



**6 - 9 сентября 2011, СумГУ, г. Сумы, Украина**

**XIII Международная научно-техническая конференция "ГЕРВИКОН-2011"  
Международный форум "НАСОСЫ-2011"  
Семинар "ЭКОН-11"**

## **МОДИФИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПОЛУЧЕНИЯ УГЛЕПЛАСТИКОВ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ И АСПЕКТЫ ВНЕДРЕНИЯ «СУХОГО ТРЕНИЯ» В ПОРШНЕВЫХ КОМПРЕССОРАХ**

**Томас А.А.<sup>1</sup>, Будник А.Ф.<sup>2</sup>, Зозуля В.И.<sup>3</sup>, Будник О.А.<sup>4</sup>**

### **АННОТАЦИЯ**

*Работа посвящена изучению особенностей оптимизации и интенсификации традиционной технологии получения углефторопластового композита. Получена технология процесса формования композита и приемов производства на каждом из его этапов, позволяющая создавать высокоэффективные и экономически обоснованные по затратам композиты для поршневых компрессоров работающих в условиях «сухого трения».*

**Ключевые слова:** оптимизация, технология формования, физико-механическая модификация, влагопоглощение, сухое трение, промышленная апробация.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Особенности фторопластовой матрицы и специфические условия ее переработки в композицию, а затем и формирование композита, диктуют

---

<sup>1</sup> Томас Алевтина Александровна, аспирантка, ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», пр. Гагарина 8, 49600, г.Днепропетровск, Украина.

<sup>2</sup> Будник Анатолий Федорович, к.т.н., доцент, Сумский государственный университет, ул. Римского-Корсакова 2, 40007, г. Сумы, Украина.

<sup>3</sup> Зозуля Владимир Ильич, к.т.н., зам. директора ООО «Сумский научно-технический центр», ул. Машиностроителей 1, 40020, г.Сумы, Украина.

<sup>4</sup> Будник Олег Анатольевич, к.т.н., научный сотрудник, Научно-производственная фирма ООО «Грейс-инжиниринг», Белопольское шоссе, 31, 40032, г.Сумы, Украина.

жесткие технологические приемы и строгую последовательность их выполнения для получения качественного композитного материала с необходимыми свойствами. Традиционная, и достаточно обоснованная, технология получения композита на основе фторопласта-4 и углеродных волокон включает подготовку компонентов композиции, их активацию и модификацию (при необходимости и возможности), совмещение рецептурного количества матрицы с наполнителем, формирование композитной заготовки из композиции (обычно методами компрессионного прессования) и ее термообработку (спекание) по определенному режиму.

## **1. МАТЕРИАЛЫ, ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ И НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Каждая составляющая этой технологии научно теоретически обоснована и имеет практическое применение.

При практическом применении достичь оптимальных режимов работы технологического оборудования на каждом из этапов процесса не всегда возможно в силу целого ряда как объективных, так и субъективных факторов. Выход из создавшегося положения представляется возможным максимальной интенсификацией каждого из этапов с целью перераспределения обеспечивающих функций между составляющими технологии при ограниченных возможностях (неполной достаточности) или невозможности интенсификации некоторых ее этапов.

Например, физико-механическая (и как результат физико-химическая) модификация матрицы фторопласта-4 приводит к 15-25% увеличению эксплуатационных свойств композита с углеродным волокном. Механическая активация основного наполнителя – углеродного волокна приводит к интенсивному росту его активной поверхности и активным адгезионным процессам, что, в конечном итоге, повышает прочностные и трибологические свойства углефторопластового композита на 20-40%. (Патент Украины 40960.). Термобарометрическая подготовка углеволокнистого наполнителя фторопластового композита позволяет повысить работоспособность уплотнительных колец компрессора 4ГМ 2,5У-2/3-250 на 25-30% и гарантировано обеспечить межремонтный пробег узлов трения.

Механическая активация компонентов фторопластовой композиции при совмещении ингредиентов с применением вальцевания и шаровой дробилки (патент Украины № 40959) позволяет получить композит, который превышает известные по прочности при разрыве на 15%, а износостойкости на 30%.

Формование заготовки из фторопластовой композиции с углеродным волокном осложнено межчастичным трением компонентов композиции и трением прессовки о стенки пресс-формы при прессовании. В результате этого в отпрессованной композитной заготовке наблюдается значительный градиент внутренних напряжений. Введение твердой смазки в состав композиции снижает как внешний, так и межчастичный коэффициент трения при компрессионном формировании, что позволяет получить прессовку с равномерными значениями свойств по объему композитной заготовки. Такой технологический прием повышает показатели эксплуатационных свойств фторопластового композита с углеродным волокном на 8-15%.

Наиболее сильный эффект при получении из композиции прессовки, которая имеет максимальные значения конструкционных и эксплуатационных свойств, получен при термопрессовании композиции в закрытой пресс-форме (т.к. «заневоленное» прессование). При этом наблюдается равномерность плотности и твердости по сечению заготовки и повышенное значение прочностных и износостойких свойств композита на 50 и 75% соответственно. Это техническое решение защищено патентом Украины № 41868.

Спекание заготовок из фторопластового композита после получения прессовки обычно проводится в непрерывном режиме. Такой способ термической обработки не позволяет релаксировать напряжения, которые возникли в объеме композита при динамическом формировании (прессовании). Как следствие, он имеет невысокие показатели прочности при растяжении и износостойкости. Спекание прессовки фторопластового композитного материала в режиме каскадной термической обработки с учетом времени фазовых переходов при этом, позволяет снять некомпенсированные напряжения от формирования в объеме композита, обеспечивая полное протекание структурных превращений и формирование нужного соотношения фаз фторопластовой матрицы. Характеристики прочности и износостойкости композита при этом повышаются на 25 и 50% соответственно.

Одним из существенных недостатков композиции на основе Ф-4 и углеродных волокон остается влагопоглощение в условиях работы с жидкими и газообразными средами. Материал деталей, работающих в таких условиях, со временем показывает скачкообразный рост износа вплоть до катастрофического. Эта особенность наполненного углепластика существенно лимитирует его использование в узлах деталей машин. Гидрофильность в данной композиции проявляет УВ, обладающее развитой поверхностной структурой (пористостью). Положительных результатов по снижению влагопоглощения удастся добиться оптимизацией технологии

формования композиции в изделие. Исследования показали, что при таком подходе можно получать заготовки с минимальным влагопоглощением (0,9%) и высокими показателями эксплуатационных свойств (повышение предела прочности при сжатии на 20 и износостойкости на 15%).

Таким образом, технологический процесс получения заготовки из углефторопластового композита состоит из последовательных технологических операций, составляющие которых могут дополняться новыми операциями или, наоборот, исключаться из способа получения за ненадобностью.

Математическая модель процесса формования композита и приемов производства на каждом из его этапов позволяет, используя системный подход к технологии производства, создать его высокоэффективным и экономически обоснованным по затратам.

Ниже приведены некоторые теоретические аспекты работы цилиндропоршневой группы компрессора с применением смазки и обоснование целесообразности его перевода на бессмазочный режим работы.

Рассмотрим зону смазки, образованную между зеркалом цилиндра и поршнем, который движется с постоянной скоростью  $u_0$ , расстояние между которыми  $h$ . Принимая во внимание, что начальные скорости  $u_0$  и  $u_0$  являются функцией координат и времени  $t$ , получим общий вид уравнения Рейнольдса:

$$\left( \frac{\rho \cdot h^3}{\eta} \cdot p_1 \right)_1 + \left( \frac{\rho \cdot h^3}{\eta} \cdot p_2 \right)_2 = 6 \cdot [(\rho \cdot v_0 \cdot h)_1 + (\rho \cdot u_0 \cdot h)_2] + 12 \frac{d(\rho \cdot h)}{dt}, \quad (1)$$

При работе в течение длительного времени в некоторых газовых средах смазочные материалы могут насыщаться газом и влагой (конденсатом), что приводит к изменению их смазывающих свойств. Коэффициент диффузии двухкомпонентных смесей может быть рассчитан по уравнению:

$$D_{12} = \frac{k_{12} \cdot T^{1.5} \cdot \left( \frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right)^{0.5}}{P \cdot (\sigma_{12})^2 \cdot \Omega_D}, \quad (2)$$

где:  $D_{12}$  – коэффициент диффузии компонента 1 в компонент 2;  $k_{12}$  – эмпирический коэффициент взаимодействия компонентов;  $T$  – температура;  $M_1$  и  $M_2$  – молекулярные веса компонентов;  $P$  – давление;  $\sigma_{12}$  – среднее арифметическое эффективных диаметров;  $\Omega_D$  – интеграл соударений для диффузии.

Вследствие этого при малой скорости движения и большом удельном давлении смазочный материал не полностью разделяет поверхности трения взаимодействующих деталей машин. При этом одна часть нормальной нагрузки передается микрообластям непосредственного контакта трущихся тел, вторая (остальная) часть нагрузки передается микроклиньями смазочного материала, заполняющего углубления и неровности, то есть появляется смешанное трение. Сила смешанного трения:

$$F_{\text{смеш}} = F_{\text{сух}} - F_{\text{жид}} = f_{\text{смеш}} \cdot N = f_0 \cdot N - \eta \cdot A \cdot \frac{dv}{dh}, \quad (3)$$

Недостаток масла, неправильный подбор состава масла или малое его количество приводят к уменьшению подъема поршня и снижению влияния скорости на силу трения, что приводит к повышенному износу трущихся пар.

Сложность учета всех приведенных выше факторов определяет фактическую необходимость внедрения самосмазывающих композитных материалов, позволяющих исключить необходимость подачи смазки и при этом получить значительный технико-экономический эффект.

Учитывая приведенные выше факторы, а также проведя глубокий анализ современных композитных материалов (в том числе участвуя в создании и внедрении новых), проводятся работы по созданию и модернизации поршневых компрессоров для режима «сухого трения». При этом подбор композитных материалов зависит от состава рабочей среды, условий и предельных режимов работы компрессора.

Так на ГПУ «Полтавагаздобыча» компрессора 6ГМ40-16/100-420 (изготовитель СМНПО им. М.В.Фрунзе, производительность 1600 м<sup>3</sup>/мин и давление нагнетания 420 кгс/см<sup>2</sup>) работали в традиционном режиме принудительной подачи смазки в полости цилиндров и сальников, что обеспечивало ресурс до вынужденной перегильзовки цилиндров 3,5÷5,3 тысяч часов. В течение этого срока износ цилиндров составлял 0,7÷1,8 мм на диаметр, износ штока - 0,7÷1,2 мм, а также наблюдались утечки газа через сальники в зависимости от степени износа штоков.

В 1998 г. после модернизации компрессора и перевода его на работу без смазки уменьшился износ цилиндров и после 32918 часов работы компрессора износ цилиндра составил около 0,2 мм, а штока – 0,1÷0,15 мм. Нарботка одного комплекта уплотнений – составила 6000÷8000 часов.

Модернизация компрессорного оборудования с разработкой, изготовлением и поставкой необходимых узлов и деталей для «сухого» режима поршневых компрессоров позволяет обеспечить работу созданных сальниковых уплотнений не только при высоких давлениях нагнетания (до

2000 кгс/см<sup>2</sup>) и температурах (до 250°С), но и с минимальными перетечками в поршневых и утечками газа в сальниковых уплотнениях.

Для Уфимского и Новоуфимского НПЗ в 1996 г. был спроектирован и изготовлен вакуумкомпрессор без смазки 4М2,5-55/0,15-1,7 с начальным давлением 0,1 - 0,3 кгс/см<sup>2</sup>, давлением нагнетания 1,7 кгс/см<sup>2</sup> и производительностью 60 м<sup>3</sup>/мин., после остановки компрессора вакуум в цилиндро-поршневой группе держался в течении 50 ÷ 52 мин.

Была проведена широкая модернизация компрессоров с переводом более 82 машин 48 типов на работу без подачи масла: от бустерных компрессоров фирмы «Эслинген» с давлением всасывания от 2 кгс/см<sup>2</sup> (Северодонецкое ПО «Азот» 1984 г.) до давления нагнетания 420 кгс/см<sup>2</sup> (компрессора 6ГМ40-16/100-420 на ГПУ «Полтавагаздобыча» 1998 г.). Работы внедрены более чем на 20 предприятиях СНГ на компрессорах, находящихся в промышленной эксплуатации.

Наряду были модернизированы или поставлены запчасти к компрессорам заводов-изготовителей:

- Предприятие ОАО «Сумское НПО им. М.В.Фрунзе» г. Сумы;
- Объединение ООО «КОМПРЕССОР» г. Пенза.;
- ООО «БОРЕЦ» г. Москва;
- ОАО «КОМПРЕССОРНЫЙ ЗАВОД» г. Краснодар;
- ОАО «УРАЛЬСКИЙ КОМПРЕССОРНЫЙ ЗАВОД» г.Екатеринбург;
- Фирма «ЧКД» г.Прага;
- Фирма «Эслинген» (ФРГ);
- Фирма «Буркхардт» (Швейцария);
- Фирма «Борзиг» (ФРГ);
- Фирма «Мафа Вурцен» (ФРГ);
- Фирма «Хэмвэзи» (США).

В настоящее время продолжают работы по модернизации и переводу на бессмазочный режим работы поршневых компрессоров различных фирм изготовителей.

В 2005 г. для ГПУ «Львовгаздобыча» на ДКС «Летня» была осуществлена модернизация компрессора 4ГМ10-10/4-46С (завод изготовитель СМНПО им. М.В.Фрунзе) наработка уплотнений на отказ составлял до 3000 часов. С переводом его на работу без смазки (производительностью 40 м<sup>3</sup>/мин и давлением нагнетания 46 кгс/см<sup>2</sup>), хотя не была обеспечена осушка газа и отбор из газовой смеси твердых механических примесей на входе в компрессор, так как это не было предусмотрено проектантом, компрессор проработал на загрязненном природном газе 7000 часов (24.01.07 г.), при этом уменьшился износ цилиндров и штоков. После замены изношенных направляющих колец 1 ступени (рис.1) установка продолжает эксплуатацию.

В 2006 г. на ЗАО «Северодонецкое объединение Азот» была проведена реконструкция цилиндропоршневых и сальниковых узлов 1 и 2 ступеней компрессора фирмы «Borsig», работающего на синтезгазе (давление нагнетания 67 кгс/см<sup>2</sup>), с переводом на бессмазочный режим работы

цилиндров 1 и 2 ступени (1 ступень –  $\varnothing 1320$  мм, 2 ст. –  $\varnothing 700$  мм, шток –  $\varnothing 150$  мм, ход поршня – 550 мм).

1-я - ступень температура всасывания ( $35\pm 40^\circ\text{C}$ ), температура нагнетания ( $190\pm 200^\circ\text{C}$ ); 2-я - ступень температурах всасывания ( $60\pm 67^\circ\text{C}$ ), температура нагнетания ( $230\pm 235^\circ\text{C}$ ) На 29.01.09 г. компрессор проработал 18900 часов. Износ всех сальников и поршневых колец 2 ступени минимальный, не превышает 0,15 мм. Износ поршневых колец 1 ступени составляет 5,3-6,0 мм при наработке одного комплекта уплотнений около 8000 часов (цилиндры 1 и 2 ступеней были расточены для восстановления геометрии). В настоящее время компрессор продолжает работать без подачи масла в сальник и в цилиндры 1 и 2 ступеней. Отказов в рабочих клапанах не наблюдалось.



Рисунок 1 - Состояние сальника 1 ступени после разборки

## **2. РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ РЯДА БЕССМАЗОЧНЫХ КОМПРЕССОРОВ**

Осуществлена разработка и созданы ряд бессмазочных компрессоров: 4М2,5-55/0,15-1,7 (Уфимский НПЗ в 1997 г.) с давлением всасывания от 0,1 – 0,3 кгс/см<sup>2</sup>, давлением нагнетания 1,7 кгс/см<sup>2</sup> (производительностью 60 м<sup>3</sup>/мин); компрессор ВХ-0,45/230 (МНП РУСЬ-Б в 1991 г.) с давлением всасывания 1–3 кгс/см<sup>2</sup>, давлением нагнетания 250 кгс/см<sup>2</sup>; компрессор для дыхательной смеси ВХ-0,25/320-С с давлением всасывания 1–3 кгс/см<sup>2</sup>, давления нагнетания 320 кгс/см<sup>2</sup> (проект в 1992 году); компрессор для инертных газов 4ВМ2,5-25/6-С (Черкасский КПЗ в 1995 г.) с давлением всасывания 1 кгс/см<sup>2</sup>, давлением нагнетания 6 кгс/см<sup>2</sup>, а также источник давления для специальной техники давление нагнетания - 6000 кгс/см<sup>2</sup> (в 1981 г.).

В 1992 году был создан поршневой двухступенчатый компрессор сухого сжатия со встроенным электродвигателем 2ГМ-0,12/0,7-40С (рис. 2), предназначенный для перекачивания элегаза ( $SF_6$ ), имеющий герметичный картер. Компрессор является частью оборудования на энергетических установках высокого напряжения.

В последнее время были разработаны и созданы ряд агрегатов.

Передвижная азотная компрессорная станция ПАКС-250 (рис. 3, а), на базе оппозитного поршневого 6-ти рядного 6-ти ступенчатого сухого компрессора воздушного охлаждения, которая укомплектована блоком газоразделения на основе полволоконных полимерных мембран, для получения азотной газовой смеси.



Рисунок 2 - Поршневой двухступенчатый компрессор сухого сжатия со встроенным электродвигателем 2ГМ-0,12/0,7-40С

Привод компрессорной станции от дизеля BF8M1015C фирмы «Deutz» (Германия) с жидкостным замкнутым циркуляционным охлаждением. Станция ПАКС-250 смонтирована на шасси автомобиля КрАЗ-65053. Станция оснащена электронной системой управления с ЖК-дисплеем, размещенным в кабине автомобиля. Станция предназначена для получения из атмосферного воздуха взрывобезопасной газовой смеси с содержанием кислорода не более 10%, используемой при испытаниях и освоении нефтедобывающих и газовых скважин, а также при строительстве и ремонте газопроводов (конечное давление 250 кгс/см<sup>2</sup>; производительность 10 м<sup>3</sup>/мин, приведённая к начальным условиям).

Потребляемая мощность - 285 кВт, мощность приводного дизеля - 432 кВт, частота вращения коленчатого вала приводного дизеля - 1500 об/мин. Пуск и работа станции производится при температуре -30 °÷ +35°С .

Габаритные размеры, (мм), не более:

- длина.....9580

- ширина.....2560



- высота .....3650

Масса станции в объёме поставки - не более 22000 кг.

Передвижная воздушная компрессорная станция СД-16/250 У1 (рис.3, б), на базе оппозитного поршневого 6-ти рядного 6-ти ступенчатого компрессора воздушного охлаждения с приводным дизелем ВF8М1015С фирмы «Deutz» (Германия), смонтирована на шасси автомобиля КрАЗ-65053. Управление станцией осуществляется бортовым компьютером с индикацией данных на сенсорном дисплее ТF-7" расположенным в кабине автомобиля. Станция предназначена для испытания и освоения нефтяных и газовых скважин, а также для использования при строительстве и ремонте трубопроводов (конечное давление 250 кгс/см<sup>2</sup>; производительность 16 м<sup>3</sup>/мин, приведённая к начальным условиям).



Рисунок 3 - Передвижная азотная компрессорная станция ПАКС-250 (а) и передвижная воздушная компрессорная станция СД-16/250 У1 (б)

Потребляемая мощность - 285 кВт, мощность приводного дизеля - 318 кВт, частота вращения коленчатого вала приводного дизеля - 1500об/мин.

Осуществлены разработки по созданию новых перспективных баз -- передвижные компрессорные станции 6ГШ4-25/250 (рис.4) для сжатия азота с давлением нагнетания 250 кгс/см<sup>2</sup> и производительностью 25 м<sup>3</sup>/мин. (проект в 2003 г.), компрессорные станции 6ГШ5-40/250 для сжатия азота с давлением нагнетания 250 кгс/см<sup>2</sup> и производительностью 40 м<sup>3</sup>/мин. (проект в 2004 г.) 6ГШ5-20/2-78 для перекачки природного газа из ремонтируемого участка газопровода с давлением нагнетания 78 кгс/см<sup>2</sup> (проект в 2005 г.), а также специального оборудования с давлением нагнетания свыше 5000 кгс/см<sup>2</sup>.

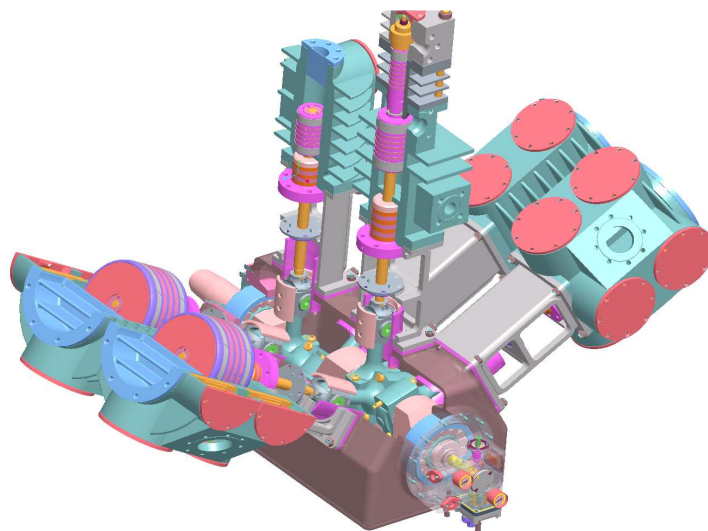


Рисунок 4 - Компрессор W-образный 6ГШ5-40/250  
6-ти рядный, 6-ти ступенчатый с воздушным охлаждением

## **ВЫВОДЫ**

Разработанные и апробированные методики расчетов и принципы конструирования уплотнений из новых самосмазывающихся материалов в зависимости от технологии их получения и геометрических данных конкретной машины, где они используются и реальных свойств газа, позволяют провести модернизацию цилиндропоршневых и сальниковых узлов для режима «сухого трения» на машинах, находящихся в эксплуатации, что существенно продлевает срок их работы и сокращает эксплуатационные расходы.

Созданные новые перспективные композитные материалы и компрессорные базы, позволяют освоить производство новой гаммы компрессорных установок.

Указанные работы находятся в русле современной мировой тенденции развития антифрикционного материаловедения и компрессоростроения, состоящей во все большем расширении номенклатуры и областей применения «сухих» компрессорных установок.

**MODIFICATION TECHNOLOGY TO IMPROVE PRODUCTION OF  
CARBON PLASTICS TRIBOTECHNICAL APPOINTMENTS AND  
ASPECTS OF THE INTRODUCTION "DRY FRICTION" IN THE PISTON  
COMPRESSOR**

**Alevtyna Tomas,  
Ukrainian State Chemical-Technological University**

**Anatoliy Budnik,  
Sumy State University**

**Vladimir Zozulya,  
«Sumy Scientific And Technical Center» LTD**

**Oleg Budnik,  
Research and Production Firm «Grace-Engineering» LTD**

**SUMMARY**

*The paper studies the features of optimization and intensification of the traditional technology of carbonplastic composition. The technology of the composite molding process and techniques of production at each of its stages, allowing you to create highly effective and economically viable cost composites for reciprocating compressors operating under conditions of "dry friction".*

**Keywords: optimization, technology molding, physicomechanical modification, moisture absorption, dry friction, industrial testing.**