

Электромеханика и машиностроение

Electromechanics and mechanical engineering

УДК 620.178.162:621.65:678

ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В УЗЛАХ ТРЕНИЯ СКВАЖИННЫХ НЕФТЯНЫХ НАСОСОВ

В.А.КРАСНЫЙ, канд. техн. наук, доцент, vikras1955@yandex.ru

В.В.МАКСАРОВ, д-р техн. наук, профессор, maks78.54@mail.ru

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия

Ю.ОЛЬТ, д-р техн. наук, профессор, juri.olt@etu.ee.

Эстонский университет естественных наук, Тарту, Эстония

Рассмотрено применение полимерных композиционных материалов в узлах трения скважинных нефтяных насосов. Предложена схема испытаний образцов из различных композиционных материалов в паре со стальным роликом, при этом за критерий износостойкости принята площадь пятна износа. Показано, что значительное влияние на износостойкость пары трения, работающей в среде сырой нефти, оказывает не только состав композита, но и расположение армирующих волокон. Наилучшие результаты получены для образца из полиамида, армированного на 50 % высокомолекулярными синтетическими волокнами, уложенными перпендикулярно поверхности трения.

Ключевые слова: скважинный нефтяной насос, полимерные композитные материалы, полиамид, пятно износа, армирование волокнами.

Постоянный рост глубин скважин и степени извлечения нефти из пластов предполагает создание нового современного нефтедобывающего оборудования и применение новых прогрессивных материалов. Одной из проблем при этом является поиск новых уплотняющих материалов для погружных скважинных насосов, обладающих высокой износостойкостью в специфических условиях больших глубин добычи и контакте с сырой нефтью.

Современная технология добычи нефти включает три этапа:

- 1) движение нефти по пласту к скважинам вследствие разности давления в пласте и на заборе скважины;
- 2) движение нефти от забоя скважин до их устья на поверхности;
- 3) сбор нефти и сопровождающих ее газа и воды на поверхности, отделение газа и воды от нефти, возврат воды в пласт, сбор попутного газа.

На этапах извлечения нефти, сбора и подготовки нефти на промыслах используется сложное оборудование, предназначенное для осуществления разнообразных процессов – нагрева, охлаждения, конденсации, сепарации, перекачки, компримирования, фильтрации и ряда других операций с нефтью [1].

Эффективность эксплуатации производственного оборудования, в частности, оборудования буровых скважин – штанговых глубинных насосов, центробежных, погружных электронасосов и др., во многом зависит от надежности и долговечности работы его уплотнительных устройств. Условия работы уплотнений по давлению, температуре, смазывающей способности и химической активности уплотняемой среды, скорости вращения валов весьма разнообразны. В связи с широким применением уплотнительных устройств в оборудова-

нии нефтедобычи возникла необходимость в изыскании наиболее эффективных схем и материалов уплотнений, обладающих высокой герметичностью и износостойкостью и требующих минимального обслуживания в эксплуатации.

Одним из основных показателей качества работы уплотнений являются утечки рабочей среды, долговечность и расход мощности на трение в уплотнении. Несоввершенство уплотнительных устройств приводит к преждевременному выходу из строя оборудования, нарушению технологического процесса, потерям рабочей среды, повышенному расходу энергии на преодоление сил трения в уплотнении и нарушению санитарно-гигиенических условий работы обслуживающего персонала.

Целью настоящей работы являлось исследование ряда полимерных композитных материалов с различными наполнителями и направлением армирования волокон на износостойкость пар трения, работающих в среде сырой нефти.

Центробежные насосы для откачки жидкости из скважины принципиально не отличаются от обычных центробежных насосов, используемых для перекачки жидкостей на поверхности земли. Однако малые радиальные размеры, обусловленные диаметром обсадных колонн, в которые спускаются центробежные насосы, практически неограниченные осевые размеры, необходимость преодоления высоких напоров и работа насоса в погруженном состоянии привели к созданию центробежных насосных агрегатов специфического конструктивного исполнения. Внешне они ничем не отличаются от трубы, но внутренняя полость такой трубы содержит большое число сложных деталей, требующих совершенной технологии изготовления [8].

Погружные центробежные электронасосы (ПЦЭН) – это многоступенчатые центробежные насосы с числом ступеней в одном блоке до 120, приводимые во вращение погружным электродвигателем специальной конструкции (ПЭД). Электродвигатель питается

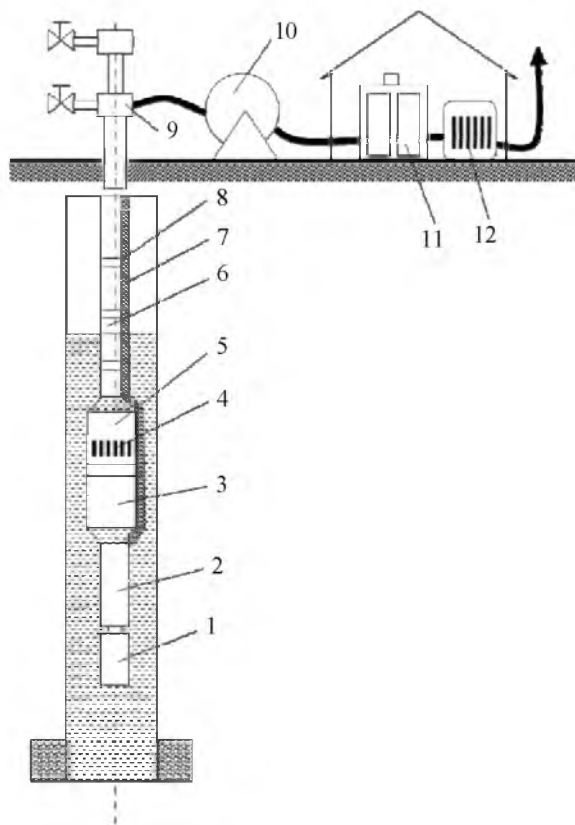


Рис. 1. Общая схема оборудования скважины установкой погружного центробежного насоса

электроэнергией, подводимой по кабелю от повышающего автотрансформатора или трансформатора через станцию управления, в которой сосредоточена вся контрольно-измерительная аппаратура и автоматика. ПЦЭН опускается в скважину под расчетный динамический уровень обычно на 150-300 м. Жидкость подается по насосно-компрессорным трубам (НКТ), к внешней стороне которых прикреплен специальными поясками электрокабель. В насосном агрегате между самим насосом и электродвигателем имеется промежуточное звено, называемое протектором или гидрозащитой. Установка ПЦЭН (рис.1) включает маслозаполненный электродвигатель ПЭД 2; звено гидрозащиты или протектор 3; приемную сетку насоса для забора жидкости 4; многоступенчатый центробежный насос ПЦЭН 5; НКТ 6; бронированный трехжильный электрокабель 7; пояски для крепления кабеля к НКТ 8; устьевую арматуру 9; барабан для намотки кабеля при спуско-подъемных работах и хранения некоторого запаса кабеля 10; трансформатор или автотрансформатор 12; станцию управления с автоматикой 11 и компенсатор 1.

Известные широкопроходные клапаны плунжерных насосов в процессе их внедрения в практику добычи нефти во многих регионах показали положительные результаты. При их применении, как правило, коэффициент наполнения насоса возрастает. Однако в условиях сероводородной агрессии резиновое уплотнительное кольцо быстро выходит из строя. Поэтому ресурс клапана, а, следовательно, межремонтный период насосной установки, не всегда возрастает [9].



Рис.2. Манжетные уплотнения скважинных погружных насосов

Следует отдавать предпочтение тем конструкциям уплотнений, применяемых в плунжерных нефтяных насосах (рис.2),

которые работают при минимальном обслуживании и обладают высокой герметичностью и износостойкостью. К преимуществам манжетных уплотнений можно отнести малые габариты, легкость монтажа и замены, высокую герметичность и невысокую стоимость. Однако эффективность и долговечность манжетного уплотнения в значительной степени определяется материалом уплотнительного элемента, который в основном изготавливается из различных марок резин. Герметичность создается за счет трения между уплотняющей кромкой манжеты и поверхностью вала. Нормальная работа манжетного уплотнения возможна только тогда, когда на поверхности трения имеется тонкая пленка уплотняемой жидкости (благодаря капиллярным силам), которая сводит к минимуму вредные эффекты трения, тепловыделения и износа. Но в процессе эксплуатации возможны режимы сухого и абразивного трения, когда резина обладает низкой работоспособностью, так как резко возрастает ее износ. Это является существенным недостатком, особенно в условиях эксплуатации оборудования применительно к условиям нефтедобычи.

Возникает необходимость поисков новых видов материалов, которые обладают хорошими антифрикционными свойствами в условиях работы без смазки и в абразивной среде. К ним необходимо предъявить и технологические требования по переработке в изделия (способность к формованию методом литья под давлением). К таким материалам относятся полимеры и полимерные композиты.

Для получения материалов с заданными свойствами в технике часто используют не сами полимеры, а их сочетания с другими материалами как органического, так и неорганического происхождения (металлопласты, пластмассы, полимербетоны, стеклопластики и др.).

Композиционный материал (КМ), композит – искусственно созданный неоднородный сплошной материал, состоящий из двух или более компонентов с четкой границей раздела между ними. В большинстве композитов (за исключением слоистых) компоненты можно разделить на матрицу (или связующее) и включенные в нее армирующие элементы (или наполнители). В композитах конструкционного назначения армирующие элементы обычно обеспечивают необходимые механические характеристики материала (прочность, жесткость и т.д.), а матрица обеспечивает совместную работу армирующих элементов и защиту их от механических повреждений и агрессивной химической среды.

Механическое поведение композиции определяется соотношением свойств армирующих элементов и матрицы, а также прочностью связей между ними. Характеристики создаваемого изделия, как и его свойства, зависят от выбора исходных компонентов и технологии их совмещения.

В результате совмещения армирующих элементов и матрицы образуется композиция, обладающая набором свойств, отражающим не только исходные характеристики его ком-

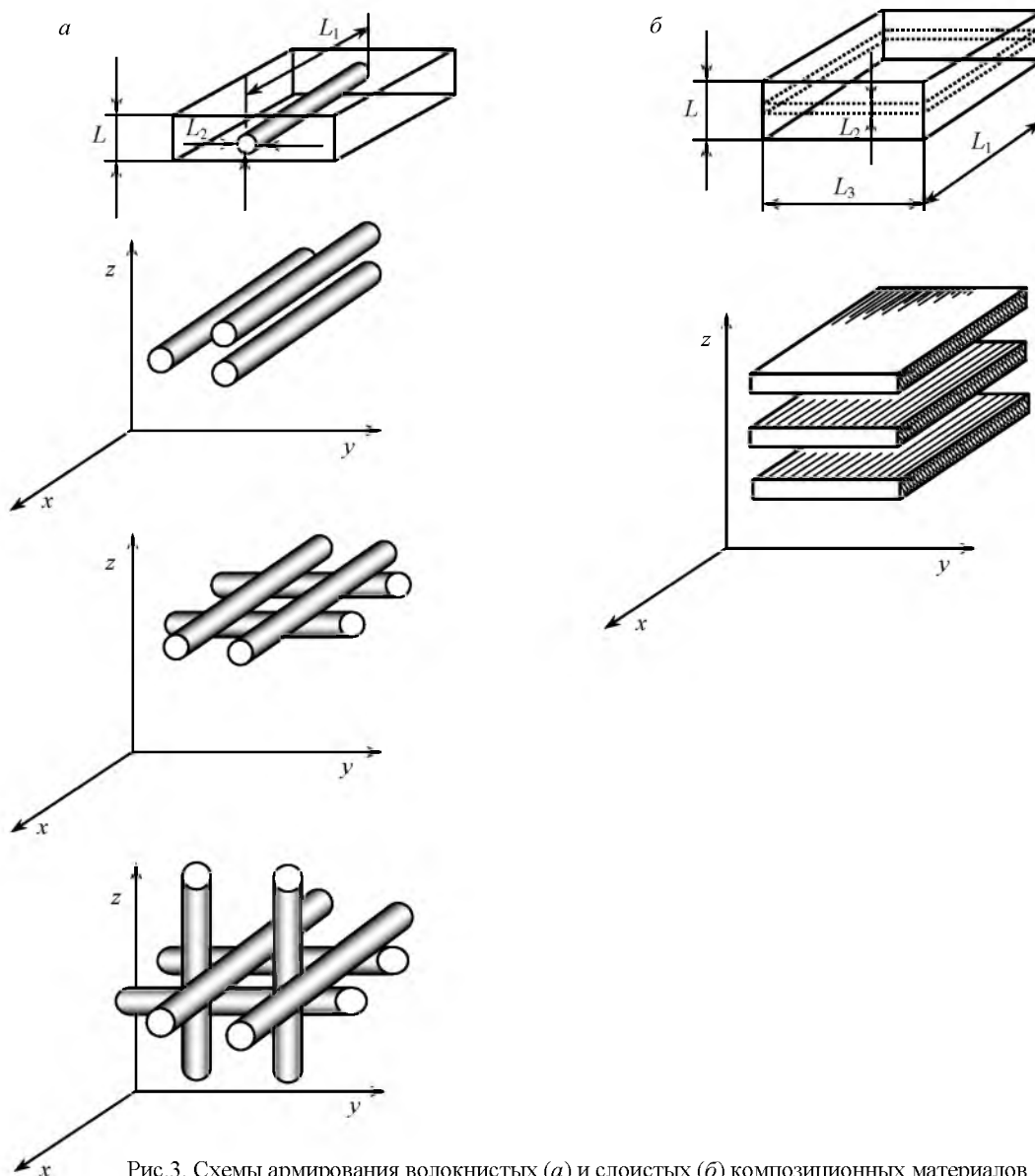


Рис.3. Схемы армирования волокнистых (а) и слоистых (б) композиционных материалов

понентов, но и включающим новые свойства, которыми изолированные компоненты не обладают. В частности, наличие границ раздела между армирующими элементами и матрицей существенно повышает трещиностойкость материала, и в композициях, в отличие от однородных металлов, повышение статической прочности приводит не к снижению, а, как правило, к повышению характеристик вязкости разрушения.

Арматурой в волокнистых полимерных КМ могут быть волокна различной формы: нити, ленты, сетки разного плетения. Армирование волокнистых КМ может осуществляться по одноосной, двухосной и трехосной схеме (рис.3). Прочность и жесткость таких материалов определяется свойствами армирующих волокон, воспринимающих основную нагрузку. Существенное влияние на свойства оказывает также направление армирования композитов (хаотически, продольно или перпендикулярно направленные) [5].

Пара трения в ступени погружного многоступенчатого центробежного насоса состоит из двух деталей, одна из которых выполнена из металла, а вторая из композиционного материала, который состоит из наполнителя и связующего. Связующее состоит из термопластичного полимерного материала, а в состав наполнителя входят стеклонеполнитель

(15-50 %), минеральные вещества (до 10 %), фторопласт (до 7 %), дисульфид молибдена или графит (1,5-15 %), термопластичное связующее и т.п.

Возможно применение в узлах трения технологического оборудования нефтедобывающей промышленности износостойких полиуретанов. Износостойкость изделий из полиуретана в 5-10 раз превышает время работы аналогичных изделий из резины и других эластичных материалов. Полиуретан по своим свойствам обладает большей жесткостью в сравнении с резиной.

В ряде случаев отмечается перспективность применения полиамидных и других композиций в различных условиях трения [4, 6, 10, 11,].

В настоящей работе предпринята попытка оценить относительную износостойкость некоторых видов полимерных композиционных материалов с различным направлением армирования при давлениях до 16 МПа и температурах до 120 °С в среде нефти северных месторождений с целью выбора наиболее перспективных материалов для использования в узлах трения скважинных нефтяных насосов.

Испытаниям подвергались хаотически и направленно армированные композиты на основе ряда перспективных полимеров: полиамид (ПА), полисульфон (ПСК-1), полиэтилен (ПЭНД), полиэтилентерефталат (ПЭТФ). В качестве сравнительного материала использовалась бронза ОФ 10-10. Наполнителями полимеров служили дисперсный графит ГЛ-1, углеродное волокно «Углен» (УВ), диспергированное (1 мм) волокно «Углен» (ДУВ), высококомодульные синтетические волокна (СВМ) [3].

Образцы материалов испытывались в виде цилиндров диаметром 10 мм в паре с роликом диаметром 40 мм из закаленной стали 40Х с твердостью HRC 42-45, обработанным полированием до $R_a = 0,15$ мкм. Испытания производились на экспериментальной установке, смонтированной на базе асинхронного двигателя 1ФАЗ с частотой вращения вала 2730 об/мин, с нагружающим устройством в среде сырой нефти. При этом для экспрессных испытаний была выбрана нагрузка на контакте образца 20 Н, а схема испытаний соответствовала классической схеме двух скрещенных цилиндров (рис.4).

За критерий износа при испытаниях образцов с непостоянной геометрией контакта принималась площадь пятна износа, образовавшаяся на образце через заданное время испытаний (60 мин). При этом очевидно, что наилучший во фрикционном отношении материал должен иметь наименьшую площадь пятна износа при прочих равных условиях испытаний. Время испытания выбиралось с точки зрения возможности достижения такой площади пятна износа, которая могла быть с достаточной точностью измерена с помощью оптического инструментального микроскопа с ценой деления 0,01 мм.

При данной схеме трения в процессе изнашивания на неподвижном образце композита образуется канавка износа. Длина канавки по направлению скольжения равна a , ширина в перпендикулярном направлении b и высота в центре канавки h . Воспользовавшись данными работ [2, 7] для расчета объема и площади

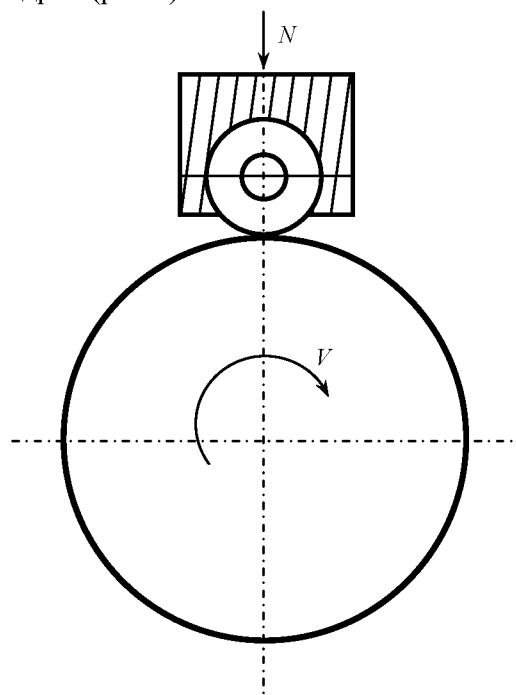


Рис.4. Схема испытаний двух скрещенных цилиндров

пятна износа прямоугольной в плане формы при условии несоосного контакта двух цилиндров, можно приближенно рассчитать площадь сегмента

$$S = \frac{a^3}{6D} = \frac{2}{3}ah,$$

а объемный износ цилиндрического образца по ширине канавки износа

$$V = \frac{a^3b}{3D}.$$

Для сравнительной оценки пятна износа принимались прямоугольной в плане формы, однако для более точных расчетов в указанных работах предложены расчетные формулы для трапецевидной и треугольной формы пятен износа.

Состав исследованных композитов (1-19), а также вид армирования представлены в таблице, а результаты экспрессных испытаний в виде сравнительной гистограммы по площади пятен износа на рис.5.

Состав исследованных композитов

Номер по рис.5	Состав композита		Вид армирования	Номер по рис.5	Состав композита		Вид армирования
	матрица	армирование композита			матрица	армирование композита	
1	Бронза ОФ 10-10	–	–	11	ПА	35 % СВМ	Хаотическое
2	ПЭТФ	–	–	12	ПА	49 % СВМ	Хаотическое
3	ПЭТФ	30 % СВМ	Хаотическое	13	ПА	30 % ДУВ	Хаотическое
4	ПСК	–	–	14	ПА	50 % УВ	Перпендикулярное
5	ПСК	30 % СВМ	Хаотическое	15	ПА	50 % УВ	Продольное
6	ПСК	50 % СВМ	Перпендикулярное	16	ПА	50 % СВМ	Перпендикулярное
7	ПСК	50 % СВМ	Продольное	17	ПЭНД	40 % УВ	Хаотическое
8	ПА	–	–	18	ПЭНД	40 % УВ	Перпендикулярное
9	ПА	30 % ГЛ-1	Хаотическое	19	ПЭНД	40 % УВ	Продольное
10	ПА	20 % СВМ	Хаотическое				

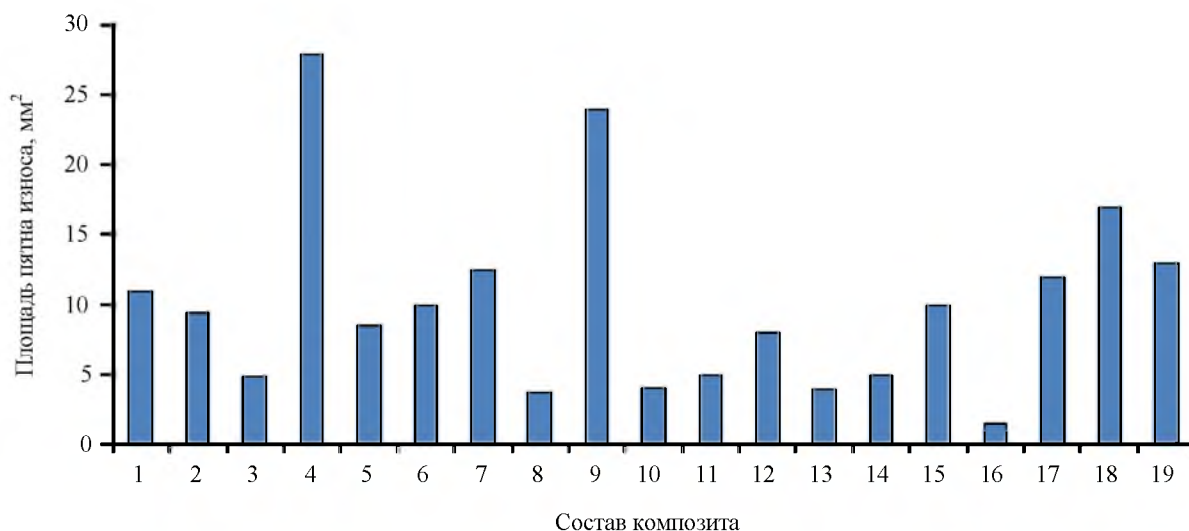


Рис.5. Сравнительные результаты экспрессной оценки износостойкости композитов

Образец полисульфона без наполнителя (4) не выдержал испытаний и разрушился через 15 мин. Его наполнение СВМ снижает износ, однако при больших наполнениях он вновь увеличивается (5-7). Для ПЭТФ также в среднем диапазоне наполнение снижает износ образца (2, 3).

Наиболее интересные результаты получены с образцами из полиамида, который и без наполнителя (8) показывал наилучшие фрикционные свойства из серии исследованных полимеров. Хаотическое армирование СВМ до 40 % (10, 11) незначительно ухудшает износостойкость полиамида, как и такое же количество диспергированного углеволокна. В то же время введение разрыхляющего структуру графита, несмотря на его смазывающую способность, значительно ухудшает свойства композита (9).

При анализе влияния способа армирования композита на его износостойкость видно, что для композитов с матрицами из ПСК и ПА износостойкость выше при трении композита перпендикулярно армирующим волокнам. Очевидно, это связано с тем, что при перпендикулярном к волокнам направлении трения отношение площади трения к площади волокна, контактирующего с матрицей, существенно меньше единицы, а при параллельном – близко к единице. В то же время для композитов со слабой адгезией волокна к матрице и меньшей прочностью самой матрицы этот параметр не имеет существенного значения (ПЭНД с углеродным волокном). Такой механизм изнашивания направленно армированных композитов позволяет предположить, что замена хаотически армированных композитов из ПА и СВМ на перпендикулярно армированные позволит получить материал, перспективный для поставленной в работе цели. Образец материала, содержащего 50 % волокон СВМ, уложенных перпендикулярно поверхности трения, показал износостойкость, в 3,5 раза превышающую износостойкость полиамида (16).

Таким образом, для применения в качестве уплотняющих материалов в узлах механизмов, работающих в контакте с сырой нефтью, целесообразно использование материалов на основе полиамида, армированного волокнами СВМ в направлении, перпендикулярном к поверхности трения.

Выводы

1. Разработка новых уплотняющих материалов для погружных скважинных насосов, обладающих высокой износостойкостью, в специфических условиях больших глубин добычи и контакте с сырой нефтью является весьма актуальной задачей.

2. В связи с широким применением уплотнительных устройств в оборудовании нефтедобычи возникла необходимость в изыскании наиболее эффективных схем и материалов уплотнений, которые обладают высокой герметичностью и износостойкостью и требуют минимального обслуживания в эксплуатации. К таким материалам относятся, в частности, полимерные композиты.

3. Произведена оценка относительной износостойкости полимерных композиционных материалов при давлениях до 16 МПа и температурах до 120 °С в среде нефти северных месторождений. Испытаниям подвергались хаотически и направленно армированные композиты на основе ряда перспективных полимеров.

4. Наиболее интересные результаты получены у образцов из полиамида, который и без наполнителя показывал наилучшие фрикционные свойства из серии исследованных полимеров. Образец материала, содержащего 50 % волокон СВМ, уложенных перпендикулярно поверхности трения, показал износостойкость, в 3,5 раза превышающую износостойкость полиамида.

5. Для применения в качестве уплотняющих материалов в узлах механизмов, работающих в контакте с сырой нефтью, целесообразно использование материалов на основе полиамида, армированного волокнами СВМ в направлении, перпендикулярном к поверхности трения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алиев Б.М. Машины и механизмы для добычи нефти. М.: Недра, 1989. 232 с.
2. Влияние режимов вакуумно-дугового напыления на износостойкость карбидо-титановых покрытий / В.П.Булатов, Б.М.Гинзбург, Ю.П.Козырев и др. // Трение и износ. Т.15. № 6. С.1009-1013.
3. Выбор перспективных материалов для работы в узлах трения скважинных насосов в среде сырой нефти / В.И.Метелкин, В.А.Красный, А.В.Савицкий // Проблемы износостойкости и надежности машин. Ч.2. СПб, 1992. С.67-70.
4. Иваньков С.А. О долговечности и прочности композитов / С.А.Иваньков, А.Я.Башкарев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. № 4 (110). 2010. С.196-199.
5. Кербер М.Л. Полимерные композиционные материалы. Структура. Свойства. Технологии. СПб: Профессия, 2008. 560 с.
6. Михайлин Ю.А. Специальные полимерные композиционные материалы. СПб: Изд-во «НОТ», 2009. 660 с.
7. Определение характеристик изнашивания при линейном начальном контакте цилиндрических контртел / Ю.П.Козырев, Б.М.Гинзбург, Н.Д.Приемский и др. // Трение и износ. 1993. Т.14. № 4. С.759-764.
8. Скважинные насосные установки для добычи нефти / В.Н.Ивановский, В.И.Дарищев, А.А.Сабиров и др. М.: Нефть и газ, 2002. 824 с.
9. Султанов Б.З. Опытная эксплуатация широкопроходных клапанных узлов для скважинных штанговых насосов / Б.З.Султанов, М.Л.Галимуллин // Нефтяное хозяйство. 2002. № 12. С.77-79.
10. Friedrich K., Reinicke R., Zhang Z. Wear of polymer composites. Kaiserslautern, Germany: Institute for Composite Materials Ltd., 2002.
11. Roab M. Vojtav. Theoretical model of experimental scatter of mechanical strength of polymeric materials // Plast. Mater. and Struct. Eng. Proc. ICP / Rilem / IBK Int. Symp. Progue. Amsterdame e.a. 1982. P.381-384.

REFERENCES

1. Aliyev B.M. Mashiny i mekhanizmy dlya dobychi nefi (*Machines and mechanisms for oil production*). Moscow: Nedra, 1989, p.232.
2. Bulatov V.P., Ginzburg B.M., Kozirev Yu.P. et al. Vliyanie rezhimov vakuumno-dugovogo napyleniya na iznosostoykost' karbido-titanovykh pokrytii (*The Influence of the modes of vacuum-arc deposition on the wear resistance of carbide-titanium coatings*) Vol.15. N 6, p.1009-1013.
3. Metelkin V.I., Krasnyi V.A., Savitskii A.V. Vybor perspektivnykh materialov dlya raboty v uzлах treniya skvazhinnykh nasosov v srede syroi nefi (*The selection of promising materials for use in friction units of submersible pumps in the environment of crude oil*). Problemy iznosostoykosti i nadezhnosti mashin. Part 2. St Petersburg, 1992, p.67-70.
4. Ivan'kov S.A., Bashkarev A.Ya. O dolgovechnosti i prochnosti kompozitov (*About the durability and strength of composites*). Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. N 4 (110). 2010, p.196-199.
5. Kerber M.L. Polimernye kompozitsionnye materialy. Struktura. Svoistva (*Polymer composite materials. Structure. Properties. Technology*). Tekhnologii. St Petersburg: Professiya, 2008. 560 s.
6. Mikhailin Yu.A. Spetsial'nye polimernye kompozitsionnye materialy (Special polymer composite materials). St Petersburg: Publishing house «NOT», 2009, p.660.
7. Kozirev Yu.P., Ginzburg B.M., Priemskii N.D. et al. Opredelenie kharakteristik iznashivaniya pri lineinom nachal'nom kontakte tsilindricheskikh kontrtel (*Investigate characterization of wear at the linear initial contact of the cylindrical components*). Trenie i iznos. 1993. Vol.14. N 4, p.759-764.
8. Ivanovskii V.N., Darishchev V.I., Sabirov A.A. Skvazhinnye nasosnye ustanovki dlya dobychi nefi (*Borehole pumping units for oil extraction*). Moscow: Neft' i gaz, 2002, p.824.
9. Sultanov B.Z., Galimullin M.L. Opytnaya ekspluatatsiya shirokoprokhodnykh klapannykh uzlov dlya skvazhinnykh shtangovykh nasosov (*Trial operation wide aisled valve assemblies for downhole sucker rod pumps*). Neftyanoe khozyaistvo. 2002. N 12, p.77-79.
10. Friedrich K., Reinicke R., Zhang Z. Wear of polymer composites. Kaiserslautern, Germany: Institute for Composite Materials Ltd., 2002.
11. Roab M. Vojtav. Theoretical model of experimental scatter of mechanical strength of polymeric materials // Plast. Mater. and Struct. Eng. Proc. ICP / Rilem / IBK Int. Symp. Progue. Amsterdame e.a. 1982, p.381-384.

THE USE OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS IN THE FRICTION NODES DOWNHOLE OIL PUMPS

V.A.KRASNYIY, *PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, vikras1955@yandex.ru*

V.V.MAKSAROV, *Dr. of Engineering Sciences, Professor, maks78.54@mail.ru*

National Mineral Resources University (Mining University), St Petersburg, Russia

J.OLT, *Dr. of Engineering Sciences, Professor, jyri.olt@emu.ee.*

Estonian University of Sciences, Tartu, Estonia

The paper considers the application of polymer composite materials in friction units of downhole oil pumps. The proposed scheme test samples of various composite materials paired with a steel roller adopted by the size of the spots wear using the criterion of resistance. As it is shown significant influence on the wear resistance of the friction pair, working in the crude oil environment, has not only the composition but also the reinforcing fibers direction. The best results were obtained for a sample of polyamide reinforced with 50 % of high molecular weight synthetic fibers placed perpendicular to the friction surface.

Key words: downhole oil pump, polymer composite materials, polyamide, stain wear, the reinforcement fibers.