

**ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ В  
СТУПЕНИ ПОГРУЖНЫХ  
ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ**

**О.М. Мирсаетов, Ю.В. Федоров, Б.Г. Ахмадуллин**  
(Альметьевский государственный нефтяной институт)

*Насосная установка, износ радиальной опоры, композиционные материалы, проточные каналы, магнитная  
формовка, микродуговое оксидирование*  
*Pumping unit, radial support wear, composite materials, flow-through channels, magnetic molding, micro-arc  
oxidizing*

*Possibility of aluminum based composite materials use in the stage of the submersible centrifugal pumps. Mirsaetov  
O.M., Fyodorov Yu. V., Akhmadullin B.G.*

*The paper discusses a combination of geological-and-physical factors and aggravating factors induced by application of base materials and techniques in the design of the stage of multistage pumping unit leading to a nonuniform deposition of corrosion products, scale, minerals and asphalt-resin and paraffin deposits in the flow-through channels of the stage elements, a nonuniform radial support wear form and inducing low frequency resonance vibrations of the pump body. The authors suggest and prove a possibility to use oxidized and nanostructured composite materials based on aluminum, new technologies of their production and constructions for manufacturing of the pump stage elements and assemblies which significantly reduce a level of the pump body vibrations occurrence. The comparative data on a probability of failure-free operation of serial pumps equipped with stages having pilot design elements and standard design pumps are given. Fig. 5, ref. 7.*

Известно, что осложнения, вызванные ростом обводненности, изменением минерализации пластовых вод, выносом механических примесей и образованием в пласте стойких водонефтяных эмульсий, проявляются в виде засорения проточных каналов элементов ступени продуктами коррозии, солями, минералами и АСПО, а также в виде физического износа узлов трения в ступени погружных многоступенчатых насосных установок. Применение базовых технологий и материалов для изготовления элементов и узлов ступени не позволяет получить высокую чистоту поверхности проточных каналов, точность геометрических размеров элементов и износостойкость узлов трения. Их влияние усиливает проявление осложнений в виде засорения проточных каналов и физического износа узлов трения в ступени насоса, приводит к увеличению дисбаланса элементов ступени, усилению вибрации ротора насоса и существенно снижает устойчивость его работы. Например, недостаточно высокая чистота поверхности проточных каналов усиливает процесс отложения продуктов коррозии, солей, минералов и АСПО, а невысокая точность получения геометрических размеров элементов ступени приводит к неравномерному их отложению на поверхности каналов [1].

Другим примером является то, что свойства механических примесей, выносимых в составе пластовых флюидов, в несколько раз превышают свойства материалов, применяемых для выполнения элементов и узлов ступени насосов. Так, из скважин выносятся кварцевый песок с твердостью по шкале Викерса  $HV_K=1000-1100$  кгс/мм<sup>2</sup>. Между тем твердость радиальной опоры ступени насоса, состоящей из латунной втулки и расточки направляющего аппарата, выполненной из серого чугуна, модифицированного цезием и бором, составляет  $HV_B=100-130$  кгс/мм<sup>2</sup> и  $HV_{HA}=170-240$  кгс/мм<sup>2</sup> соответственно. Из сравнения твердостей материалов радиальной опоры ступени насоса и песка видно, что твердость песка в 5-10 раз выше. Естественно, будет происходить интенсивный физический износ радиальной опоры, наработка до отказа центробежного насоса будет в несколько раз меньше, чем указано в технической документации. При этом с учетом неравномерности отложения продуктов коррозии, солей, минералов и АСПО в проточных каналах износ пар трения ступени насоса будет также неравномерным. Именно неравномерная форма износа радиальной опоры инициирует низкочастотные резонансные колебания корпуса насоса с длиной волны колебаний 2-3 м и пульсации давления, которые приводят к нерегулярным растягивающим напряжениям в болтах, создавая условия для возникновения «полетов». Значительный вес элементов ступени, выполненных из чугуна, только усиливает низкочастотные колебания корпуса насоса.

Цель данной работы – повышение чистоты поверхности проточных каналов, точности получения геометрических размеров, коррозионной стойкости элементов и износостойкости радиальной опоры в ступени насоса на основе применения нетрадиционных материалов и новых технологий их переработки.

Наиболее важным параметром, определяющим интенсивность накопления в проточных каналах направляющего аппарата продуктов коррозии, солей, минералов и АСПО является чистота поверхности каналов. Известно, что направляющий аппарат ступени УЭЦН традиционно выполняется из чугуна. Также традиционно основными методами повышения износо- и коррозионной стойкости является модифицирование чугуна цезием, бором и никелем. Базовой технологией изготовления направляющего аппарата из чугуна является литье детали в литейную форму, полученную уплотнением формовочного материала вокруг модели в опоке.

Несовершенство данной технологии заключается в том, что при формировании литейной формы низкая степень уплотнения формовочного материала не позволяет получить высокую чистоту поверхности формы и, как следствие, высокую чистоту поверхности проточных каналов на детали. Известно, что метод порошковой технологии изготовления направляющего аппарата, включающий компактирование прессованием и спекание тонкодисперсных порошков, позволяет получить более высокую степень чистоты поверхности проточных каналов. Вместе с тем методы порошковой технологии имеют ряд недостатков, среди которых: внесение загрязнений при подготовке

порошков или их консолидировании; увеличение геометрических размеров получаемых деталей; сохранение некоторой остаточной пористости.

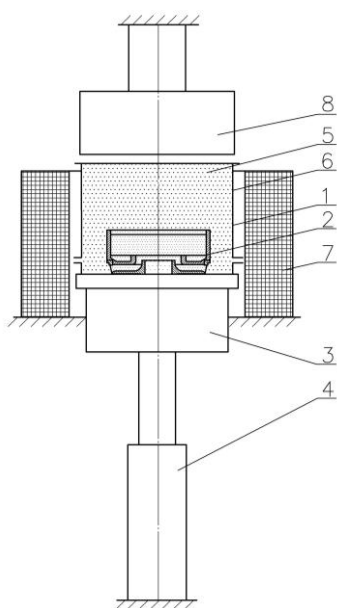
В работе [2] для снижения веса, повышения коррозионной стойкости и износостойкости расточки направляющего аппарата предложено применение композиционного материала на основе алюминия. Повышение износостойкости расточки и коррозионной стойкости направляющего аппарата достигалось при микродуговом оксидировании поверхности всего элемента [3, 4]. Микродуговое оксидирование – одно из самых перспективных методов создания покрытий. При этом покрытия удастся применять достаточно пластичный и легкий алюминий в различных агрегатах машин и механизмов. Микроплазменные покрытия представляют керамику сложного состава, состоящие из поликристаллических высокотемпературных оксидных и гидроксидных форм алюминия, образующих ячеистую градиентную структуру.

Покрытия образуются при окислении поверхности алюминия при протекании тока большой плотности через электролит и возникновении на его поверхности микроплазменных разрядов. Электролит состоит из слабого кислотного или щелочного раствора. Элементы электролита также входят в покрытие в виде солей оксидов и гидроксидов.

В рамках данной работы для повышения чистоты поверхности проточных каналов в направляющем аппарате проведена оценка возможности применения магнитного формовочного материала и магнитной формовки порошка при создании литейной формы для направляющего аппарата [5].

Представлена схема опытной установки, при помощи которой удалось увеличить степень уплотнения формовочного порошка при формировании литейных форм и повысить чистоту поверхности проточных каналов в направляющем аппарате (рис.1).

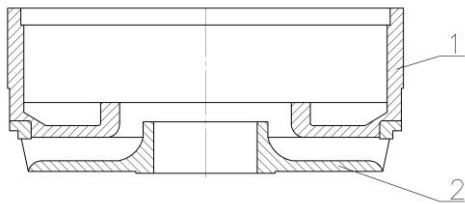
Кроме того, данная технология позволяет увеличить точность изготовления элементов.



**Рис.1. Установка для изготовления литейных форм из ферромагнитных формовочных материалов:**

- 1 – опока; 2 – модель детали;  
3 – стол; 4 – устройство подъема;  
5 – ферромагнитный порошок;  
6 – накопитель; 7 – электромагнит для создания переменного магнитного поля;  
8 – прессовая колодка для механического уплотнения

Чистоту поверхности проточных каналов можно еще более повысить при выполнении направляющего аппарата из нескольких сборочных единиц [6]. Представлен направляющий аппарат из двух сборочных единиц: корпуса и крышки с обратными лопатками (рис.2).



**Рис. 2. Направляющий аппарат из двух сборочных единиц:**

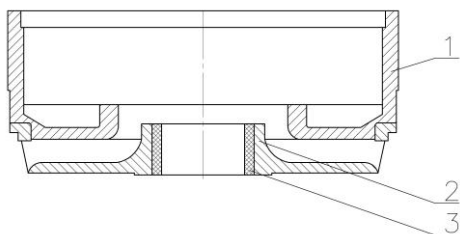
- 1 – корпус;  
2 – крышка с обратными лопатками

В корпусе (1), соосно обратным лопаткам на крышке (2), выполнены пазы, необходимые для обеспечения жесткости конструкции при сборке направляющего аппарата. Так как полости между лопатками открыты, то при формировании крышки направляющего аппарата значительно повысилась степень уплотнения формовочного материала и, соответственно, повысилась чистота их поверхности. Кроме того, данная конструкция позволяет применять при выполнении сборочных единиц технологию литья под давлением.

Опытная партия направляющих аппаратов из двух сборочных единиц изготовлена из сплава АМг10 с применением технологии магнитной формовки ферромагнитного формовочного порошка при изготовлении литейных форм. Применение данной технологии позволило повысить чистоту поверхности проточных каналов на два качества. Нанесение износо- и коррозионно-стойкого покрытия на полученные сборочные единицы произведено методом микродугового оксидирования на опытной установке в Институте неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН. Детали подвергали микродуговому оксидированию продолжительностью 65 минут, при

плотности тока  $25 \text{ А/дм}^2$  и напряжении 520 В в щелочном электролите. Толщина покрытия составляла 100 мкм. Твердость покрытия достигала 22 ГПа. Измерения твердости производились при помощи прибора Nano Tester, при нагрузке на индентор – 200 мН. Решили четыре задачи: значительно снижен вес, увеличена точность изготовления, достигнута высокая коррозионная стойкость и твердость расточки направляющего аппарата.

Увеличение износостойкости радиальной опоры также достигнуто при применении композиционных материалов на основе алюминия. Радиальная опора в ступени насоса состоит из втулки и расточки направляющего аппарата (рис.3).



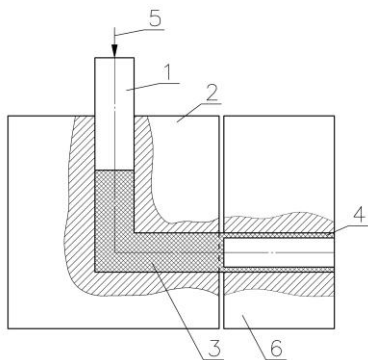
**Рис. 3. Радиальная опора ступени насоса:**

- 1 – направляющий аппарат;
- 2 – расточка направляющего аппарата;
- 3 – втулка радиальной опоры

Применение алюминиевых композиционных материалов и новых технологий его переработки позволили увеличить износостойкость расточки направляющего аппарата.

Втулка радиальной опоры традиционно выполняется из латуни. Существенный недостаток латуни – низкие величины твердости, значительно уступающие твердости механических примесей, выносимых из пласта в составе нефтяных флюидов. Для повышения износостойкости втулки применяют порошковые технологии и мелкодисперсные порошки оксидов металлов, в том числе алюминий. Основным недостатком порошковой технологии, ограничивающий ее применение, – увеличение геометрических размеров получаемых деталей.

В настоящее время известен метод получения наноструктурированных материалов с применением технологии пластического структурообразования [7]. Метод заключается в деформировании материала при температурах ниже температуры плавления в условиях высоких приложенных давлений. Основным методом достижения больших величин пластических деформаций, приводящих к заметному измельчению зерен, является неоднократное равноканальное угловое прессование. Показан вариант получения больших величин пластических деформаций при однократном равноканальном угловом прессовании материала (рис.4).



**Рис.4. Вариант применения однократного, равноканального углового прессования:**

- 1 – пуансон; 2 – матрица;
- 3 – композиционный материал;
- 4 – заготовка для втулок;
- 5 – приложенное давление;
- 6 – пресс-форма

Изготовление опытных образцов втулок выполнено из композиционного материала Д16 с применением технологии пластического структурообразования. Процесс пластического структурообразования осуществлялся неоднократным продавливанием материала через каналы равного сечения, пересекающиеся под углом  $90^\circ$ . При этом поддерживалась температура 0,3 от температуры плавления материала. Число деформационных переходов равнялось 12. Применение этой технологии позволило при пластическом структурообразовании стандартного композиционного материала на основе алюминия Д16 получить втулки с наноструктурой, размеры зерен которой около 100 нм и твердостью 19 ГПа. Процессы пластического структурообразования и формирования детали – неразрывные этапы цикла изготовления втулки.

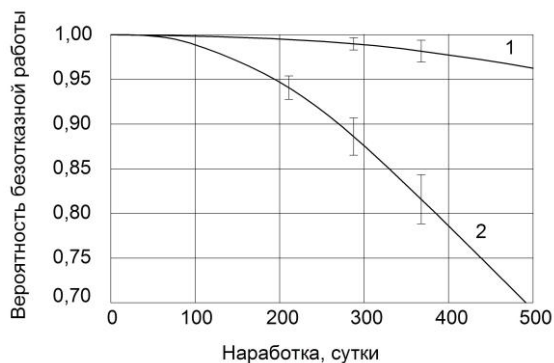
В лаборатории трибологии ИПМ УрО РАН проведены сравнительные испытания радиальных пар трения в базовом исполнении и из композиционных материалов на основе алюминия. Испытаниям подвергались образцы втулок из латуни в паре с модифицированным серым чугуном и из наноструктурированного композиционного материала Д16 в паре с микрооксидированным композиционным материалом Д16.

Испытания проводились на универсальной машине трения УМТ-1 в условиях гидроабразивного изнашивания в среде: 40 % – вода; 40 % – нефть товарная; 20 % – кварцевый песок фракции 45 мкм при нагрузке 10 Кгс и частоте вращения 2910 об/мин. Продолжительность эксперимента для каждого из образцов 1 час. Температура среды  $90^\circ\text{C}$ . Размерный износ втулки из латуни составил 1,5 мм (в относительных единицах – 1). Износ втулок по длине имеет неравномерный характер. Износ втулки из наноструктурированного композиционного материала Д16 составил 0,1 в относительных единицах. Следует отметить, что износ втулок по длине имеет равномерный характер.

Таким образом, применение оксидированных и наноструктурированных композиционных материалов на основе алюминия позволило повысить чистоту поверхности проточных каналов, точность получения геометрических размеров, коррозионную стойкость элементов ступени и износостойкость радиальной опоры, снизить вес

направляющего аппарата, привело к уменьшению неравномерного отложения продуктов коррозии, солей, минералов, АСПО и неравномерному износу радиальной опоры. Устойчивость работы насоса существенно повышается при уменьшении дисбаланса и вибрации ротора насоса.

Промысловые испытания предлагаемых решений проводились в составе насосных установок УЭЦН- 45 -1900, эксплуатируемых на месторождениях ОАО «Белкамнефть» и ОАО «Удмуртнефть», расположенных на территориях Удмуртской Республики и Республики Башкортостан. При очередных подземных ремонтах скважин в насосах произведена замена втулок радиальных опор и направляющих аппаратов на опытные, выполненные с применением новых материалов и технологий. Приведены сравнительные данные по надежности УЭЦН, выполненные в базовом и опытном исполнениях (рис.5). Вероятность безотказной работы серийных насосов, укомплектованных ступенями с элементами в опытном исполнении, превышает вероятность безотказной работы насосов, выполненных в базовом исполнении (см. рис.5).



**Рис.5. Надежность УЭЦН:**

1 – опытное исполнение;

2 – базовое исполнение

#### Выводы

- Интенсивность проявления осложнений в виде засорения проточных каналов и износа узлов трения в ступени насоса, вызванных геолого-физическими факторами, значительно усиливается при проявлении осложнений, вызванных применением базовых технологий и материалов в конструкции ступени насосов. Это приводит к неравномерному засорению проточных каналов, неравномерному износу радиальной опоры, увеличению дисбаланса элементов ступени, усилению вибрации ротора насоса, существенно снижает устойчивость работы насоса.
- Применение оксидированных композиционных материалов на основе алюминия для изготовления направляющего аппарата значительно снижает его вес, обеспечивает высокую коррозионную стойкость и увеличивает твердость расточки направляющего аппарата в радиальной опоре ступени до 22 ГПа, что превышает твердость выносимых механических примесей и существенно снижает физический износ радиальной опоры.
- Предложенный метод повышения чистоты поверхности проточных каналов в направляющем аппарате увеличением степени уплотнения формовочного порошка при формировании литейных форм с применением ферромагнитного формовочного материала и магнитной формовки порошка позволяет повысить чистоту поверхности каналов на два качества, что значительно снижает засорение проточных каналов и повышает устойчивость работы ступеней насоса.
- Чистота поверхности проточных каналов может быть значительно повышена при выполнении направляющего аппарата из двух сборочных единиц: корпуса и крышки с обратными лопатками.
- Применение технологии пластического структурообразования композиционных материалов на основе алюминия в процессе формирования втулки позволяет получить наноструктурированный материал с размерами зерен  $\approx 100$  нм и твердостью 19 ГПа, обеспечивая высокую износостойкость втулок и равномерный характер износа втулок по длине.
- Вероятность безотказной работы серийных насосов, укомплектованных ступенями с элементами в опытном исполнении, превышает вероятность безотказной работы насосов, выполненных в базовом исполнении.

#### Список литературы

1. Мирсаатов О.М., Повышев К.И. Нарботка на отказ системы пласт-скважина насос // Вестник УдГУ.- № 11.- 2005.- С.233-246.
2. Мирсаатов О.М., Думлер Е.Б., Андришин В.М. и др. Пути повышения износо- и коррозионной стойкости элементов УЭЦН при сложных геолого-технических условиях эксплуатации // Эффективность разработки трудноизвлекаемых запасов нефти. Российская научно-практическая конференция. - Ижевск, 2002.-С.158-160.
3. Черненко В.И., Снежко Л.А., Чернова С.Б. Электролиты для формирования керамических покрытий на алюминии в режиме искрового разряда // Защита металлов.- Т. XVIII.- № 3.-1982.- С. 454-458.
4. Патент № 2250937 РФ. Способ получения покрытия / И.А. Казанцев, В.С. Скачков.- Опул. 27.04.2005.
5. Патент № 2015791 РФ. Способ изготовления литейных форм из ферромагнитных материалов / В.П. Шляпин, А.С. Фофанов, В.Ф. Климов.- Опул. 15.07.1994.
6. Мирсаатов О.М., Федоров Ю.В. Новые материалы и технологии для повышения износо-и коррозионной стойкости элементов и узлов многоступенчатых насосных установок // Нефть и газ Западной Сибири / Мат. Всероссийской научно-технической конференции. – В 2т. – Т. 2. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2009. – С. 360-363.
7. Сегал В.М., Резников В.И., и др. Процессы пластического структурообразования металлов. - Минск: Наука и техника, 1994.- 232 с.

#### **Сведения об авторах**

**Мирсаетов О.М.**, к.т.н., доцент, кафедра «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений», Альметьевский государственный нефтяной институт, г. Альметьевск, тел.: (8553) 310088, e-mail: [mirsatov@yandex.ru](mailto:mirsatov@yandex.ru)

**Федоров Ю.В.**, аспирант, кафедра «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений», Альметьевский государственный нефтяной институт, г. Альметьевск, тел.: (8553) 310088

**Ахмадуллин Б.Г.**, кафедра «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений», Альметьевский государственный нефтяной институт, г. Альметьевск, тел.: (8553) 310088

**Mirsatov O.M.**, candidate of Technical Sciences, assistant professor, Department «Development and exploitation of oil and gas fields», Almetievsk State Petroleum Institute, Almetievsk, phone: (8553) 310088, e-mail: [mirsatov@yandex.ru](mailto:mirsatov@yandex.ru)

**Fedorov Yu.V.**, postgraduate student, Department «Development and exploitation of oil and gas fields», Almetievsk State Petroleum Institute, Almetievsk, phone: (8553) 310088.

**Akhmadullin B.G.**, department «Development and exploitation of oil and gas fields», Almetievsk State Petroleum Institute, Almetievsk, phone: (8553) 310088