

Будник А.Ф., к.т.н., доцент (Сумский государственный университет, Украина)

## Полимерные композиты на основе политетрафторэтилена для узлов трения компрессорного оборудования

*Работа посвящена изучению особенностей оптимизации и интенсификации традиционной технологии создания углефторопластового композита для узлов трения. Разработана технология изготовления композита и способы производства на каждом из его этапов, позволяющих создавать высокоэффективные и экономически обоснованные по затратам композиты для узлов поршневых компрессоров, работающих в условиях «сухого трения».*

**Ключевые слова:** моделирование, оптимизация, технология получения, физико-механическая модификация, свойства, «сухое трение», промышленная апробация.

*Работа посвящена вивченню особливостей оптимізації та інтенсифікації традиційної технології створення вуглефторопластового композиту для вузлів тертя. Розроблена технологія виготовлення композиту і способи виробництва на кожному з його етапів, що дозволяє створювати високоефективні і економічно обґрунтовані за витратами композити для вузлів поршневих компресорів, що працюють в умовах «сухого тертя».*

**Ключові слова:** моделювання, оптимізація, технологія отримання, фізико-механічна модифікація, властивості, «сухе тертя», промислова апробація.

*The work examines the characteristics of optimization and intensification of the traditional technology of carbonplastic composite for friction units. The technology of the composite obtaining and methods of production for each of its steps, allowing you to create highly efficient and economically viable cost composites for units reciprocating compressors which are operating under conditions of «dry friction» is developed.*

**Keywords:** modeling, optimization, technology of obtaining, physicomchanical modification, properties, «dry friction», industrial testing.

Создание машин нового поколения с высокими технико-экономическими показателями, отличающихся высокой надежностью и долговечностью, тесно связано с использованием новых конструкционных материалов, в том числе полимерных. Современные полимерные композитные материалы (ПКМ) имеют высокий уровень физико-механических и эксплуатационных свойств при интенсивных условиях эксплуатации. Для поршневых компрессоров без смазки основные требования выдвигаются к прочностным и антифрикционным свойствам композитных материалов узлов трения – компрессионным и опорным кольцам, сальниковым уплотнениям.

Эффективность применения поршневых колец и сальниковых уплотнений из современных фто-

ропластовых (Ф-4, ПТФЭ) композитов в поршневых компрессорах состоит в полном отказе от смазывания в узлах трения, уменьшении коэффициента трения и, как результат, расхода электроэнергии, уменьшении технологических расходов на осушку, очистку транспортируемого газа, повышении чистоты конечного продукта, возможностях применения компрессорной техники в медицинской, пищевой промышленности и специальных отраслях. В таких условиях фторопластовые ПКМ очень часто определяют ресурс работы и долговечность компрессора. Разработка и выбор материалов для деталей узлов трения является одной из наиболее ответственных задач современного компрессоростроения [1].

Основным наполнителем ПТФЭ композитов, который применяется наиболее широко, явля-

ются углеродные волокна (УВ) с определенным распределением по фракциям и в объеме композита. Такое распределение обеспечивается технологическими процессами их подготовки [2, 3].

Технология получения современных ПКМ на основе ПТФЭ (матрица) и УВ (волокнистый наполнитель) является специфичной и требует моделирования, разработки и создания технологического процесса подготовки матрицы и модификации наполнителей, что гарантирует получение ПКМ с требуемыми свойствами [4].

Современные достижения в области полимерного композитного материаловедения и механики композитных материалов обеспечивают проектное (расчетное) формирование структуры композитных материалов с комплексом заданных свойств [5]. Однако практическая реализация такой

структуры возможна лишь при условии применения наполнителей и композиции в целом с гарантированной фракционной структурой. Реализация этих требований тесно связана с особенностями и режимами работы технологического оборудования, которое обеспечивало бы состав, структуру и, в конечном итоге, свойства полимерного композита.

Особенно важным и перспективным этапом в развитии современных технологий создания фторопластовых ПКМ является целенаправленное регулирование их потребительских свойств варьированием параметрами технологического процесса создания и модификацией наполнителей [6].

Особенности фторопластовой матрицы и специфические условия ее переработки в композицию, а затем и формирование композита, диктуют жесткие технологические приемы и строгую последовательность их выполнения для получения качественного композитного материала с необходимыми свойствами. Традиционная, и достаточно обоснованная, технология изготовления 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.

#### **Материалы, основные задачи, направления и результаты исследований**

При практическом применении достичь оптимальных режимов работы технологического оборудования на каждом из этапов процесса не всегда предоставляется возможным в силу целого ряда как объективных, так и субъектив-

ных факторов. Одним из решений представляется максимальная интенсификация 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. Это повышает прочностные и трибологические свойства углефторопластового композита на 20-40%. (Патент Украины 40960). Термобарометрическая подготовка углеволоконистого 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 напряже-

ний. 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 существенный эффект при получении из композиции прессовки, которая имеет максимальные значения конструкционных и эксплуатационных свойств, получен при термопрессовании композиции в закрытой пресс-форме (т.н. «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 обеспечивает релаксацию напряжений, которые возникли в объеме композита при динамическом формировании (прессовании) и термообработке (спекании). Как следствие, он имеет невысокие показатели прочности при растяжении и износостойкости, необходимые для материалов узлов трения. Спекание прессовки фторопластового композитного материала в режиме каскадной термической обработки с учетом времени фазовых переходов позволяет снять не скомпенсированные напряжения от формирования в объеме композита, обеспечивая полное протекание структурных превращений и формирование нужного

соотношения фаз надмолекулярной структуры 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 проявляет 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 удается добиться оптимизацией технологии формования композиции в изделии. 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 (невозможностью реализации).

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.

Теоретические аспекты работы цилиндропоршневой группы

компрессора с применением смазки и обоснование целесообразности его перевода на бессмазочный режим работы показали, что недостаток масла, неправильный подбор состава 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 реально влияющих на этот процесс факторов определяет фактическую необходимость внедрения самосмазывающих композитных материалов на основе ПТФЭ, позволяющих исключить необходимость подачи смазки и при этом получить значительный технико-экономический эффект.

Учитывая приведенные выше факторы, проведя глубокий анализ современных композитных материалов и участвуя в создании и внедрении новых, совместно с Сумским НТЦ проводятся работы по созданию и модернизации поршневых компрессоров для режима «сухого трения». При этом подбор и разработка композитных материалов зависит от состава рабочей среды, условий и предельных режимов работы компрессора.

Например, на ГПУ «Полтавагаздобыча» компрессоры 6ГМ40-16/100-420 (изготовитель СМНПО им. М.В.Фрунзе, производительность 1600  $\text{nm}^3/\text{мин}$  и давление нагнетания 42 МПа) работали в традиционном режиме принудительной подачи смазки в полости цилиндров и сальников, что обеспечивало ресурс до вынужденной замены гильз в цилиндрах 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. 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, а штока – 0,1÷0,15 мм. Нарботка одного комплекта уплотнений – составила 6000÷8000 часов.

Модернизация компрессорного оборудования с разработкой, изготовлением и поставкой необходимых ПКМ для узлов и деталей «сухого» режима работы поршневых компрессоров позволяет обеспечить работу созданных сальниковых уплотнений не только при высоких давлениях нагнетания (до 200 МПа) и температурах (до 250°C), но и с минимальными перетечками в поршневых и утечками газа в сальниковых уплотнениях.

Для Уфимского и Новоуфимского НПЗ спроектирован и изготовлен вакуумкомпрессор без смазки 4М2,5-55/0,15-1,7 с начальным давлением 0,01 - 0,03 МПа, давлением нагнетания 1,7 МПа и производительностью 60  $\text{m}^3/\text{мин}$ .; после остановки компрессора вакуум в цилиндропоршневой группе сохранялся более 50 мин.

Проведена широкая модернизация компрессоров с переводом большего количества машин различных типов на работу без подачи масла: от бустерных компрессоров фирмы «Эслинген» с давлением всасывания от 0,2 МПа (Северодонецкое ПО «Азот») до давления нагнетания 42 МПа (компрессора 6ГМ40-16/100-420 на ГПУ «Полтавагаздобыча»). Работы внедрены более чем на 20 предприятиях СНГ на компрессорах, находящихся в промышленной эксплуатации.

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 «Эсслинген» (ФРГ); - Фирма «Буркхардт» (Швейцария); - Фирма «Борзиг» (ФРГ); - Фирма «Мафа Вурцен» (ФРГ); - Фирма «Хэмвэзи» (США).

Продолжаются работы по модернизации и переводу на бесшумный режим работы поршневых компрессоров различных фирм изготовителей.

Для ГПУ «Львовгаздобыча» на ДКС «Летня» осуществлена модернизация компрессора 4ГМ10-10/4-46С (завод изготовитель СМНПО им. М.В.Фрунзе), где наработка уплотнений на отказ составляла до 3000 часов. С переводом его на работу без смазки (производительностью 40 м<sup>3</sup>/мин и давлением нагнетания 4,6 МПа) без обеспечения осушки газа и отбора 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, при этом уменьшился износ цилиндров и штоков.

На ЗАО «Северодонецкое объединение Азот» проведена реконструкция цилиндропоршневых и сальниковых узлов 1 и 2 ступеней компрессора фирмы «Borsig», работающего на синтезгазе (давление нагнетания 6,7 МПа), с переводом на бесшумный режим работы цилиндров 1 и 2 ступени (1 ступень – Ø1320, 2 ст. – Ø700, шток – Ø150, ход поршня – 550 мм). 1-я-ступень температура всасывания (35÷40°C), температура нагнетания (190÷200°C); 2-я - ступень температура всасывания (60÷67°C), температура нагнетания (230÷235°C). На время ревизии 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 нара-

ботке одного комплекта уплотнений около 8000 часов (цилиндры 1 и 2 ступеней были расточены для восстановления геометрии).

Осуществлена разработка и создан ряд бесшумных компрессоров: 4М2,5-55/0,15-1,7 (Уфимский НПЗ) с давлением всасывания от 0,01 – 0,03 МПа, давлением нагнетания 0,17 МПа (производительностью 60 м<sup>3</sup>/мин); компрессор ВХ-0,45/230 (МНП РУСЬ-Б) с давлением всасывания 0,1—0,3 МПа, давлением нагнетания 25 МПа; компрессор для дыхательной смеси ВХ-0,25/320-С с давлением всасывания 0,1 – 0,3 МПа, давления нагнетания 32 МПа; компрессор для инертных газов 4ВМ2,5-25/6-С (Черкасский КПЗ) с давлением всасывания 0,1, давлением нагнетания 0,6 МПа.

#### **Выводы**

Разработанные самосмазывающиеся композитные материалы на основе ПТФЭ, апробированные методики расчетов и принципы конструирования уплотнений из них в зависимости от технологии их получения и геометрических данных конкретной машины, где они используются, а также учет реальных свойств газа, позволяют провести модернизацию компрессорных 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 фторопластовые композитные материалы и компрессорные базы, позволяют освоить производство новой гаммы компрессорных установок.

Указанные работы соответствуют современной мировой тенденции развития технологии полимерных композитных материалов, антифрикционного материаловедения и компрессоростроения, состоящей во все большем расширении номенклатуры и об-

ластей применения «сухих» компрессорных установок.

#### **Список литературы:**

1. Шелестова В.А. Новые антифрикционные материалы группы флувис на основе модифицированных углеродных волокон [Текст] / В.А. Шелестова, П.Н. Гракович, С.Г. Данченко, В.А. Смирнов // *Химическое и нефтяное машиностроение*. – 2006. - № 11. – С. 39-41.
2. Будник А.Ф. Технологические процессы подготовки наполнителя и композиции в производстве композиционных материалов на основе политетрафторэтилена [Текст] / А.Ф. Будник, О.А. Будник // *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. – 2007. – № 3/4 (27). – С. 9-13.
3. Будник О.А. Особенности технологии подготовки углеволоконистого наполнителя для композита на основе фторопласта-4 [Текст] / О.А. Будник, М.В. Бурмистр // *Вопросы химии и химической технологии*. – 2009. - № 4. – С. 80-85.
4. Будник А.Ф. Разработка абразивостойкого трехкомпонентного композитного материала на основе политетрафторэтилена [Текст] : дис. ...канд. техн. наук / А.Ф. Будник. – Киев, 1993. – 132 с.
5. Будник А.Ф. Дизайн полимерного композиту, змодельованого сферами та еліпсоїдами за критерієм узгодження властивостей [Текст] / А.Ф. Будник, В.А. Свідерський, А.О. Томас, П.В. Руденко, Х.В. Берладір // *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. – 2013. - № 2/5 (62). – С. 20-26.
6. Будник А.Ф. Вплив та місце технологічних процесів підготовки наповнювачів і композицій у технології виробництва композитів на основі фторопласту-4 [Текст] / А.Ф. Будник, О.А. Будник, М.В. Бурмистр // *Вістник СумДУ*. – 2007. - № 1. – С. 64-72.