

УДК 678.027.3:678.046

# КЛАССИФИКАЦИЯ ФТОРСОДЕРЖАЩИХ ИНГИБИТОРОВ ИЗНАШИВАНИЯ: МЕХАНИЗМЫ ДЕЙСТВИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРИМЕНЕНИЯ

Г.Н. Горбачевич

**Разработана классификация фторсодержащих ингибиторов изнашивания трибосистем. Проведен анализ механизмов противоизносного и антифрикционного действия фторкомпонентов различной молекулярной массы, технологии синтеза и применения. Установлены общие признаки ингибирующего влияния фторсодержащих компонентов в трибосистемах различного состава, обусловленные подобиями химического строения.**

## ВВЕДЕНИЕ

Концепция ингибитора изнашивания трибосистем, предложенная впервые в [1], относится к числу наиболее плодотворных в триботехнике общего и специального назначения. Развитие представлений о механизме коррозионно-механического изнашивания узлов трения в активных средах для металлополимерных систем [2] позволило сформулировать представления об ингибиторе изнашивания, в качестве которого могут выступать компоненты трибосистемы, введенные извне или образующиеся в процессе ее функционирования, способствующие подавлению неблагоприятного цикла трибохимических реакций [3].

Важным аспектом концепции коррозионно-механического изнашивания трибосистем является формирование циклов физико-химических реакций, в которых образуются продукты различного состава, строения и механизма действия, оказывающие катализирующее или ингибирующее влияние на кинетику изнашивания [2]. Установление структуры определяющего

цикла и механизма его функционирования позволяет предложить эффективные методы практического управления наиболее благоприятным процессом с целью образования продуктов трибохимических реакций, оптимизирующих триботехнические параметры узла трения [3].

В настоящее время разработана многочисленная номенклатура эффективных ингибиторов изнашивания различного состава, строения, агрегатного состояния, механизма действия. К ним относят ставшие классическими смазочные материалы (СМ) и смазочно-охлаждающие технологические среды (СОТС) с присадками, формирующими разделительные слои в зоне фрикционного контакта, триботехнические композиционные материалы (КМ) на металлических, полимерных, металлополимерных, керамических и смесевых матрицах, покрытия, формируемые на рабочих поверхностях методами химических, вакуумных, механо- (трибо-) химических и др. технологий, газовые среды заданного состава [4—8].

Предпринятая в [2, 3] попытка классифицирования ингибиторов изнашивания металлополимерных систем с использованием категорий таксономии свидетельствует о многообразии применяемых в триботехнике средств борьбы с изнашиванием и наличии перспективных направлений развития этой важнейшей области современной триботехники. Особую перспективу имеют ингибиторы изнашивания, разработанные с применением наноматериалов и нанотехнологий, обеспечивающих достижение синергических эффектов, не реализуемых при традиционных методологических подходах при решении задач повышения эксплуатационного ресурса трибосистем машин, механизмов, технологического оборудования, спецтехники [41].

К числу эффективных ингибиторов изнашивания относятся фторсодержащие компоненты различной молекулярной массы, применяемые в системах «металл-

металл» и «металл-полимер» в виде деталей их композиционных материалов (подшипников скольжения, уплотнений, сепараторов и др.), присадок к пластичным смазкам и смазочным маслам, тонкопленочных покрытий, нанесенных из растворов, суспензий, активной газовой фазы, полимер-олигомерных смесей [6—8].

При большом многообразии фторсодержащих ингибиторов изнашивания, различающихся по составу, структуре, молекулярной массе, технологии получения и методам практического применения, существуют общие

**Справка.** Работа выполнена в рамках сотрудничества ОАО «Гродненский механический завод» и кафедры «Материаловедения и ресурсосберегающих технологий» УО «Гродненский государственный университет им. Я. Купалы» (зав. кафедрой профессор Авдейчик С.В.)

закономерности их противоизносного и антифрикционного действия, обусловленные специфическими особенностями химического строения.

Установление механизмов реализации этих закономерностей в различных уровнях контактного взаимодействия ком-

понентов трибосистем, отличающихся по составу, структуре и свойствам, представляет существенный научный и практический интерес при создании эффективных методов повышения износостойкости узлов трения.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследовали металлополимерные системы, включающие металлический и полимерный компоненты, изготовленные из металлических (ст. 45, медь М-1, алюминий А00) и полимерных (полиамида 6, политетрафторэтилена, полиэтилена низкого давления, сополимера формальдегида с диоксоланом) материалов в состоянии промышленной поставки. В качестве ингибиторов изнашивания использовали фторсодержащие компоненты в виде высокомолекулярных (ПТФЭ), олигомерных («Эпилам», «Фолеокс»), полимер-олигомерных (ультрадисперсный политетрафторэтилен «Форум»), низкомолекулярных (фториды металлов) соединений, производимые в различных организациях стран СНГ. Анализ кинетики физико-химических процессов в модельных и реальных трибосистемах осуществляли с применением общепринятых методик (ИК- и ЭПР-спектроскопии, ДТА, ТСТ-спектроскопии, рентгеноструктурного исследования и т.д.).

Методика применения фторингибиторов изнашивания (ФИ) соответствовала рекомендациям разработчиков и определялась конструктивными особенностями и составом трибосистемы.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Несмотря на общность химического строения механизма ингибирующего действия фторсодержащих компонентов существенно зависит от молекулярной

массы и технологии их введения в зону фрикционного контакта (рис. 1).

Рассмотрим механизмы действия наиболее характерных видов ФИ. Противоизносное и антифрикционное действие полимерных продуктов (политетрафторэтилена и его аналогов) обусловлено, прежде всего, особенностями молекулярного строения цепи и надмолекулярного строения матрицы, обуславливающими сравнительно низкое сопротивление тангенциальному сдвигу и возможность пластического деформирования под действием нормальных нагрузок [6, 10].

Трибосистемы, в которых использован компонент, изготовленный из политетрафторэтилена (ПТФЭ), характеризуются стабильными параметрами характеристик при невысоких нагрузочно-скоростных режимах эксплуатации, в т.ч. при реверсивном характере перемещения элементов пары трения. Известно, что изделиям из политетрафторэтилена и его аналогов присущи сравнительно низкая износостойкость и хладотекучесть, что существенно сужает диапазон их практического применения в трибосистемах. Характерной особенностью механизма ингибирующего действия ПТФЭ является снижение интенсивности термоокислительных и термодеструкционных механизмов коррозионно-механического изнашивания трибосистемы вследствие их локализации в тонких приповерхностных слоях полимерного изделия или в механически закрепленном в микронеровностях металлического контртела слое, сформированном из частиц, введенных в состав смазочного материала [6, 10]. Вместе с тем, низкая способность продуктов изнашивания ПТФЭ к взаимодействию с металлическим контртелом (адсорбционному, хемосорбционному, адгезионному) не позволяет сформировать устойчивый разделительный слой в зоне фрикционного контакта, выполняющий функции ингибитора изнашивания в течение длительного периода контактного взаимодействия компонентов трибосистемы. Поэтому изделия из ПТФЭ характеризуются повышенным износом как при эксплуатации без подвода внешней смазки, так и при трении в присутствии нефтяных синтетических масел. Характерной особенностью механизма изнашивания фторопластовых элементов при трении по металлическим контртелам является образование сравнительно крупных фрагментов продуктов износа, имеющих вид тонких пленок с низкой адгезией к поверхности сопряженного вала, а также интенсивное разрушение его поверхностного слоя под действием радикальных и низкомолекулярных продуктов трибокрекинга. Коррозионно-механический механизм изнашивания пары трения «ПТФЭ-металл» проявляется и при использовании смазочного материала вследствие низкой смачиваемости поверхности и отсутствия устойчивого адсорбированного слоя на контактных поверхностях обоих компонентов трибосистемы [2].

Данные особенности эксплуатации узлов трения с компонентами, изготовленными ПТФЭ, существенно сни-

жают нагрузочно-скоростной диапазон их применения в машиностроении [6, 10].

Более высокой износостойкостью обладают изделия (например, сальниковые уплотнения), изготовленные из нитей и тканей на основе ПТФЭ, что обусловлено изменением условий контактного взаимодействия и увеличением показателей деформационно-прочностных характеристик вследствие ориентационных явлений, реализуемых в процессе получения полимерных полуфабрикатов [10]. Эффект повышения износостойкости проявляется в большей мере в полуфабрикатах, пропитанных суспензиями сухих смазок — графита, дисульфида молибдена, высокодисперсного порошкообразного политетрафторэтилена. Сухие частицы смазок, локализованные в ячейках тканого, нетканого или плетеного изделия, формируют на поверхности сопряженного контртела устойчивую разделительную пленку, способную к знакопеременному переносу и многоцикловому передоформированию. Благодаря сочетанию ячеистой макроструктуры уплотнительного элемента и подвижного смазочного компонента реализуется синергический эффект обеспечения необходимых деформационно-прочностных, теплофизических и триботехнических характеристик. Ингибиторы изнашивания, изготовленные из тканых, нетканых и плетеных полуфабрикатов на основе нитей из ПТФЭ, являются эффективными уплотнительными материалами, применяемыми в конструкциях запорной арматуры повышенной надежности [10]. Особый эффект их применения наблюдается при использовании в качестве сухих смазок полимер-олигомерных продуктов, полученных по технологии термогазодинамического синтеза (ТГД-синтеза) [11].

Разработанная в [11] технология ТГД-синтеза позволяет получать высокомолекулярные фторсодержащие продукты, состав которых определяется термодинамическими режимами проведения процесса. Как показано в [11], а также нашими исследованиями [12], полученный продукт представляет термодинамически равновесную систему, состоящую из полимерных и олигомерных компонентов, являющихся продуктами полимеризации исходного мономера — тетрафторэтилена и термического распада блочных полуфабрикатов. Наличие в продуктах ТГД-синтеза набора фракций различной молекулярной массы способствует их совместимости как с олигомерной, так и с полимерной матрицами и обеспечивает образование композитов с повышенными показателями деформационно-прочностных, адгезионных и триботехнических характеристик. Так, модифицирование промышленно выпускаемого политетрафторэтилена марки Ф-4ПН относительно небольшими количествами продуктов ТГД-синтеза (0,5—5,0 мас. %) существенно увеличивает показатели прочности при растяжении и износостойкости при снижении коэффициента трения изделия из полимер-олигомерного композита по металлическому контртелу без подвода внешней смазки. Эффект

модифицирующего действия, вероятно, обусловлен пластифицированием олигомерными фракциями поверхностных слоев исходных частиц ПТФЭ, облегчающим их взаимодействие; при повышенных температурах монолитизации (350—380 °С) и фторированного блочного полуфабриката. Высокомолекулярная фракция продуктов ТГД-синтеза, сосредоточенная на границе раздела единичных частиц, приводит к армированию переходного слоя между ними и образованию в объеме композита в процессе формирования пространственной сетки упрочненных структур. Кроме того, олигомерные компоненты модификатора, диффундируя в поверхностные слои частиц ПТФЭ, способствуют образованию малодофектных областей в объеме композита после его монолитизации.

Модифицирование ПТФЭ компонентами различного состава, природы, дисперсности обуславливают существенное увеличение износостойкости (до 600 и более раз) полимерного изделия при значительном увеличении коэффициента трения сопряжения и активации абразивного изнашивания контртела твердофазными частицами. Как правило, формирующийся в зоне фрикционного контакта разделительный слой и в этом случае характеризуется нестабильной структурой и недостаточной эффективностью ингибирующего действия. Механизм модифицирующего действия компонентов различного состава, строения и дисперсности, введенных в состав политетрафторэтилена, сводится к созданию механических препятствий процессам деформирования и разрушения полимерной матрицы под действием контактных, механических и тепловых нагрузок. Снижение интенсивности трибохимических превращений, приводящих к разрушению полимерного компонента трибосистемы, может быть достигнуто путем управления параметрами надмолекулярной и фазовой структуры композита.

Дисперсные частицы модификаторов оказывают влияние на размеры и количество сферолитных образований, причем, активные частицы способствуют формированию более прочных структур с высокой степенью упорядочения [6, 13]. Волокнообразные наполнители и модификаторы обуславливают увеличение устойчивости матрицы ПТФЭ к передоформированию и разрушению, главным образом, из-за стерических препятствий.

Характерной особенностью модифицирующего действия компонентов различного состава и дисперсности является низкий уровень адгезионного взаимодействия на границе раздела «матрица-наполнитель» вследствие отсутствия у ПТФЭ вязкотекучего состояния, характерного для других термопластов, и низкой поверхностной энергии, препятствующей формированию граничного слоя с повышенной прочностью. Вследствие этого армирующее влияние высокопрочных наполнителей в матрице ПТФЭ практически не реализуется, и многие параметры деформационно-прочностных ха-

рактических композитов заметно уступают параметрам исходного связующего [6, 14].

В ряде исследований отмечено, что активизация поверхности наполнителя путем энергетического воздействия, аппретирования или плазмохимической обработки способствует увеличению прочности граничного слоя и повышению деформационно-прочностных и триботехнических характеристик композиционных материалов [6, 13, 14].

Однако, эффективность действия подобного рода технологического модифицирования недостаточно высока при сравнительно сложной технологии реализации на промышленных предприятиях. Кроме того, анализ экспериментальных данных по использованию механизма формирования граничных слоев в наполненных композитах на основе ПТФЭ свидетельствует о том, что он носит преимущественно гипотетический характер без прямых доказательств изменения энергии межфазного взаимодействия в результате определенного вида модифицирования. Например, утверждение об эффективности плазмохимической обработки поверхностного слоя углеродных волокон (УВ) в среде фторсодержащих продуктов деструкции [15] не достаточно убедительно подтверждено экспериментально, а наблюдаемый эффект упрочнения композита с модифицированным волокном, по-видимому, в большой степени обусловлен образованием в процессе деструкции низкоразмерных полимерных частиц, выполняющих функцию армирующего компонента в граничном слое матрицы ПТФЭ.

Одним из наиболее вероятных механизмов повышения деформационно-прочностных и триботехнических характеристик композитов на основе ПТФЭ, наполненных УВ, модифицированных плазмохимическим методом, является развитие рельефа и увеличение вклада механической составляющей в упрочнение граничного слоя. Подтверждением этому предположению является повышение параметра деформационно-прочностных и триботехнических характеристик композитов, содержащих одинаковое количество фрагментов УВ, полученных по аналогичной технологии диспергирования, после механохимического активирования (МА) смеси компонентов на стадии их подготовки и переработки в изделия методом холодного прессования с последующим горячим спеканием в открытых и замкнутых формах (технология ВС) [16]. Независимо от применяемой технологии удается достичь заметного увеличения как показателя прочности при растяжении, так и износостойкости, в т.ч. при высоких степенях наполнения (35—40%), при которых традиционными технологиями не удается получить материалы с высокими параметрами служебных характеристик.

Существенный эффект повышения деформационно-прочностных характеристик и износостойкости композитов на основе ПТФЭ наблюдается при введении в состав N,N'-бис-имидов дикарбоновых кислот, способных формировать пространственную сетку, армирующую

полимерную матрицу [17]. Однако, при этом существенно увеличивается коэффициент трения материала по металлическому контртелу.

Эффективными ингибиторами изнашивания трибосистем являются фторсодержащие покрытия, сформированные из полимерных, полимер-олигомерных и олигомерных компонентов из растворов, суспензий, активной газовой фазы, ротационным методом [7—9, 18—21].

Применение полимерных фторсодержащих компонентов в качестве покрытий на деталях трения, формируемых из активной газовой фазы продуктов деструкции ПТФЭ в вакууме [19—21], по механизму ингибирующего действия аналогично действию блочных изделий.

Осажденный на рабочих поверхностях слой из продуктов рекомбинации низкомолекулярных радикальных фракций и продуктов термолита полимерного полуфабриката выполняет функцию антифрикционного компонента, уменьшающего интенсивность адгезионного взаимодействия элементов пары трения любого состава, и, как следствие, интенсивность термоокислительного и адгезионного и усталостного механизмов изнашивания.

Считают, что плазмохимический метод позволяет сформировать тонкие слои фторсодержащего ингибитора в результате рекомбинации макроадикальных продуктов термической деструкции и протекания процессов реполимеризации [19—21]. На наш взгляд, эта гипотеза требует уточнения, так как анализ особенностей структуры пленок, полученных по технологии плазмохимического осаждения, свидетельствует об образовании нанокпозиционных слоев, включающих компоненты различной молекулярной массы и строения. В [20—21] указано на наличие в пленках «элементов надмолекулярной структуры» полимерной матрицы. Характерным признаком формирующейся структуры является образование «уже на начальных стадиях, при малых значениях эффективной толщины... устойчивых частиц полимера с размерами до 3 мкм» [21]. Сравнительный анализ морфологии пленок, сформированных осаждением продуктов деструкции ПТФЭ из активной газовой фазы и натирированием частиц, полученных ТГД-синтезом, на твердую подложку, свидетельствует об их подобии, как морфологии, так и механизму ингибирующего действия.

Основным механизмом противоизносного действия тонких пленок ПТФЭ, полученных из активной газовой фазы, является снижение интенсивности адгезионного взаимодействия компонентов трибосистемы. Учитывая небольшую толщину пленок фторсодержащего ингибитора на деталях узла трения и сравнительно небольшую износостойкость, их наиболее целесообразно применять в качестве приработочных покрытий при обработке элементов трибосистем с небольшим эксплуатационным ресурсом или эксплуатируемых при относительно низких нагрузочно-скоростных режимах. Например, при

нанесении тонких фторсодержащих покрытий на уплотнительные элементы из резин, благодаря комплексному ингибирующему действию, снижается набухание в рабочих средах и увеличение износостойкости [20, 21].

Применение фторсодержащих олигомеров с молекулярной массой до 6 тыс. ед. позволяет расширить диапазон использования ингибиторов этого класса в системах «металл-полимер» и «металл-металл». Наличие в составе олигомерной макромолекулы («Эпилам», «Фолеокс») различных полярных и неполярных функциональных групп (-ОН, -СООН, -NH<sub>2</sub>, -СООМе, -CF<sub>3</sub> и др.) интенсифицирует процессы адсорбционного и хемосорбционного взаимодействия в зоне фрикционного контакта. Это позволяет повысить устойчивость разделительного слоя и управлять параметрами фрикционного взаимодействия компонентов трибосистем различного состава. Фторсодержащие олигомеры эффективны и как самостоятельные ингибиторы изнашивания трибосистем, и как функциональные модификаторы, например, повышающие устойчивость масляной пленки на поверхностях трения или увеличивающие межфазное взаимодействие в композитах на основе ПТФЭ, наполненных малоактивными функциональными модификаторами (углеродным, арамидным, базальтовым волокном, графитом и др.).

Особенностью механизма ингибирующего действия фторсодержащих олигомеров (ФСО) является их адсорбция на ювенильных поверхностях фрикционного контакта микронеровностей. Это способствует снижению вероятности их адгезионного взаимодействия с образованием мостиков сварки. Фрагменты олигомерной пленки, сформированной на поверхностях трения, обладают свойствами многофункционального ингибитора изнашивания трибосистемы благодаря способности к хемосорбции, знакопеременному массопереносу в процессе трения и хемосорбционному взаимодействию с ювенильными участками пятен фактического контакта. Благодаря наличию полярных групп фторсодержащие олигомеры эффективны для трибосистем различного состава, в т.ч. металлополимерных и прецизионных.

Вместе с тем, полярное строение макромолекул ФСО увеличивает силу межмолекулярного взаимодействия, что существенно повышает усилие тангенциального сдвига в тонких слоях ингибитора изнашивания и негативно влияет на триботехнические параметры мало нагруженных, низкоскоростных и прецизионных систем. Кроме того, тонкопленочные ингибиторы изнашивания, сформированные из ФСО по растворной или ротационной технологиям, обладают низким эксплуатационным ресурсом вследствие толщины, не превышающей величины зазора в трибосопряжении (1—10 мкм) и поэтому используются, главным образом, как приработочные.

Ингибирующий эффект противоизносного действия тонких пленок фторсодержащих олигомеров усиливается при введении в их состав низкоразмерных частиц

оксидов, металлов, сухих смазок, силикатов и т.п. [18]. Это обусловлено повышением нагрузочной способности композиционных разделительных слоев и реализацией в зоне фрикционного контакта знакопеременного переноса частиц модификатора. Олигомерные макромолекулы в этом случае способствуют закреплению низкоразмерных частиц введенных компонентов на нагруженных участках контакта и образованию устойчивого антифрикционного и противоизносного композиционного покрытия. При использовании наноразмерных модификаторов существенную роль играют процессы структурирования олигомерной матрицы под действием собственного некомпенсированного заряда, благодаря чему повышается прочность композита и его устойчивость к знакопеременным воздействиям. Фторсодержащие полярные олигомеры способствуют также упрочнению поверхностных слоев контактирующих элементов трибосистемы благодаря «залечиванию» низкоразмерных дефектов [18].

Высокоэффективными ингибиторами изнашивания комплексного механизма действия являются полимер-олигомерные компоненты, образованные в результате термолитиза политетрафторэтилена в среде газообразных продуктов термодеструкции, называемые продуктами ТГД-синтеза [11]. Наличие в составе продуктов ТГД-синтеза полимерных и олигомерных компонентов, находящихся в термодинамическом равновесии, обуславливает возможность образования разделительной композиционной пленки в зоне фрикционного контакта, обладающей низким сопротивлением сдвигу, способностью к многократному передеформированию без разрушения и знакопеременному переносу на поверхности трения практически любого состава и строения. Эффект комплексного ингибирующего действия продуктов ТГД-синтеза обусловлены сочетанием набора олигомерных фракций различной массы, полярности и зарядовой активности и высокомолекулярной (низкоразмерной) фракции, обеспечивающей армирование и повышение нагрузочной способности разделительного слоя. Особенностью полимер-олигомерных продуктов термодеструкции ПТФЭ является их термодинамическая устойчивость и совместимость с полимерными, олигомерными и низкомолекулярными компонентами. Это позволяет использовать продукты ТГД-синтеза как функциональный модификатор со свойствами ингибитора изнашивания при создании композиционных материалов триботехнического назначения, их переработке в изделия, нанесении покрытий на поверхности деталей трения, создании смазок, смазочно-охлаждающих и технологических сред. Эффект комплексного ингибирующего действия полимер-олигомерных смесей фторсодержащих компонентов увеличивается при введении в их состав низкоразмерных частиц металлов, оксидов, силикатов и т.п. Например, при введении наночастиц металлов в процессе фрикционного взаимодействия формируется

нанокomпозиционная металлополимерная разделительная пленка, обладающая высокой износостойкостью и проводимостью. Композиционные материалы, сформированные с применением металлополимерных фторсодержащих продуктов, в виде изделий или смазок могут быть использованы в скользящих контактах электрических систем [11, 12].

Фторсодержащие компоненты различной молекулярной массы и дисперсности являются эффективными присадками смазочных масел, пластичных смазок, смазочно-охлаждающих и технологических сред, используемых как в процессах изготовления элементов узлов трения, так и их эксплуатации в различных нагрузочно-скоростных условиях нагружения. Традиционным фторсодержащим модификатором смазок являются частицы ПТФЭ различной дисперсности, которые образуют в зоне контакта разделительную пленку, препятствующую процессам схватывания и глубинного разрушения на пятнах фактического контакта. Роль жидкофазной среды в таких материалах сводится к транспортированию ингибирующих компонентов в зону фрикционного взаимодействия и теплоотводу от нагруженных участков. Важным аспектом эффективного действия смазок с дисперсными частицами ПТФЭ является обеспечение стабильных реологических характеристик и предотвращение явления синерезиса или осаждения высокомолекулярных компонентов.

При использовании в качестве модификаторов смазочных материалов олигомерных компонентов существенно повышаются показатели их реологических и деформационных характеристик, однако ингибирующий противоизносный эффект выражен в меньшей степени по сравнению с высокомолекулярными компонентами. Поэтому наиболее эффективны дисперсные частицы фторсодержащих полимеров, размер которых соизмерим с параметрами микрошероховатостей контактных поверхностей.

Низкомолекулярные фторсодержащие соединения оказывают ингибирующее противоизносное действие при введении их в качестве модификаторов компонентов триботехнических материалов, которые используют для изготовления деталей узлов трения, покрытий, смазок. Фторированные углеродные дисперсные и волокнистые наполнители (фторированный теуглерод и фторированное углеродное волокно) способствуют упрочнению композитов на основе политетрафторэтилена [10] и других полимерных и олигомерных матриц (полиамидных, эпоксидных, полиэфирных и др.). Формирование в результате обработки поверхностного слоя с привитыми атомами фтора увеличивает смачиваемость наполнителей растворами, расплавами полимерных и олигомерных матриц и прочность границы раздела «матрица-наполнитель». Прививка атомов фтора к поверхностному слою частиц различного состава и дисперсности может быть осуществлена химическим, механохимическим, трибохимическим способом при ис-

пользовании низкомолекулярных, олигомерных, полимер-олигомерных и полимерных компонентов. Для получения фторированных композитов в промышленных масштабах могут быть использованы технологические установки барабанного, лопастного, ударного механизма действия (шаровые мельницы, дисмембраторы и дезинтеграторы, якорные и лопастные смесители, вальцы и т.п.). Использование фторированных компонентов, активированных в результате механического или трибохимического воздействия, существенно повышает показатели прочностных и триботехнических характеристик композитов на основе политетрафторэтилена [6] и сшивающихся олигомеров.

На основании анализа особенностей механизма ингибирующего действия фторсодержащих полимерных, олигомерных и полимер-олигомерных компонентов разработаны материалы и методы повышения износостойкости трибосистем, применяемых в машиностроении, в т.ч. при создании технологического оборудования, автомобильных агрегатов повышенного ресурса, герметизирующих устройств, применяемых в трубопроводах высокого и низкого давления, компрессорах для получения сжатых и сжиженных газов. Разработана гамма триботехнических и герметизирующих материалов на основе политетрафторэтилена и алифатических полиамидов («Герметум», «Герметекс», САМ и т.п.), составы композиционных покрытий для элементов трибосистем и способы их нанесения, смазочные и амортизирующие среды для высоконагруженных узлов трения и динамических устройств. Новые материалы и технологии их формирования и переработки защищены более чем 40 патентами на изобретение РБ, РФ и Украины и использованы при промышленном выпуске автомобильных амортизаторов, карданных валов, запорной арматуры.

Разработана нормативная документация, регламентирующая применение новых материалов на основе фторсодержащих компонентов в машиностроении.

## ВЫВОДЫ

Общность химического строения низкомолекулярных, олигомерных, полимер-олигомерных и полимерных компонентов, состоящая в наличии в составе молекул атомов фтора, обуславливает единство механизмов их ингибирующего действия в трибосистемах различного состава и строения. Общим является формирование композиционного разделительного слоя или в зоне фрикционного контакта, или на границе раздела «молекулярная матрица-наполнитель», который препятствует процессам изнашивания компонентов трибосистемы. Механизм проявления ингибирующего действия фторсодержащего ингибитора определяется его составом и особенностями применения в системе в виде композиционного материала или его компонентов, в виде покрытий, смазок. При различных вариантах введения в состав малоизнашивающейся трибосисте-

мы фторсодержащие ингибиторы различного состава и молекулярной массы препятствуют формированию неблагоприятных циклов трибохимических реакций, в которых преобладающую роль играют процессы образования активных радикальных продуктов и диспергирования поверхностного слоя металлического контртела, окислительные процессы, интенсифицируемые локальными взаимодействиями на пятнах

фактического контакта, коррозионные процессы, обусловленные взаимодействием продуктов трибохимических реакций металлического и полимерного компонентов.

Выбор типа фторсодержащего ингибитора изнашивания обусловлен особенностями конструкции трибосистемы, условиями ее эксплуатации и требованиями к ее эксплуатационному ресурсу.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Прейс Г.А. Электрохимические явления при трении металлов / Г.А. Прейс, А.Г. Дзюб // Трение и износ, 1980. Т. 2, № 1. — С. 217—235.
2. Струк В.А. Трибохимическая концепция создания антифрикционных материалов на основе многотоннажно выпускаемых полимерных связующих. Дисс. ... д-ра техн. наук: 05.02.01. — Гомель, 1988. — 240 с.
3. Гольдаде В.А. Ингибиторы изнашивания металлополимерных систем / В.А. Гольдаде, В.А. Струк, С.С. Песецкий. — М.: Химия, 1993. — 240 с.
4. Авдейчик С.В. Трибохимические технологии функциональных композиционных материалов. Ч. 1, ч. 2. / С.В. Авдейчик, и [др.]; под ред. В.А. Струка, Ф.Г. Ловшенко. — Гродно: ГГАУ, 2007, 2008. — 320 с., 399 с.
5. Присевко А.Ф. Теоретические и технологические основы формирования газотермических водородостойких покрытий. Дисс. ... д-ра техн. наук. — Минск: 1998. — 322 с.
6. Охлопкова А.А. Физико-химические принципы создания триботехнических материалов на основе полимеров и ультрадисперсных керамик. Дисс. ... д-ра техн. наук. — Якутск, 2000. — 269 с.
7. Овчинников Е.В. Структура и свойства триботехнических покрытий на основе растворов фторсодержащих олигомеров. Дисс. ... канд. техн. наук. — Гродно, 1997. — 124 с.
8. Бойко Ю.С. Технологические особенности формирования композиционных тонкопленочных покрытий на основе фторсодержащих полимеров и олигомеров. Дисс. ... канд. техн. наук. — Гродно, 1998. — 127 с.
9. Напреев И.С. Управление трибохимическими характеристиками подшипниковых узлов методом эпиламирования. Дисс. ... канд. техн. наук. — Гомель, 1998. — 111 с.
10. Сиренко Г.А. Антифрикционные карбопластики. — К.: Техника, 1985. — 195 с.
11. Металлополимерные наноккомпозиты (получение, свойства, применение) / В.М. Бузник, В.М. Фомин, А.П. Алхимов и [др.]. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. — 260 с.
12. Кравченко В.И. Промышленность региона: проблемы и перспективы инновационного развития / В.И. Кравченко и [др.]. — Гродно: ГГАУ, 2008. — 420 с.
13. Горбачевич Г.Н. Структура и технология углеродных герметизирующих материалов для статических и подвижных уплотнений. Дисс. ... канд. техн. наук. — Гродно, 2002. — 138 с.
14. Гракович П.Н. Применение фторопластового композита Флувис в поршневых компрессорах / П.Н. Гракович и [др.]. //Материалы. Технологии. Инструмент. — № 3, 2005. — С. 33—36.
15. Серафимович В.В. Влияние плазмохимической обработки углеграфитовых волокон в среде фторорганических газов на их физико-механические свойства / Поликомтриб-2007. Тезисы докл. Межд. научно-техн. конф. — Гомель: ИММС НАН Б, 2007. — С. 186—187.
16. Патент ВУ 9396С1. Способ изготовления изделия из композиционного материала на основе вязкого полимера (примеры) / В.А. Струк, Г.А. Костюкович, В.И. Кравченко и [др.] № а20040491; заявл. 31.05.2004, опубл. 30.06.2007, приоритет 30.12.2005.
17. Биран В.В. Создание и исследование композиционных антифрикционных материалов на основе N,N'-бис-имидов и модифицированных полиамидов. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. — Минск, 1983. — 16 с.
18. Овчинников Е.В. Тонкие пленки фторсодержащих олигомеров (Е.В. Овчинников, В.А. Струк, В.А. Губанов. — Гродно, ГГАУ, 2007. — 326 с.
19. Рогачев А.В. Кинетические и физико-химические закономерности процессов тепло- и массопереноса при формировании тонкопленочных металлополимерных систем в вакууме. Дисс. ... д-ра хим. наук. — М.: 1998. — 364 с.
20. Новые ресурсосберегающие технологии и композиционные материалы / Ф.Г. Ловшенко, Ф.И. Пантелеенко, А.В. Рогачев и [др.]. — М.: Энергоатомиздат; Гомель: БелГУТ, 2004. — 519 с.
21. Наноккомпозитные машиностроительные материалы: опыт разработки и применения / С.В. Авдейчик и [др.]; под ред. В.А. Струка. — Гродно: ГрГУ, 2006. — 403 с.