

НОВЫЙ КЛАСС ИЗНОСОСТОЙКИХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ РАДИАЦИОННОЙ МОДИФИКАЦИЕЙ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА В РАСПЛАВЕ

С. А. ХАТИПОВ, д-р физ.-мат. наук, С. А. СЕРОВ, Н. В. САДОВСКАЯ, канд. физ.-мат. наук

ФГУП «Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л. Я. Карпова», Москва

Представлены результаты исследования трибохарактеристик новых материалов, полученных радиационной модификацией политетрафторэтилена (ПТФЭ). Показано, что при дозах модификации выше 200 кГр интенсивность изнашивания ПТФЭ снижается более чем на 4 порядка величины, а коэффициент трения заметно ниже, чем у исходного полимера. На основе электронно-микроскопического исследования предложен механизм снижения интенсивности изнашивания. Обсуждается опыт применения новых материалов в трибопарах различных изделий промышленности.

Введение

Традиционным методом повышения износостойкости политетрафторэтилена (ПТФЭ) является наполнение его различными частицами [1]. С использованием этого метода в России и за рубежом разработан широкий спектр материалов для промышленного производства. К разработке этих материалов до сих пор привлечены большие научные силы, и качественные показатели композитов на основе ПТФЭ постоянно улучшаются. Относительно новым направлением является введение в ПТФЭ наномодификаторов. Для ПТФЭ с наночастицами оксида алюминия, подвергнутыми поверхностному фторированию, достигнута интенсивность износа 10^{-7} мм³/(Н·м) [2]. К числу новейших разработок относится новый класс макрокомпозиционных материалов, в которых ПТФЭ играет роль наномодификаторов [3].

В отличие от метода создания композитов радиационное модифицирование не требует введения наполнителей и в ряде случаев позволяет значительно улучшить механические свойства полимеров за счет сшивания полимерных цепей. Примером эффективного использования радиационного модифицирования является полиэтилен, в котором облучение уменьшает износ в 2–3 раза [4].

Облучение ПТФЭ при комнатной температуре снижает износ [5–7]. Однако промышленного применения этот метод не нашел, так как радиационная модификация в таком режиме приводит к сильной деградации механических свойств [1, 8]. В последнее время были разработаны специальные режимы радиационного модифицирования ПТФЭ при температурах выше температуры плавления кристаллической фазы, способствующие улучшению механических свойств [9–13]. В то же время информация о трибологических свойствах таких модификаций в литературе крайне ограничена [12–14].

Настоящая работа посвящена исследованию трибологических свойств нового класса материалов, полученных радиационной модификацией ПТФЭ при температурах выше температуры плавления.

Материалы и методики исследования

Исследовали блочные образцы спеченного ПТФЭ суспензионной полимеризации, изготовленные на Кирово-Чепецком химическом комбинате из порошка марки ПН стандартным методом одноосного прессования порошка с последующим спеканием.

Облучение блоков ПТФЭ проводили при температурах выше точки плавления кристаллитов в инертной среде в присутствии контролируемой примеси моле-

кулярного кислорода и паров воды на гамма-установке КСВ-500 ФГУП НИФХИ им. Л. Я. Карпова гамма-квантами Co-60 с энергией 1,25 МэВ. Образцы облучали в радиационно-химическом аппарате [15], конструкция которого позволяла задавать требуемые условия облучения.

Морфологию продуктов износа и пленки переноса исследовали с использованием сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения с автоэмиссионным катодом JSM-7500F фирмы “JEOL” (Япония). Изображения получали в режиме низкоэнергетических вторичных электронов, поскольку именно он обеспечивал наиболее высокое разрешение (при энергии первичного пучка 2 кэВ разрешение составляло 1,5 нм). С целью исключения эффектов зарядки, а также разрушения объектов под воздействием электронного пучка применяли следующие методические подходы: исследования проводили при низком токе электронного пучка ($3 \cdot 10^{-11}$ А), что обеспечивалось наличием автоэмиссионного катода с холодной полевой эмиссией. Также применяли специальный режим Gentle Beam, при котором электроны зонда замедлялись непосредственно у поверхности образца. В результате, с одной стороны, энергия первичных электронов уменьшалась до ультранизких значений, что приводило к снижению зарядовых эффектов и исключению разрушения образца, с другой – диаметр электронного зонда оставался небольшим, что способствовало сохранению высокого разрешения. Наконец, на поверхность скола наносили методом магнетронного напыления металлическую пленку платины толщиной ~5 нм.

Исследование физико-механических характеристик проводили на универсальной испытательной машине Инстрон 3365 (США). Для исследования деформационных кривых при сжатии изготавливали цилиндрические образцы диаметром 10 мм и высотой 15 мм.

Триботехнические характеристики исследовали с использованием трибометра UMT-3 фирмы CETR (США). Испытания проводили в кинематической схеме палец – диск в условиях сухого трения при различных контактных давлениях в интервале 1–21 МПа и скоростях скольжения диска относительно неподвижного образца в интервале 0,002–1 м/с. В качестве контртела использовали диск с шероховатостью $R_a = 0,1\text{--}0,2$ и твердостью HRC = 40. Образцы для испытаний вытачивали в виде цилиндров диаметром 6 мм и высотой 15 мм. Образец располагался на расстоянии 25 мм от центра диска.

Исследовали следующие трибохарактеристики:

$$\mu = \frac{F_{\text{тр}}}{F}; I = \frac{\Delta V}{F L}; \Delta V = \frac{\Delta m}{\rho}; I_z = \frac{\Delta Z}{L},$$

где μ – коэффициент трения;

I – удельная интенсивность изнашивания, $\text{мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$;

ΔV – изменение объема за время испытания, м^3 ;

F – контактная нагрузка на образец;

$L = v \cdot t$ – путь трения;

v – линейная скорость скольжения;

t – продолжительность испытания;

Δm – изменение массы в процессе испытания;

ρ – плотность материала;

I_z – интенсивность линейного износа;

ΔZ – изменение линейного размера образца.

Плотность исследуемых образцов определяли методом гидростатического взвешивания с точностью $\pm 0,001 \text{ г/см}^3$. Изменение массы образца до и после испытания определяли путем взвешивания на микровесах AND (модель GR 202, Japan) с дискретностью показаний 0,01 мг.

Интенсивность линейного износа I_z определяли на этапе установившегося трения, характеризуемого линейной зависимостью ΔZ от времени. Тем самым исключалось влияние переходных процессов, связанных с притиркой трибопары. Для исходного ПТФЭ притирка поверхностей происходила за время пробега нескольких метров и общий путь трения при испытаниях не превышал 300 м. В связи с чрезвычайно высокой износостойкостью материалов, полученных радиационной модификацией ПТФЭ, притирка фрикционной пары происходила при пробегах 100–150 км и общий путь трения при испытаниях обычно составлял 400–600 км. Удельная интенсивность изнашивания I является усредненной величиной, характеризующей объемный (и массовый) износ, включающий как этап притирки поверхностей, так и этап установившегося трения.

Свойства новых материалов

В таблице приведены некоторые физико-механические характеристики исходного ПТФЭ и наиболее широко применяемых марок нового материала, полученного радиационной модификацией ПТФЭ в расплаве при разных дозах облучения. Возрастание плотности с увеличением дозы модификации связано в большей степени со снижением пористости материала, а не ростом кристалличности [16].

НЕКОТОРЫЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСХОДНОГО И РАДИАЦИОННО-МОДИФИЦИРОВАННОГО ПТФЭ

Материал	Доза модификации, кГр	Плотность, г/см ³	Модуль упругости при сжатии (ГОСТ 9550–81), МПа	Напряжение при 10%-деформации при сжатии (ГОСТ 4651–82), МПа	Условный предел текучести (ГОСТ 4651–82), МПа
Ф4 (исходный)	0	2,150	380	10	5
Ф4РМ5	50	2,190	400	17	11
Ф4РМ10	100	2,200	500	20	12
Ф4РМ20	200	2,205	790	25	15

Ниже представлены результаты исследования трибохарактеристик исходного ПТФЭ и его радиационных модификаций, а также морфологии продуктов изнашивания и пленки переноса.

Известно [17], что на начальном этапе скольжения в трибопаре коэффициент трения ПТФЭ имеет более высокое значение, чем установившееся значение при дальнейших испытаниях. Это связывают с отсутствием ориентации полимерных цепей на поверхности образца и пленки переноса на контртеле. По мере образования пленки переноса и ориентации полимерных цепей коэффициент трения уменьшается. В случаях, когда направление скольжения ПТФЭ постоянно меняется, молекулярная ориентация, совпадающая с направлением движения, никогда не достигается, и коэффициент трения сохраняет высокое начальное значение. При смене направления скольжения коэффициент трения мгновенно увеличивается и затем постепенно уменьшается до равновесного значения по мере реориентации молекулярных цепей [17].

Как видно на рис. 1, изменение коэффициента трения μ от времени скольжения характерно как для исходного, так и для радиационно-модифицированного ПТФЭ. Однако у модифицированного материала равновесные значения μ устанавливаются приблизительно в 2 раза медленнее. При этом сами значения коэффи-

ента трения для модифицированного ПТФЭ заметно ниже, чем для исходного материала (рис. 1).

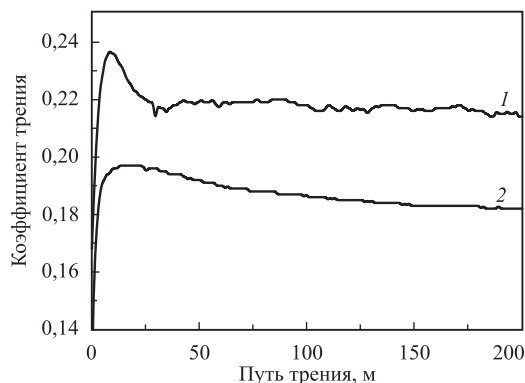


Рис. 1. Кинетика изменения коэффициента трения в процессе трибологического испытания исходного Ф4 (1) и модифицированного Ф4РМ20 (2). Контактное давление 5 МПа, скорость скольжения 1 м/с

Эмпирическая зависимость коэффициента трения от скорости скольжения описывается степенной функцией вида $\mu \sim v^n$ [18]. Для показателя степени n в литературе приводятся значения 0,26 [18] и 0,3 [19]. Относительное движение двух трущихся поверхностей приводит к вытягиванию фибрилл из ПТФЭ с последующим образованием пленки на поверхности образца [18]. Такая деформация полимера является вязкоупругой. При увеличении скорости скольжения увеличивается коэффициент трения, так как с увеличением скорости деформирования полимера увеличивается его сопротивление вязкому течению. Этот вывод подтверждается уменьшением коэффициента трения с повышением температуры, так как при этом уменьшается вязкость [18, 20–22].

Зависимость коэффициента трения от скорости скольжения для модифицированного ПТФЭ приведена на рис. 2. Как видно, эта зависимость также близка к степенной. Однако радиационное модифицирование приводит к значительно более слабой зависимости μ от скорости скольжения, показатель степени снижается до 0,1. Характер зависимости μ от контактного давления для модифицированного материала остается без изменений: увеличение нагрузки приводит к снижению μ (рис. 2).

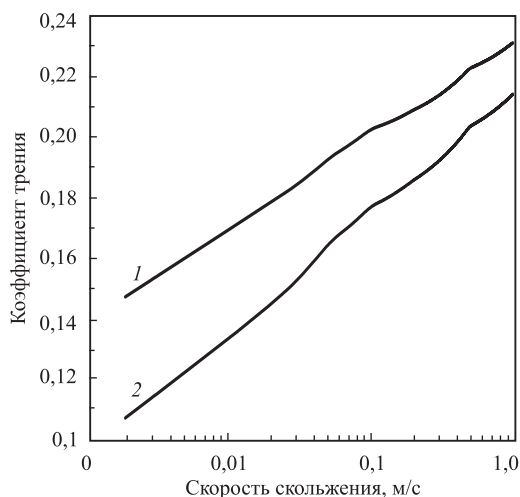


Рис. 2. Зависимость установившегося коэффициента трения от скорости скольжения модифицированного Ф4РМ20 при контактных нагрузках 200 (1) и 600 Н (2)

В наибольшей степени радиационное модифицирование ПТФЭ в расплаве влияет на интенсивность изнашивания. На рис. 3 приведена зависимость удельной интенсивности изнашивания ПТФЭ от дозы модифицирования. При поглощенной дозе 200 кГр интенсивность изнашивания уменьшается более чем на 4 порядка величины. Увеличение дозы облучения от 200 до 800 кГр сопровождается дальнейшим небольшим снижением интенсивности изнашивания. Таким образом, износостойкость новых материалов в области поглощенных доз более 200 кГр оказывается почти на порядок величины выше, чем композитов с показателем интенсивности изнашивания на уровне 10^{-7} мм³/(Н·м) [2].

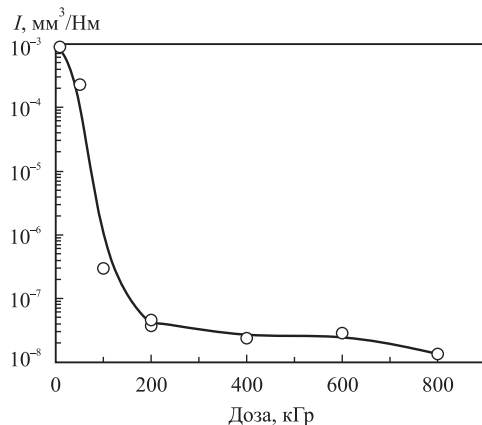


Рис. 3. Зависимость удельной интенсивности изнашивания ПТФЭ от дозы модифицирования. Контактное давление 5 МПа, скорость скольжения 1 м/с

Такая зависимость изнашивания от поглощенной дозы подобна зависимости, наблюдаемой для обычного режима облучения ПТФЭ при комнатной температуре [6]. Однако облучение ПТФЭ при комнатной температуре снижает изнашивание только на два порядка величины [6, 7].

Удельная интенсивность изнашивания для исходного ПТФЭ монотонно растет с увеличением нагрузки (рис. 4, а), т. е. зависимость интенсивности изнашивания от контактного давления P нелинейна с показателем больше единицы. Для модифицированного ПТФЭ эта зависимость существенно изменяется и имеет три характерные области: до 10 МПа, где I практически не зависит от P ; выше 20 МПа, где наблюдается резкое увеличение I , и переходная область 10–20 МПа (рис. 4, б). Нарастание изнашивания в переходной области коррелирует с условным пределом текучести модифицированного ПТФЭ при сжатии (см. таблицу).

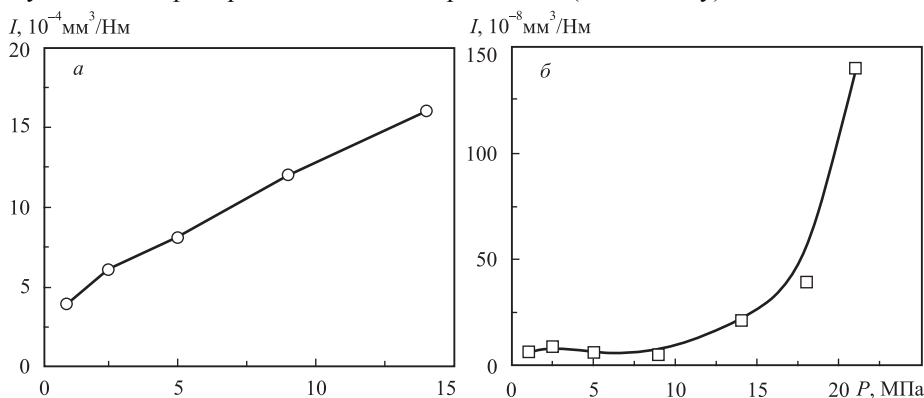


Рис. 4. Зависимость удельной интенсивности изнашивания исходного Ф4 (а) и модифицированного Ф4РМ20 (б) от контактного давления (скорость скольжения 1 м/с)

Исследование морфологии продуктов изнашивания и пленки переноса позволяет сделать вывод о различии в механизме изнашивания исходного и модифицированного ПТФЭ.

Электронно-микроскопический анализ продуктов изнашивания ПТФЭ показывает, что радиационное модифицирование существенно изменяет их морфологию (рис. 5 *а, б*). Продукты изнашивания исходного ПТФЭ имеют вид плоских чешуек с характерным размером до 1 мм, для Ф4РМ20 эти частицы на три порядка величины меньше по размеру (около 1 мкм) и имеют вид зерен неправильной формы.

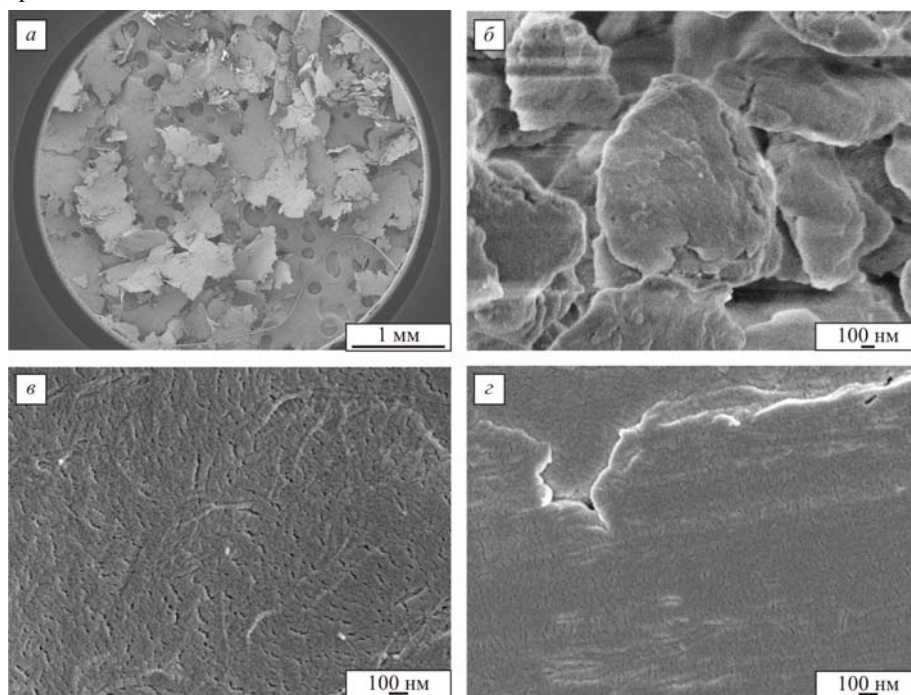


Рис. 5. Продукты изнашивания ПТФЭ (*а, б*) и пленка переноса на контртеле (*в, г*) для исходного Ф4 (*а, в*) и модифицированного Ф4РМ20 (*б, г*). Контактное давление 5 МПа, скорость скольжения 1 м/с

На рис. 5 *в, г* представлены электронно-микроскопические изображения участков поверхности трения на контртеле после трибоконтакта. Анализ изображений при различных увеличениях позволяет сделать вывод о том, что пленка переноса образуется в обоих случаях – как для Ф4, так и Ф4РМ20, но толщина этой пленки для модифицированного ПТФЭ существенно меньше.

Известно, что интенсивность изнашивания коррелирует с размером продуктов изнашивания и толщиной пленки переноса. В работах [23, 24] была установлена прямая взаимосвязь между интенсивностью изнашивания, размером частиц изнашивания и динамикой выброса их из зоны трения. Было сделано предположение, что мелкие частицы изнашивания легко встраиваются в неровности поверхности, способствуя образованию тонкой однородной пленки переноса и уменьшению интенсивности изнашивания. Наблюдаемое значительное снижение скорости изнашивания радиационно-модифицированного ПТФЭ и данные электронно-микроскопического исследования, в общем, подтверждают эти предположения.

Для ПТФЭ существуют два значительно различающихся режима изнашивания: слабое изнашивание при малых скоростях скольжения и сильное изнашивание при высоких скоростях скольжения [18, 20, 25]. Граница между этими режи-

мами проходит в районе скорости скольжения около 0,01 м/с. Указанные режимы изнашивания соответствуют двум разным механизмам.

В режиме слабого изнашивания ПТФЭ на контртеле образуется тонкая, ровная, хорошо прилипающая пленка переноса [17, 18, 20, 25–28]. При этом коэффициент трения μ обычно меньше 0,1, а удельная интенсивность изнашивания варьируется в пределах $(1–10) \cdot 10^{-5} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$.

В режиме сильного изнашивания образуется неоднородная пленка большой толщины, коэффициент трения увеличивается, а интенсивность изнашивания более чем на порядок выше, чем при режиме слабого изнашивания.

В работе [21] было установлено, что образцы из ПТФЭ в режиме сильного изнашивания имеют трещины, распространяющиеся в направлении скольжения на глубину, соответствующей толщине продуктов износа. Это приводит к развитию процесса деляминационного изнашивания, аналогичного процессу, описанному в деляминационной теории изнашивания [29]. Для образцов из ПТФЭ при слабом износе таких трещин обнаружено не было [21]. Согласно [18] механизм слабого изнашивания связан с процессом вытягивания фибрилл из ламеллярных структур ПТФЭ. Таким образом, оба механизма изнашивания различаются масштабом отслаиваемых (разрушаемых) структур.

Представленные нами результаты по изнашиванию исходного и модифицированного ПТФЭ получены при относительно высоких скоростях скольжения (1 м/с), находящихся в режиме сильного изнашивания. Чрезвычайно высокая износостойкость модифицированного ПТФЭ в этом режиме свидетельствует о перемене механизма изнашивания. Объяснение этому может быть дано на основе результатов сравнительного исследования морфологии и пористости исходного и облученного ПТФЭ [12, 30]. Радиационное модифицирование приводит к снижению пористости, а также к разрушению ламеллярной структуры и образованию структуры в виде однородной неупорядоченной фибриллярной сетки. При такой структуре блокируются оба механизма изнашивания и достигается чрезвычайно высокая износостойкость.

Опыт применения и сертификация новых материалов

Разработанный метод радиационной модификации ПТФЭ обеспечивает:

- 1) возможность получения блочных и пленочных изделий;
- 2) отсутствие в объеме низкомолекулярных углеводородных сенсibilизаторов;
- 3) достижение значительного повышения износостойкости и снижения ползучести при модифицировании дозами, приемлемыми для гамма-источников;
- 4) возможность модифицирования композиционных материалов на основе ПТФЭ;
- 5) равномерное распределение свойств по объему заготовки.

Сертификация новых материалов проводилась на базе испытательного центра ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов». Были проведены испытания Ф4РМ20 в интервале рабочих температур от -60 до 250°C (до 1000 ч). В частности, было показано, что он химически стоек и может применяться при температурах до 250°C в контакте с нержавеющей сталью, хромированными конструкционными сталями и титановыми сплавами, а также с алюминиевыми сплавами с анодно-окисными и лакокрасочными покрытиями. По результатам проведенных испытаний Ф4РМ20 был рекомендован к применению в качестве деталей уплотнительного и антифрикционного назначения в авиационной промышленности.

Была также проведена серия стендовых испытаний на промышленных предприятиях с целью выявления возможности применения модифицированного ПТФЭ в качестве шайб рабочих колес погружного электроцентробежного насоса, применяющегося для добычи нефти. Испытания на стойкость материала к абразивному изнашиванию проводили на установке, имитирующей работу осевой опоры ступени насоса. Средний размер частиц абразивного материала (литол + 5 мас. % кварцевого песка) составлял около 15 мкм. Испытания шайб, изготовленных из Ф4РМ20, текстолита и карбонита, в условиях абразивного изнашивания показали, что скорость его изнашивания на порядок ниже, чем текстолита и в пять раз меньше, чем карбонита.

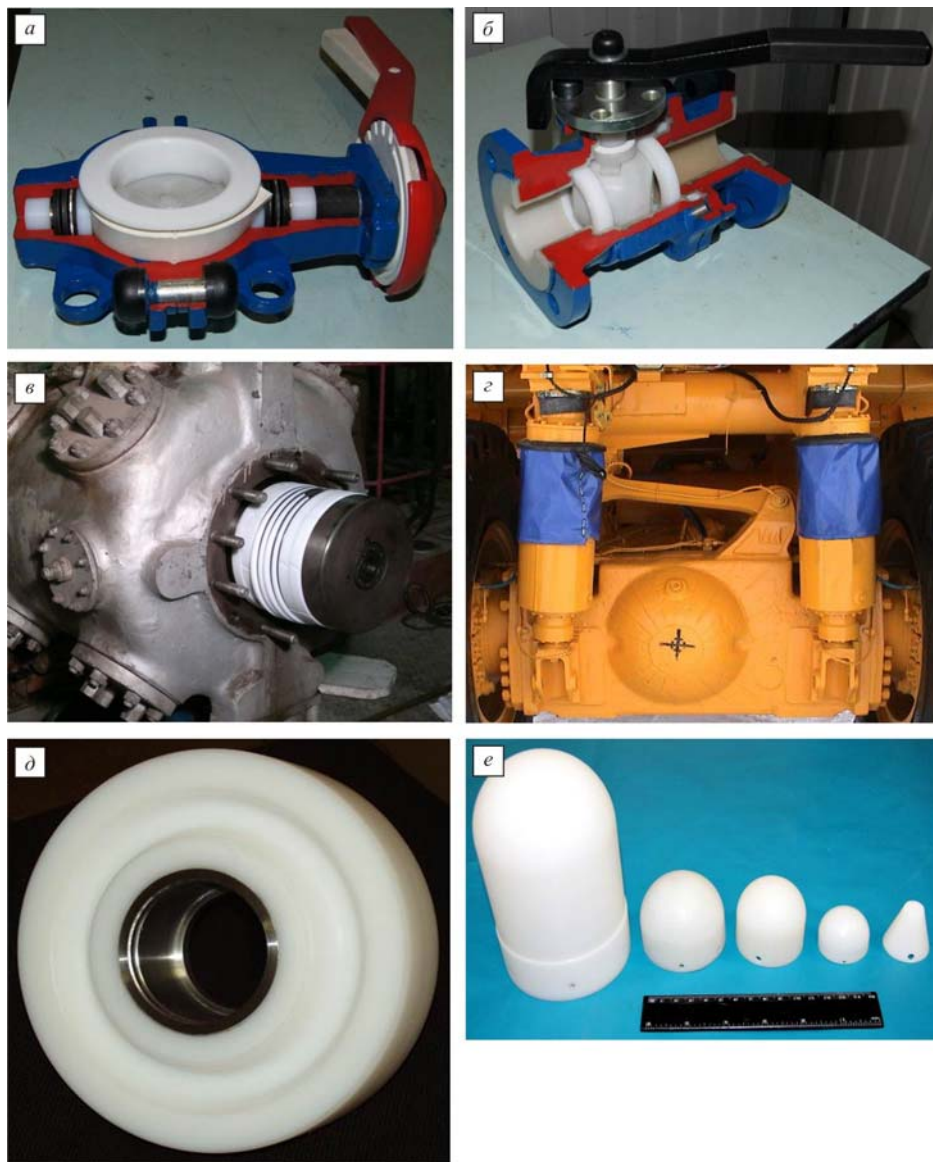


Рис. 6. Примеры серийно выпускаемых изделий, в составе которых использован радиационно-модифицированный ПТФЭ:

а – затвор дисковый химический ЗПХ50/16.8210ВО, б – кран шаровый химический КШХ50/16.8210ВО, в – поршень компрессора 6ВМ16-140/200М1 с уплотнительными и опорными кольцами из Ф-4РМ20, г – гидроцилиндры подвески самосвалов БЕЛАЗ, д – опорное колесо скольжения для эскалаторов, е – радиопрозрачные антенные укрытия для летательных аппаратов

Были проведены также испытания материала Ф4РМ20 в качестве шевронного уплотнения по штоку дозирующих насосов, задействованных в технологическом процессе по добыче нефти, газа ДС-2 марки N-C-312. В ходе испытаний уплотнения из Ф4РМ20 отработали без изменения технических характеристик более 270 сут. При этом протечки по штоку были минимальны, а механический износ штока отсутствовал. Для сравнения: шевронные уплотнения из композиционного материала марки Ф4К20 обеспечивают эксплуатацию без замены лишь до 120 сут, после чего целостность уплотнения нарушается, а механическое воздействие на шток возрастает.

Комплексные испытания материала Ф4РМ20 в качестве щелевого уплотнения в насосах, работающих с агрессивными средами, подтвердили стойкость материала к основным химическим средам, в которых эксплуатируются изделия (серная, соляная, азотная, плавиковая кислоты, щелочь NaOH). Климатические испытания проводили с целью выявления деформаций деталей из Ф4РМ, имеющих преднатяг при их установке в металлические детали конструкции. Материал выдержал испытания в условиях пониженных (-40°C) и повышенных (100°C) температур, т. е. после возвращения к нормальной температуре восстанавливал прежнюю геометрию (работал в диапазоне упругих деформаций). По результатам стендовых испытаний был налажен серийный выпуск задвижек, шаровых кранов и насосов для химической промышленности (рис. 6, а, б).

Проведены испытания материала Ф4РМ20 в качестве уплотнительных колец шаровых кранов КШП 050.080.002. Краны после сборки прошли испытания на прочность, на плотность, на залипание. Было проведено 15000 циклов открываний – закрываний, что в 3 раза больше предусмотренного регламентом. После разборки кранов внешним осмотром выявлено, что уплотнение на пробке имеет незначительный износ, не влияющий на работоспособность шарового крана. По результатам испытаний сделано заключение, что применение уплотнений из Ф4РМ20 увеличивает ресурс шаровых кранов не менее чем в 5 раз.

Радиационно-модифицированный ПТФЭ марки Ф4РМ20 был применен также в качестве сальниковых уплотнений штока, поршневых и опорных колец шестиступенчатого компрессора 6ВМ16-140/200М1 (рис. 6, в). Существенно увеличен межремонтный период и надежность работы компрессора по сравнению с ранее использовавшимися композитами на основе ПТФЭ.

Стендовые испытания показали, что радиационные модификации ПТФЭ при работе в составе гидроцилиндров подвески самосвалов БЕЛАЗ значительно превосходят существующие на сегодняшний день мировые аналоги, включая широко известные материалы на основе полиацетала, сложных полиэфиров (различные марки Хайтрел), СВМПЭ и др. По результатам испытаний выпущена партия из 5 карьерных самосвалов грузоподъемностью 130 т, в конструкции подвески которых в качестве поршневых и штоковых уплотнений используется Ф4РМ5. В настоящее время пробег самосвалов из опытной партии составил 200 тыс. км без замены уплотнений, тогда как типичный пробег самосвалов до замены уплотнений штока составлял 40–60 тыс. км. С 2011 г. Ф4РМ5 применяется в конструкции подвески серийно (рис. 6, г).

По результатам испытания модифицированного ПТФЭ в качестве сальниковых уплотнений клапанов С21152-010 сделано заключение, что применение Ф4РМ20 для сальникового уплотнения из колец специальной конфигурации при усилии затяжки 2,8–3,2 кгс·м обеспечивает гарантированное уплотнение как при рабочих параметрах, так и в переходном режиме охлаждения (от 200 до 60°C при давлении 200 кгс/см^2), а также при дальнейшем охлаждении до нормальной температуры.

Применение Ф4РМ20 в качестве маслосъемного сальникового уплотнения оппозитных компрессоров ГМ 10-8/2-61 С позволило снизить протечки масла через сальник в 6–10 раз.

Благодаря повышенной радиационной стойкости Ф4РМ20 применен в ряде космических проектов («Электро», «Фобос-Грунт», «Спектр-УФ», «Фрегат», МЦА) в качестве деталей электротехнического, антифрикционного и уплотнительного назначения.

На основе Ф4РМ20 разработан радиопрозрачный элемент антенных укрытий для летательных аппаратов (рис. 6, е). Проведенные испытания на динамическое воздействие твердых частиц показали, что эрозионная устойчивость обтекателя из Ф4РМ20 выше, чем обтекателя из поликарбоната (скорость потери массы уменьшается в 9 раз). При этом значительно улучшаются радиотехнические характеристики. Обтекатели из новых материалов применяются с 2010 г. при изготовлении антенных блоков изделий Л-150 различных модификаций, поставляемых для самолетов Су и МиГ.

Общее число предприятий, выпускающих различные изделия с использованием радиационно-модифицированного ПТФЭ, в настоящее время превысило 50.

ВЫВОДЫ

1. Коэффициент трения радиационно-модифицированного ПТФЭ заметно ниже, чем у исходного полимера, он увеличивается с повышением скорости скольжения в трибопаре и снижается с увеличением контактного давления. Время выхода на установившееся значение по сравнению с исходным ПТФЭ увеличивается приблизительно в 2 раза.

2. Интенсивность изнашивания ПТФЭ, модифицированного дозами более 200 кГр, снижается более чем на 4 порядка величины (до 10^{-8} мм³/Н м) и становится меньше соответствующих значений для многих антифрикционных композитов (до 10^{-7} мм³/Н м).

3. Радиационная модификация приводит к изменению механизма изнашивания ПТФЭ. Наблюдается переход от деламинационного (пластинчатого) разрушения поверхности трения исходного ПТФЭ к фибриллярному разрушению.

4. Опыт применения новых материалов в трибосопряжениях с металлами показал значительное повышение рабочего ресурса соответствующих узлов.

Авторы выражают глубокую признательность за участие в проведении испытаний и обсуждение результатов В. М. Цвелеву и С. В. Алексееву (ФГУП «НПО им. С. А. Лавочкина», Москва), Э. Я. Бейдеру и Ю. В. Сытому (ФГУП «ВИАМ», Москва), В. В. Загорскому (ОАО «Белаз», г. Жодино Минской обл.), Л. Н. Ивановой (ОАО «ЦКБА», Омск), М. Ю. Ковалеву (ЗАО «Гидрогаз», Воронеж), Ю. М. Кузнецову (ООО «Газпромдобыча Оренбург»), О. П. Коцееву (ЗАО «Новомет-Пермь»), А. В. Попову (ОАО «ВКЗ», Волгоград), Е. М. Коновой, А. В. Петровской (ФГУП «НИФХИ им. Л. Я. Карпова», Москва).

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 гг.» (государственный контракт от 06.08.2009 г. № 02.523.12.3024) и Федеральной целевой программы «Научные и научно-

ЛИТЕРАТУРА

1. Истомин Н. П., Семенов А. П. Антифрикционные свойства композиционных материалов на основе фторполимеров. – М.: Наука, 1984. – 147 с.
2. Burris D. L., Zhao S., Duncan R. e. a. A route to wear resistant PTFE via trace loadings of functionalized nanofillers // *Wear*. – 2009. – V. 267. – P. 653–660.
3. Создание макромоодифицированных фторопластом углепластиков для подшипников скольжения рабочих колес поворотно-лопастных турбин / Е. В. Бахарева, А. В. Анисимов, А. С. Савелов и др. // *Вопросы материаловедения*. – 2009. – № 1(59). – С. 17–25.
4. Burroughs B. R., Blanchet T. A. Factors affecting the wear of irradiated UHMWPE // *Tribol. Trans.* – 2001. – V. 44, N 2. – P. 215–223.
5. Истомин Н. П., Семенов А. П., Клейменов Н. А. Трение и изнашивание фторопласта-4, подвергнутого воздействию проникающего излучения Со60 // *Докл. АН СССР*. – 1979. – Т. 244. – № 2 – С. 245–247.
6. Briscoe B. J., Ni Z. The friction and wear of γ -irradiated polytetrafluoroethylene // *Wear*. – 1984. – V. 100. – P. 221–292.
7. Menzel B., Blanchet T. A. Enhanced wear resistance of gamma-irradiated PTFE and FEP polymers and the effect of post-irradiation environmental handling // *Wear*. – 2005. – V. 258. – P. 935–941.
8. Fayolle B., Audouin L., Verdu J. Radiation induced embrittlement of PTFE // *Polymer*. – 2003. – V. 44. – P. 2773–2780.
9. Sun J., Zhang Y., Zhong X. Radiation crosslinking of polytetrafluoroethylene // *Polymer*. – 1994. – V. 35, N 13 – P. 2881–2883.
10. Modification of polytetrafluoroethylene by radiation – 1. Improvement in high temperature properties and radiation stability / J. Sun, Y. Zhang, X. Zhong, X. Zhu // *Radiat. Phys. Chem.* – 1994. – V. 44, N 6. – P. 655–659.
11. Radiation induced crosslinking of polytetrafluoroethylene / A. Oshima, T. Tabata, H. Kudoh, T. Seguchi // *Radiat. Phys. Chem.* – 1995. – V. 45. – N 2. – P. 269–273.
12. Хатилов С. А., Артамонов Н. А. Создание нового антифрикционного и уплотнительного материала на основе радиационно-модифицированного политетрафторэтилена // *Рос. хим. журн. (Журн. Рос. хим. об-ва им. Д. И. Менделеева)*. – 2008. – Т. 52, № 3. – С. 89–97.
13. Хатилов С. А., Конова Е. М., Артамонов Н. А. Радиационно-модифицированный политетрафторэтилен: структура и свойства // *Рос. хим. журн. (Журн. Рос. хим. об-ва им. Д. И. Менделеева)*. – 2008. – Т. 52, N 5. – С. 64–72.
14. Петровская А. В., Хатилов С. А. Трибологические свойства наномодифицированных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена // *Материаловедение*. – 2011. – N 4. – С. 49–52.
15. Патент № 82589 РФ. 2009 / Хатилов С. А., Селиверстов Д. И., Сичкар В. П.
16. Effect of PTFE irradiation above the melting point on it's porosity / S. A. Khatipov, S. P. Kabanov, E. M. Konova e. a. // *Radiat. Phys. Chem.* – 2012. – V. 81. – P. 273–277.
17. Pooley C., Tabor D. Friction and Molecular Structure – Behavior of Some Thermoplastics // *Proc. R. Soc. (London) A*. – 1972. – V. 329, N 1578. – P. 251–274.
18. Tanaka K., Uchiyama Y., Toyooka S. Mechanism of wear of Polytetrafluoroethylene // *Wear*. – 1973. – V. 23, N 2. – P. 153–172.
19. On PTFE transfer and thermoactivation mechanism of wear / V. A. Smurugov, A. I. Senatrev, V. G. Savkin e. a. // *Wear*. – 1992. – V. 158, N 1–2. – P. 61–69.
20. McLaren K. G., Tabor, D. Friction of polymers: Influence of speed and temperature // *Nature*. – 1963. – V. 197, N 487. – P. 856–857.
21. Blanchet T., Kennedy F. Sliding wear mechanism of Polytetrafluoroethylene (PTFE) and PTFE composites // *Wear*. – 1992. – V. 153, N 1. – P. 229–243.
22. Burris D. L., Perry S. S., Sawyer W. G., Macroscopic Evidence of Thermally Activated Friction with Polytetrafluoroethylene // *Tribol. Lett.* – 2007. – V. 27. – P. 323–328.
23. Bahadur S., Tabor D. The wear of filled Polytetrafluoroethylene // *Wear*. – 1984. – V. 98, N 1–3. – P. 1–13.

24. Blanchet T., Kennedy F., Jayne D. XPS analysis of the effect of fillers on PTFE transfer film development in sliding contacts // Tribol. Trans. – 1993. – V. 36, N 4. – P. 535–544.
25. Makinson K., Tabor D. Friction + transfer of Polytetrafluoroethylene // Nature. – 1964. – V. 201, N 491. – P. 464–466.
26. Characterization of PTFE on silicon wafer tribological transfer films by XPS, imaging XPS and AFM / G. Beamson, D. Clark, D. E. Deegan e. a. // Surf. Interface Anal. – 1996. – V. 24, N 3. – P. 204.
27. Structural surprises in friction-deposited films of poly(tetrafluoroethylene) / D. Breiby, T. Soling, O. Bunk e. a. // Macromolecules. – 2005. – V. 38, N 6. – P. 2383–2390.
28. Wheeler D. The transfer of Polytetrafluoroethylene studied by X-ray photoelectron spectroscopy // Wear. – 1981. – V. 66, N 3. – P. 355–365.
29. Suh N. Delamination theory of wear // Wear. – 1973. – V. 25, N 1. – P. 111–124.
30. Morphology of polytetrafluoroethylene before and after irradiation / S. A. Khatipov, S. A. Se-rov, N. V. Sadovskaya, E. M. Konova // Radiat. Phys. Chem. – 2012. – V. 81. – P. 256–263.