материалов и методов формирования покрытий; проведение комплекса предварительных лабораторных исследований, включающих испытание материалов по ускоренной методике на износостойкость в условиях гидроабразивного и кавитационного воздействий и трения скольжения при определенных температурах и давлениях; упрочнение экспериментальной партии деталей; определение их работоспособности при эксплуатации на Кольской СГ-3. В качестве материала покрытия были выбраны порошковые самонапыляющиеся твердые сплавы (ПСТС) на никелевой основе, которые используются прежде всего как заменители стеллитов или в тех случаях, когда применение сормайттов неэффективно.

Для предварительного выбора марки сплава, наиболее приемлемого для упрочнения радиальных опор, предназначенных для натуральных испытаний, был проведен комплекс лабораторных исследований упрочняющих покрытий.

Для испытаний на гидроабразивную и кавитационную стойкость была изготовлена партия образцов с покрытием из ПСТС (ПГ-СР2, ПГ-СР3, ПГ-СР4) по специальной методике, для чего на пластины из стали 45 размером 160 × 120 × 7,5 мм после их дробеструйной обработки напыляли на плазменной и газоплазменной установках покрытия толщиной 0,8...3 мм. Полученные покрытия оплавливали с целью ликвидации открытой пористости и повышения термомеханических свойств при температуре 1030...1080 °С, соответствующей интервалу кристаллизации этих сплавов в присутствии жидкой и твердой фаз. Оплавление выполняли тремя способами: газовой горелкой, путем высокочастотного нагрева и в электропечи сопротивления. Затем пластины охлаждали в термостате, разрезали на квадраты со стороной 20,5 мм, шлифовали все плоскости ($Ra = 0,08...0,16$ мкм). Микрошлифы изготавливались по известной методике [2].

Исследования гидроабразивной и кавитационной стойкости образцов проводили на специальных установках [3–5].

Схема ротора установки гидроабразивного воздействия показана на рис.2. Угол атаки $\alpha = 60^\circ$, расстояние от образца до среза сопла $a = 10$ мм и от среза сопла до оси вращения ротора $l = 140$ мм, частота вращения ротора – $26,7 \text{ с}^{-1}$, расход воды (для двух образцов) – 0,1 л/с, расход абразива (песок) – 5 г/с, размер абразивных частиц – 0,3 мм, расчетная скорость потока – 23,5 м/с, продолжительность одного цикла испытания – 300 с, число циклов для одного образца – 10.

Износостойкость образцов определяли по потере их массы при взвешивании на аналитических весах марки ВЛА-200г-М с точностью до 0,1 мг [5].

При проведении экспериментов не была выявлена зависимость износостойкости ПСТС от метода формирования покрытия (рис. 3).

Установлено, что при определенном уровне кавитационного воздействия наибольшей эрозионной стойкостью обладает сплав ПГ-СР2 [5]. При анализе кривой кинетики эрозии этого сплава выявлены три характерных периода: первый — до 30 мин, образец интенсивно изнашивается; второй — до 5 ч, эрозия не наблюдается; третий — в течение 15 ч, скорость эрозии остается практически постоянной. При увеличении внешней энергии (уровня кавитационного воздействия за счет изменения характеристик магнитоотрикссионного вибратора) наблюдается инверсия в ряду износостойкости испытываемых сплавов [5]. Это можно объяснить, по-видимому, изменением характера разрушения поверхностных слоев, которое определяется обычно сочетанием усталостного разрушения, прилагаемых нагрузок и коррозии. Так, например, вязкость материала может быть исчерпана как при однократном, так и при многократном приложении нагрузок. При принятом уровне кавитационной нагрузки наблюдается снижение уровня износостойкости сплава ПГ-СР2, в то время как для сплава ПГ-СР4 эта характеристика остается практически без изменения.

Скорость кавитационной эрозии в период равномерного разрушения упрочненной поверхности образцов составила: для сплава ПГ-СР2 — 0,0339 мг/с, ПГ-СР3 — 0,0201, СНГН — 0,0107, ПГ-СР4 — 0,0076 мг/с.

При испытании сплавов на гидроабразивную износостойкость инкубационный период не был выявлен. Скорость изнашивания при этом, как правило, постоянная. Износостойкость сплава СНГН мало отличается от износостойкости ПГ-СР4.

Скорость гидроабразивной эрозии для сплава ПГ-СР2 составила 0,1864 мг/с, ПГ-СР3 — 0,1342, СНГН — 0,1004, ПГ-СР4 — 0,0912 мг/с.

Из проведенных исследований следует, что наибольшей кавитационной и гидроабразивной стойкостью обладает сплав ПГ-СР4.

Для испытания в условиях трения скольжения при температуре окружающей среды от 20 до 600 °С, давлении до 10 МПа и скоростях скольжения от 0,05 до 2 м/с была модернизирована машина трения МИ-1М и изготовлена партия образцов размерами 5 × 5 × 15 мм с покрытиями из сплавов ПГ-СР2 и ПГ-СР4, а также из стали 4Х13, применяемой обычно для изготовления деталей, работающих в условиях высоких температур. Перед испытанием все образцы шлифовались на плоскошлифовальном станке и прирабатывались на самой установке. При испытаниях они служили неподвижной колодкой.

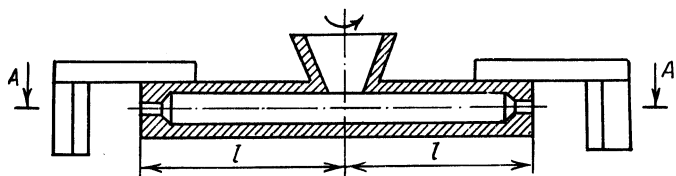


Рис. 2. Схема ротора установки для исследования гидроабразивного изнашивания

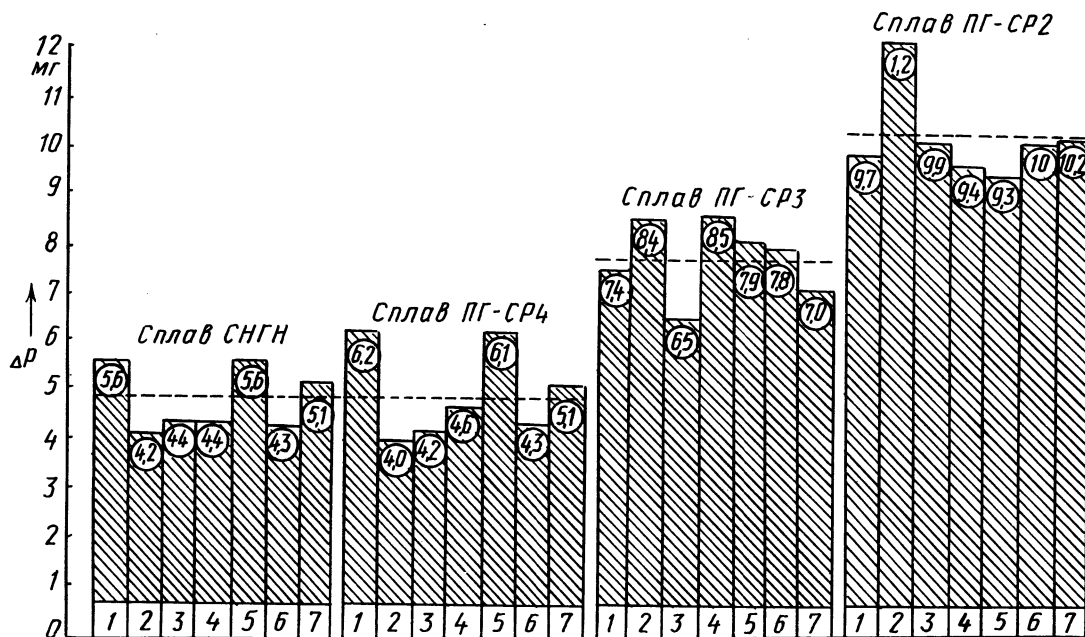


Рис. 3. Гидроабразивная стойкость покрытий из ПСТС при формировании их разными способами:

1 – наплавка; 2 – плазменное напыление + печное оплавление; 3 – плазменное напыление + оплавление ТВЧ; 4 – плазменное напыление + газопламенное оплавление; 5 – газопламенное напыление + печное оплавление; 6 – газопламенное напыление + оплавление ТВЧ; 7 – газопламенное напыление + газопламенное оплавление

Т а б л и ц а 1

Параметр	Температура окружающей среды, °С	Скорость скольжения, м/с	Давление, МПа
Кодовое обозначение	x_1	x_2	x_3
Основной уровень	400	1,25	2,2
Интервал варьирования	120	0,45	1,1
Верхний уровень	520	1,7	3,3
Нижний уровень	280	0,8	1,1
Звездная точка	(+1,682) 600	2	4
	(-1,682) 200	0,5	0,4

Контртело изготовлялось из твердого сплава ВК8 (диск диаметром 40 мм и толщиной 5 мм). Износ образцов определяли методом линейного измерения.

Исследования износостойкости проводились с применением математического планирования эксперимента. За параметр оптимизации y был принят линейный износ, а факторами оптимизации были температура окружающей среды x_1 , скорость скольжения x_2 и давление x_3 . Условия проведения эксперимента приведены в табл. 1.

Перед испытанием образцы предварительно нагревались до заданной температуры. В процессе испытания температура среды поддерживалась постоянной.

Каждый результат является средним из пяти измерений. Опыты рандомизированы во времени. Дисперсия воспроизводимости $S^2\{y\}$ определялась по результатам 6 опытов в нулевой точке [6].

Были получены следующие зависимости:
для сплава ПГ-CP4

$$y = 341,1 + 198,7x_1 + 218,1x_2 + 203,5x_3 + 1117,5x_1x_2 + 119,4x_1x_3 + 123,4x_2x_3 + 75,8x_1x_2x_3 + 102,2x_1^2 - 7x_2^2 + 10,4x_3^2 + 32,7x_1^3 - 3,5x_2^3 - 4,0x_3^3; \quad (1)$$

для сплава ПГ-CP2

$$y = 804,8 + 365,8x_1 + 351,8x_2 + 337,3x_3 + 19,8x_1x_2 + 159,8x_1x_3 + 163,8x_2x_3; \quad (2)$$

для пары П1-CP2 – ПГ-CP2

$$y = 1188,9 - 173,9x_1 + 876,6x_2 + 414,9x_3 - 72x_1x_2 + 108x_1x_3 + 360x_2x_3 + 123,8x_1x_2x_3 - 92,8x_1^2 - 91,7x_2^2 + 355,2x_3^2 + 186,7x_1^3 - 157,2x_2^3 + 228,9x_3^3; \quad (3)$$

для стали 4X13

$$y = 260,3 - 433,3x_1 + 1863x_2 + 14275,3x_3 - 678x_1x_2 + 906,50x_2x_3. \quad (4)$$

При анализе уравнений (1)...(4) и кривых на рис. 4 видно, что наибольшую износостойкость при данных режимах испытаний имеет сплав ПГ-СР4, затем следует сплав ПГ-СР2. Наименьшая износостойкость у покрытий из стали 4Х13.

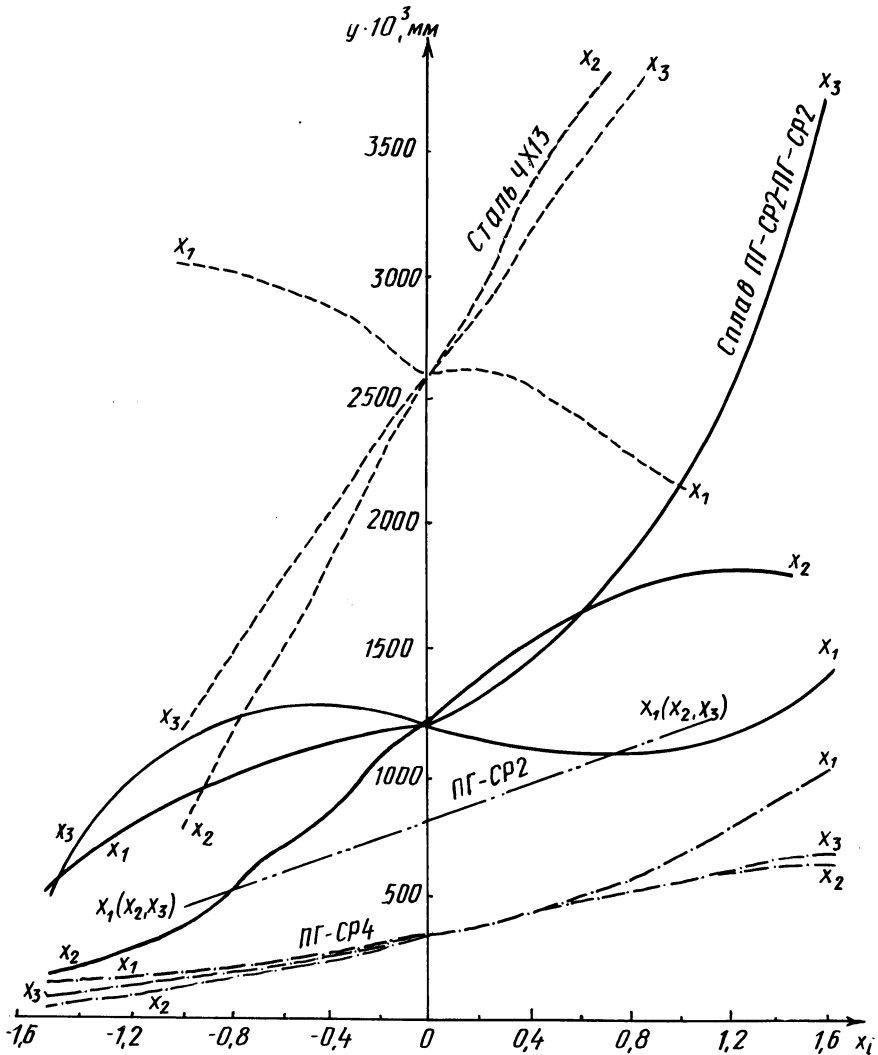


Рис. 4. Износ при различных режимах испытаний

С учетом результатов проведенных опытов сплавом ПГ-СР4 была упрочнена опытная партия радиальных опор. На внутренние втулки покрытия наносили методом напыления с последующим оплавлением, а на наружные — индукционной центробежной наплавкой специальной шихты на основе сплава ПГ-СР4.

Для проведения сравнительных испытаний все опытные опоры были отправлены на Кольскую сверхглубокую скважину и установлены в редукторных турбобурах ТРМ-195Т. Четыре радиальные опоры шпинделя, выполненные по технологии БПИ, и одна — по технологии БашНИИНП — были установлены в промежуточном шпинделе № 44. Двумя радиальными опорами ВНИИБТ была укомплектована редукторная вставка турбобура РМ1-195Т № 3 и четырьмя опорами БПИ — редукторные вставки № 48 и 50.

Испытания турбобуров с опытными опорами проводились на СГ-3 при глубине скважин от 9830 до 12000 м и температуре призабойной зоны до 230 °С.

В целом ресурс твердосплавных опор, используемых в редукторном турбобуре, значительно возрос.

Опоры шпинделя № 1...4, выполненные по технологии БПИ, отработали 280 ч и сохранили работоспособность. Скорость их изнашивания в среднем составила 0,0043 мм/ч, опор № 5 и 6 — 0,0041 мм/ч. Опоры № 7 и 8 отработали по 240 ч, сохранив работоспособность, замеры износа не производились, так как они находились в работе.

Радиальная опора, изготовленная по технологии БашНИИНП, находилась в работе более 300 ч. Общий ее износ после 220 ч работы составил 0,8 мм (скорость изнашивания 0,0036 мм/ч). Опора находилась в работоспособном состоянии.

Опоры скольжения № 9 и 10, выполненные по технологии ПФ ВНИИБТ, отработали по 380 ч и вышли из строя в результате отслоения покрытия и появления продольных трещин на наружных втулках. Износ составил 3,5 мм. На некоторых участках внутренних втулок имел место предельный износ никельборидного покрытия.

Поверхности трения отработанных опор БПИ и БашНИИНП без задиров, риск, параметр шероховатости поверхности $Ra = 2,5 \dots 1,25$ мкм. По замерам основных размеров построен график зависимости износа радиальных опор от продолжительности их работы (рис. 5). На основании его анализа бо-

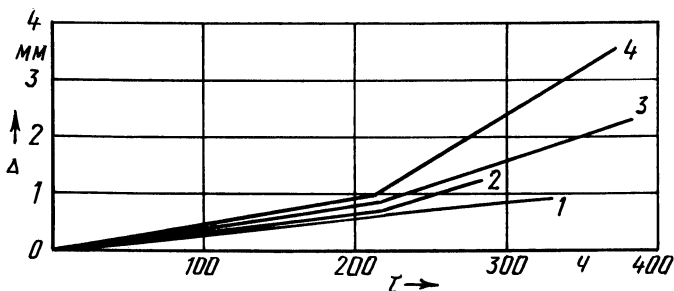


Рис. 5. Зависимость износа радиальных опор от продолжительности испытаний:

1 — опора БашНИИНП; 2 — опора БПИ; 3, 4 — опоры ПФ ВНИИБТ

лее износостойкой и надежной оказалась радиальная опора, изготовленная методом спекания по технологии БашНИИ НП. Но при этом необходимо отметить технологическую сложность получения защитного покрытия.

Скорость изнашивания радиальных опор, изготовленных по технологии БПИ, незначительно уступает скорости изнашивания опор, изготовленных по технологии БашНИИ НП. В процессе испытания на двух опорах наблюдалось отслаивание покрытия, что является следствием неполного его оплавления.

Радиальные опоры ПФ ВНИИ БТ по износостойкости уступают опорам с твердосплавным покрытием.

Испытания опытных опор в целом показали, что работы, проводимые в области создания термостойких радиальных опор, перспективны. На базе использования композиционных материалов и передовой технологии созданы термостойкие опоры скольжения забойного двигателя, ресурс работы которых в сверхглубокой скважине превышает ресурс работы серийных радиальных опор. В целях повышения надежности опор, исключения случаев отслаивания твердого покрытия от металлической основы необходимо провести дополнительную работу, направленную на оптимизацию режимов формирования покрытий и создание на основе ПСТС новых композиционных сплавов, более износостойких по сравнению с испытанными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пары трения с твердосплавным контактом / Н.Ф. Кагарманов, Ш.Х. Хамзин и др. // Тр. БашНИИ Нефти. – Уфа, 1974. – Вып. 36. – С. 169–171.
2. Электронная микроскопия в металловедении / А.В. Смирнова, Г.А. Кокорин, С.М. Полонская и др. – М., Металлургия, 1985. – 192 с.
3. Тененбаум М.М., Аронов Э.Л. Установка ПВ-12 для исследования износостойкости материалов при гидроабразивном изнашивании // Завод. лаборатория. – 1967. – № 6. – С. 764.
4. Золотарь А.И., Аронов Э.Л., Леонидов Л.Д. О систематизации установок для исследования гидроабразивного износа материалов // Тр. ВНИИ гидромаша. Гидромашиностроение. – М.: Энергия, 1972. – Вып. 43. – С. 146–155.
5. Шамшур А.С., Чеблук М.А., Петросян М.М. Исследование кавитационной стойкости самофлюсующихся твердых сплавов // Машиностроение. – Мн.: Выш. шк., 1981. – Вып. 6. – С. 106–111.
6. Сташевская Е.Н. Износостойкость сплавов на никелевой основе при повышенных температурах // Машиностроение. – Мн.: Выш. шк., 1979. – Вып. 2. – С. 30. – 33.

УДК 621.822

И.И. ДЯКОВ, Г.М. ЮМЛТЫК

КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ УПРОЧНЯЕМОГО КОНЦЕВОГО ИНСТРУМЕНТА

Одним из наиболее распространенных методов упрочнения металлорежущих инструментов является КИБ (конденсация в условиях ионной бомбардировки). Процесс включает в себя ионную бомбардировку (очистку) и конденсацию покрытия. Особо важное значение имеет ионная бомбардировка, качество проведения которой влияет на дальнейшие показатели упрочненного инструмента.