

СВОЙСТВА ПЛЕНОК ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ТИТАН- И ФОСФОРОКСИДНЫМИ СТРУКТУРАМИ

© Е. А. Радюк¹, Е. А. Соснов¹, А. А. Малыгин¹, А. А. Рычков², А. Е. Кузнецов²

¹ Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), 190013, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 26

² Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, 190086, г. Санкт-Петербург, Вознесенский пр., д. 39
E-mail: puhmicronecrokilldozer@gmail.com

Поступила в Редакцию 11 марта 2019 г.

После доработки 9 апреля 2019 г.

Принята к публикации 25 мая 2019 г.

Исследованы свойства пленок политетрафторэтилена, модифицированных моно- и двухкомпонентными титан-фосфороксидными системами путем попеременной обработки полимерной подложки в заданной последовательности парами реагентов из ряда $TiCl_4$, PCl_3 и H_2O . Установлено изменение энергетических характеристик поверхности образцов с двухкомпонентными оксидными системами P–Ti и Ti–P по сравнению с политетрафторэтиленом, модифицированным только фосфор- или титан-оксидными функциональными группами, за счет возрастания полярной компоненты поверхностной энергии. Выявлены особенности эффекта стабилизации электростатического заряда в модифицированных пленках политетрафторэтилена. Показано, что наилучшими электростатическими свойствами обладают титансодержащие пленки политетрафторэтилена, в том числе и с двухкомпонентными титан-фосфороксидными добавками. Согласно данным дифференциально-термического анализа модифицированные образцы имеют повышенную термоокислительную стойкость, проявляющуюся в увеличении на 40–50° температуры начала разложения полимера и снижении потери массы по сравнению с немодифицированным образцом при 650°С на 17–23%.

Ключевые слова: политетрафторэтилен; поверхность; химическое модифицирование; титан- и фосфорсодержащие структуры; термоокислительная стойкость; энергетические характеристики поверхности; электростатические свойства

DOI: 10.1134/S0044461819080115

Химический состав и структура поверхности полимерных материалов оказывают существенное влияние на их свойства — термоокислительные, адгезионные, электрофизические, прочностные и др. [1–5]. Важным направлением регулирования и улучшения функциональных характеристик таких материалов является формирование на поверхности полимерных матриц структур необходимого химического состава и строения. Перспективным методом модифицирования поверхности твердофазных материалов (к кото-

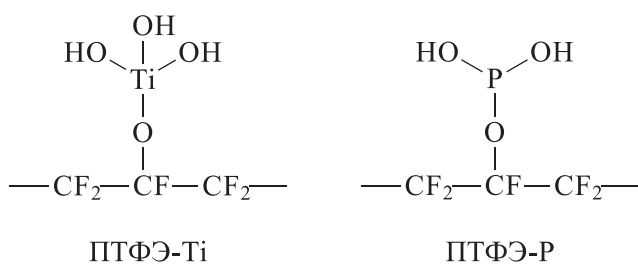
рым принадлежат и различные виды полиолефинов и других продуктов полимеризации органических соединений) является метод молекулярного наслаивания (МН) [6]. Процесс МН позволяет синтезировать химически связанные с поверхностью твердых тел наноструктуры строго заданного химического состава и строения. При этом свойства полученных продуктов определяются как химической природой и концентрацией вводимых добавок, так и строением формируемых на поверхности композиций [7]. В ря-

де случаев установлена возможность существенного повышения эффективности воздействия на свойства модифицированных полимеров при химической сборке методом МН многокомпонентных структур на их поверхности, что обусловлено синергическим эффектом при сочетании добавок [7]. Ранее было показано, что химическое модифицирование поверхности полимерных пленок политетрафторэтилена (ПТФЭ), полиэтилена высокого давления (ПЭВД), поливинилхлорида (ПВХ) оксидными структурами фосфора, кремния, титана методом МН позволяет регулировать их термоокислительные, электретные, гидрофобные и гидрофильные свойства [7–9]. Модифицирование пленок ПЭВД двухкомпонентными фосфор-титан-оксидными системами приводит к существенной стабилизации его электретных свойств по сравнению с исходным материалом и образцами с однокомпонентными добавками [10].

Целью настоящей работы было исследование взаимного влияния фосфор- и титаноксидных структур в составе двухкомпонентных систем, синтезированных на поверхности пленки ПТФЭ, на энергетические характеристики поверхности, термоокислительные и электретные свойства полимера.

Экспериментальная часть

В качестве объектов исследования использовали пленки ПТФЭ марки Ф-4 КО номинальной толщиной 13 мкм. На поверхности пленок методом МН были синтезированы двухкомпонентные системы, различающиеся последовательностью обработки подложки парами $TiCl_4$ (PCl_3) и H_2O , а затем парами PCl_3 ($TiCl_4$) и H_2O (образцы ПТФЭ-Ti-P и ПТФЭ-P-Ti соответственно). В качестве образцов сравнения применяли ПТФЭ с однокомпонентными титан- и фосфорсодержащими структурами на поверхности (образцы ПТФЭ-Ti и ПТФЭ-P соответственно). Синтез осуществляли в реакторе проточного типа на установке, схема которой представлена в работе [11]. Согласно ранее проведенным исследованиям [11], после обработки парами соответствующего хлорида и воды формирующиеся на поверхности центры можно представить следующими схемами:



В дальнейшем при синтезе двухкомпонентных поверхностных центров взаимодействие паров трихлорида фосфора или тетрахлорида титана протекает, по-видимому, с гидроксильными группами титан- или фосфорсодержащих функциональных группировок соответственно.

Энергетические характеристики поверхности исходной и модифицированных пленок оценивали по изменению краевых углов смачивания водой и глицерином на приборе DSA14. Расчет полной свободной энергии поверхности, а также ее полярной и дисперсионной составляющих осуществляли методом Фоукса [12]. Для оценки влияния влагосодержания окружающей среды на энергетические характеристики поверхности пленок образцы после синтеза выдерживали при температуре 25°C в замкнутом объеме до постоянной массы над P_2O_5 (осушенные образцы) или при относительной влажности 75%.

Термоокислительную устойчивость образцов определяли на дериватографе Q-1500D (МОМ, Венгрия) в интервале температур 25–650°C при скорости нагрева 10 град·мин⁻¹.

Электретные свойства материалов исследовали методом термостимулированной релаксации поверхностного потенциала (ТСРПП), изложенным в работах [8, 9]. Предварительное электретирование (формирование заряда на поверхности) ПТФЭ производили с использованием установки с тремя электродами: катодом, анодом и управляющим сетчатым электродом между ними. Образцы ПТФЭ, металлизированные с одной стороны, помещали между катодом и сеткой в область коронирования на 30 с. Под действием высокого напряжения (10–12 кВ), подаваемого на анод, положительные ионы двигались к сетчатому электроду, который позволял регулировать распределение потока ионов по поверхности заряжаемого полимера. Образцы заряжались до заданного потенциала $V_0 = +215$ В, что соответствует поверхностной плотности накопленного заряда 293 мкКл·м⁻². Затем изготовленные таким способом электреты располагались на металлическом предметном столике, где нагревались с постоянной скоростью 8.15 град·мин⁻¹. Над исследуемым образцом располагался измерительный электрод, регистрирующий изменение поверхностного потенциала в зависимости от температуры.

Из экспериментальных зависимостей поверхностного потенциала от температуры были восстановлены энергетические спектры ловушек на поверхности исходного и модифицированных образцов. Для этого использовалась программа «Виртуальный эксперимент 2.5» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016612794 от 10.03.2016),

в основе которой лежит модель релаксации поверхностного заряда в электретах, разработанная в рамках теории Симмонса [13]. В общем случае для проведения соответствующих расчетов необходимы данные ТСРПП, полученные по крайней мере при двух различных скоростях нагрева образцов. Это позволяет экспериментально определить частотный фактор ловушек. В данной работе при расчете энергетического спектра ловушек использовали значения частотных факторов, найденные ранее [9]: для исходных образцов $7 \cdot 10^{13}$ Гц, для модифицированных $5 \cdot 10^{12}$ Гц.

Обсуждение результатов

Модифицирование поверхности пленки ПТФЭ Р- и Тi-содержащими структурами приводит к некоторому повышению гидрофильности поверхности полимера по сравнению с немодифицированной пленкой (табл. 1). Однако сильного влияния относительной влажности среды на смачиваемость поверхности образцов не наблюдается. Можно отметить, что все фосфорсодержащие образцы более гидрофильны. А среди них следует выделить двухкомпонентную композицию ПТФЭ-Тi-Р после выдержки при относительной влажности 75%.

Более заметные различия, согласующиеся с приведенными в табл. 1 данными о влиянии влажности, состава и строения модифицирующих добавок, отмечены при расчете полной свободной энергии поверхности, а также ее полярной и дисперсионной

составляющих (рис. 1). В ряду ПТФЭ → ПТФЭ-Тi → ПТФЭ-Р → ПТФЭ-Тi-Р → ПТФЭ-Р-Тi для высушенных образцов (рис. 1, а) наблюдается снижение общей поверхностной энергии. При этом закономерно возрастает отношение значений полярной составляющей к дисперсионной в рассматриваемой серии продуктов. При сравнении двухкомпонентных образцов полярная составляющая полной свободной энергии незначительно выше у ПТФЭ-Тi-Р, чем у ПТФЭ-Р-Тi. Можно полагать, что на поверхности более полярных титан- и фосфорсодержащих структур происходит смещение электронной плотности к Тi и Р, приводящее к снижению дисперсионной составляющей поверхностной энергии.

При выдержке композиций в атмосфере с относительной влажностью 75% (рис. 1, б) полная свободная энергия поверхности, кроме образца ПТФЭ-Тi-Р, практически не изменилась по сравнению с исходным продуктом. Для ПТФЭ-Р наблюдается возрастание полярной составляющей поверхностной энергии, что обусловлено хорошо известной высокой гидролитической активностью оксидных соединений фосфора, т. е. происходит образование гидратной оболочки вокруг фосфорсодержащих группировок. В рассматриваемом после выдержки в атмосфере с относительной влажностью 75% ряду ПТФЭ → ПТФЭ-Тi → ПТФЭ-Р → ПТФЭ-Р-Тi → ПТФЭ-Тi-Р происходит закономерное увеличение полярной составляющей свободной энергии. Однако наиболее сильные изменения наблюдаются для двухкомпонентной компози-

Таблица 1

Влияние влажности на краевые углы смачивания поверхности образцов политетрафторэтилена

Образец	Среда	Краевой угол смачивания θ , град	
		вода	глицерин
ПТФЭ	Осушенный образец	97.7 ± 1.8	82.8 ± 1.4
	Относительная влажность 75%	91.3 ± 2.0	81.1 ± 0.8
ПТФЭ-Тi	Осушенный образец	94.6 ± 0.9	82.4 ± 1.3
	Относительная влажность 75%	92.4 ± 0.8	83.3 ± 0.8
ПТФЭ-Р	Осушенный образец	87.3 ± 2.0	78.8 ± 1.2
	Относительная влажность 75%	87.5 ± 1.1	80.1 ± 0.4
ПТФЭ-Тi-Р	Осушенный образец	87.0 ± 1.3	82.8 ± 1.4
	Относительная влажность 75%	80.5 ± 1.6	83.9 ± 1.1
ПТФЭ-Р-Тi	Осушенный образец	88.7 ± 1.4	83.6 ± 1.4
	Относительная влажность 75%	88.2 ± 1.4	81.9 ± 0.7

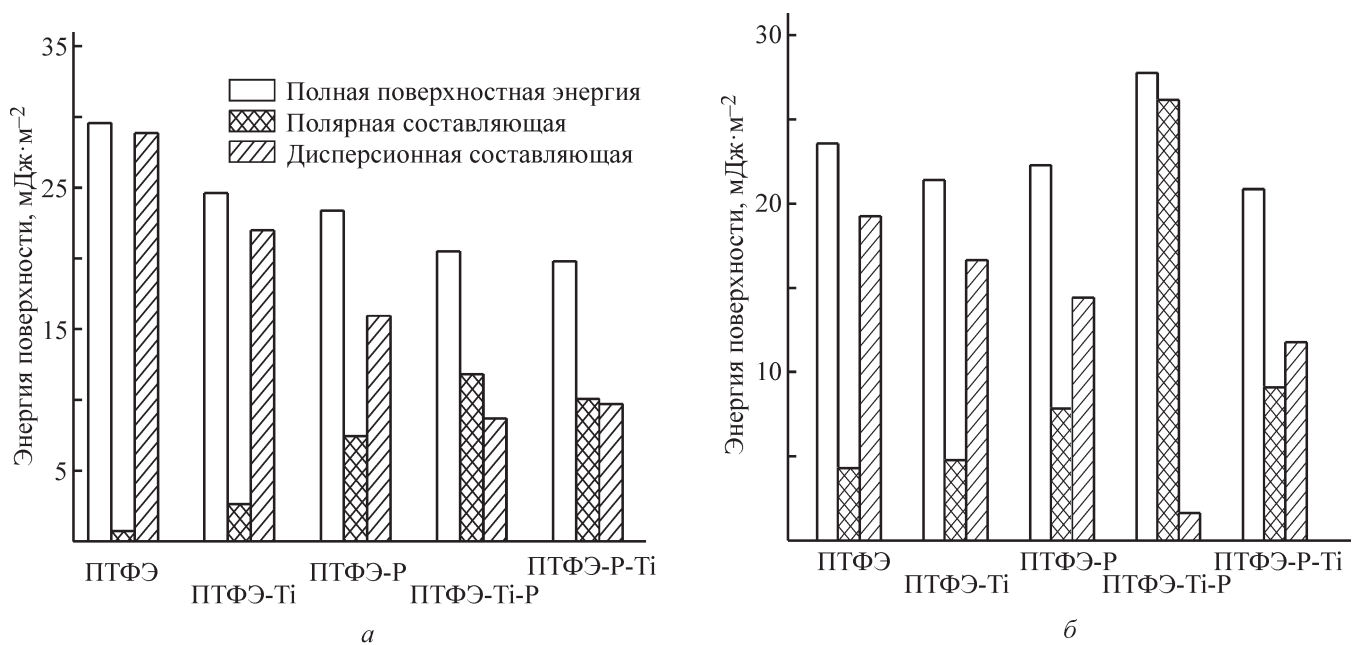


Рис. 1. Поверхностная энергия исходного и модифицированных образцов политетрафторэтилена. *а* — после высушивания, *б* — после выдержки при относительной влажности 75%.

ции ПТФЭ-Ti-R — резко возрастает полярная составляющая полной поверхностной энергии, превышая почти в 3 раза аналогичное значение для образца ПТФЭ-R-Ti и более чем в 3 раза — системы ПТФЭ-R. Таким образом, можно полагать, что титаноксидная добавка играет роль синергиста. Причем ее влияние проявляется при определенном строении поверхностной структуры — титансодержащая группировка находится между исходной поверхностью полимерной пленки и фосфорсодержащей группой.

По-видимому, в системе Ti-R наблюдается усиление гидрофильности поверхности за счет присутствия атома титана в цепочке связей вида $\text{C}-\text{O}-\text{Ti}-\text{O}-\text{P}$. Происходит смещение заряда и локализация электронной плотности на конце цепочки. Система R-Ti на поверхности ПТФЭ также способствует ее гидрофиллизации, но не дает такого существенного эффекта. Очевидно, титансодержащие структуры затрудняют доступ молекул H_2O к нижерасположенным фосфороксидным группам. Полученные данные позволяют сделать вывод, который согласуется с ранее полученными на других системах результатами, что проявление эффекта синергизма в многокомпонентной системе определяется не только ее составом, но также в значительной степени зависит от взаимного расположения вводимых на поверхность добавок.

Результаты сравнительных исследований электретных свойств синтезированных образцов представлены на рис. 2. Как следует из зависимостей ТСРПП,

для всех модифицированных образцов наблюдается повышение стабильности электретного заряда. При этом для титансодержащих продуктов независимо от их состава полученные данные близки, а температура, при которой $V/V_0 \approx 0.5$, в ряду ПТФЭ \rightarrow ПТФЭ-Ti \rightarrow ПТФЭ-R \rightarrow ПТФЭ-Ti-R \rightarrow ПТФЭ-R-Ti составляет около 99, 237, 154, 219 и 225°C соответственно. Полученные зависимости свидетельствуют о том,

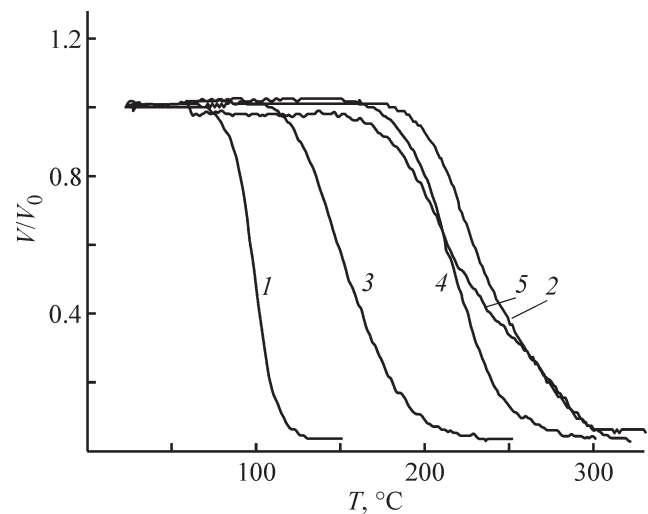


Рис. 2. Термостимулированная релаксация поверхностного потенциала образцов политетрафторэтилена. 1 — ПТФЭ, 2 — ПТФЭ-Ti, 3 — ПТФЭ-R, 4 — ПТФЭ-Ti-R, 5 — ПТФЭ-R-Ti.

что в релаксации электретоного состояния в модифицированных образцах наиболее существенную роль играют ловушки, связанные с титансодержащими структурами на поверхности. Повышение стабильности заряда в образцах, содержащих на поверхности титан- и фосфорсодержащие структуры, происходит, по всей видимости, за счет образования энергетически более глубоких центров захвата заряда, связанных с такими структурами. Представленные на рис. 3 энергетические спектры центров захвата заряда на исходном и модифицированных образцах полимерной пленки позволяют оценить вклад соответствующих группировок в стабилизацию электретоного заряда. Анализ приведенных на рис. 3 зависимостей свидетельствует о том, что ловушки, формирующиеся при модифицировании полимерной пленки, имеют более высокие значения энергии активации в максимуме распределения E_a (рис. 3, кривые 2–5). На всех кривых, за исключением кривой 4, характеризующей структуры ПТФЭ-Ti-P, можно выделить по два пика. Немодифицированная пленка ПТФЭ характеризуется наличием на ее поверхности центров захвата с $E_a = 1.16$ эВ и $E_a = 1.26$ эВ, относящихся, вероятнее всего, к окисным дефектам поверхности полимерной матрицы и являющихся, по-видимому, центрами хемосорбции хлоридов титана и фосфора. Наиболее высокие энергии активации ловушек наблюдаются в образцах с титансодержащими группами, в том числе в сочетании с фосфороксидными центрами (рис. 3, кривые 2, 4, 5). Модифицирование ПТФЭ парами трихлорида фосфора и воды приводит к образованию ловушек, имеющих широкое распределение с основным максимумом $E_a = 1.21$ эВ, и ловушек, распределенных в окрестности с $E_a = 1.43$ эВ.

При обработке исходной пленки парами тетрахлорида титана и воды появляются две группы ловушек с энергиями активации в максимумах распределения $E_a = 1.44$ эВ и $E_a = 1.58$ эВ. Существенно изменяется форма энергетического спектра при синтезе двухкомпонентных систем (рис. 3, кривые 4, 5). В образце ПТФЭ-Ti-P следует обратить внимание на центры захвата с $E_a = 1.41$ эВ, характерные для продуктов ПТФЭ-Ti и ПТФЭ-P (1.44 и 1.43 эВ соответственно). Но при этом практически перестают проявляться ловушки с $E_a = 1.58$ эВ (рис. 3, кривая 4). Наиболее высокоэнергетические ловушки, связанные с двухкомпонентными структурами, формируются в результате обработки фосфорсодержащего образца парами тетрахлорида титана и воды. В энергетическом спектре синтезированного образца ПТФЭ-P-Ti наблюдаются два четко выраженных максимума, соответствующие значениям $E_a = 1.40$ эВ и $E_a = 1.60$ эВ

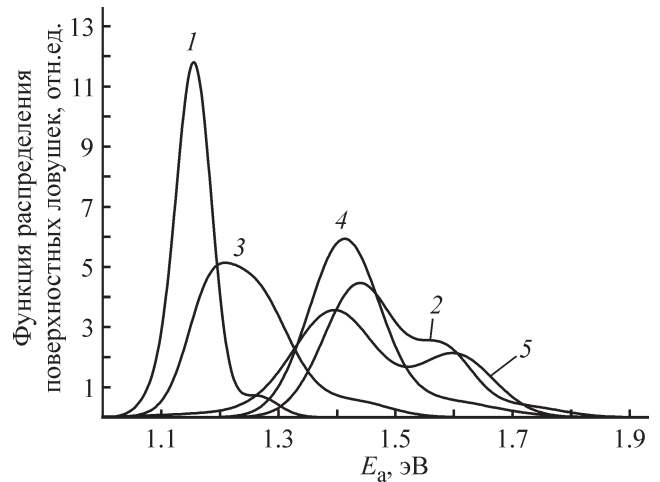


Рис. 3. Энергетические спектры центров захвата заряда в образцах политетрафторэтилена.

1 — ПТФЭ, 2 — ПТФЭ-Ti, 3 — ПТФЭ-P, 4 — ПТФЭ-Ti-P, 5 — ПТФЭ-P-Ti.

(рис. 3, кривая 5). Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод о синергических свойствах титана по отношению к фосфору. При этом наиболее существенное влияние титана в двухкомпонентных системах проявляется при последовательной обработке исходной пленки ПТФЭ сначала парами трихлорида фосфора и воды, а затем парами тетрахлорида титана и воды. Анализ полученных изменений энергетических характеристик поверхности в модифицированных образцах позволяет сделать вывод о существенном перераспределении электронной плотности в поверхностных центрах с появлением более электроотрицательных элементов в составе полярных групп со связями вида C-O-P, C-O-Ti, C-O-P-O-Ti и C-O-Ti-O-P.

Менее заметное влияние оказывает химическая природа и состав поверхностных добавок на термоокислительные характеристики модифицированных пленок ПТФЭ. Проведенные термогравиметрические исследования показали, что на кривых ДТА исходного продукта при температуре $\sim 320^\circ\text{C}$ наблюдается эндотермический пик (рис. 4, кривая 1), обычно связываемый с плавлением кристаллического ПТФЭ [14]. Процесс разложения полимера характеризуется сложным экзотермическим эффектом и проходит в три этапа — первый экзотермический пик при температуре $\sim 510^\circ\text{C}$, согласно литературным данным, соответствует частичному окислению образующихся продуктов, два других экзотермических эффекта свидетельствуют об окислении кислородом воздуха различных продуктов термической деструкции полимера [15]. Существенно изменяется вид кривой

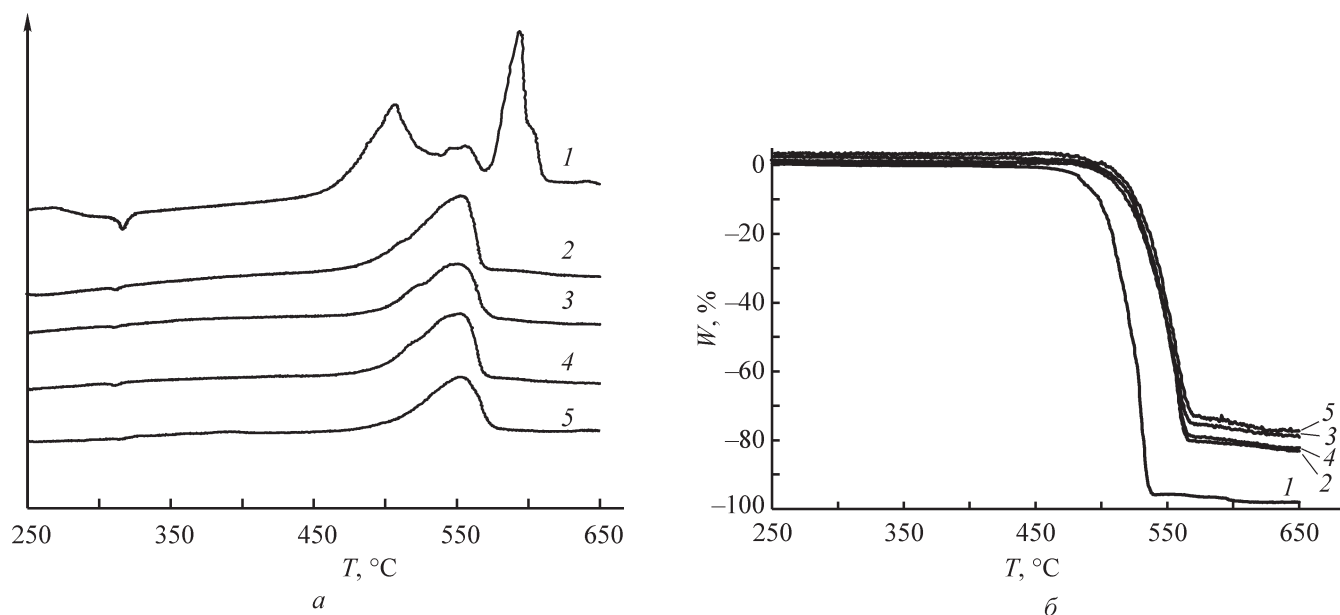


Рис. 4. Кривые дифференциально-термического анализа (а) и термогравиметрические кривые (б) для образцов ПТФЭ (1), ПТФЭ-Тi (2), ПТФЭ-Р (3), ПТФЭ-Тi-Р (4), ПТФЭ-Р-Тi (5).

Таблица 2

Характеристики термоокислительной стойкости исходного и модифицированных образцов пленок политетрафторэтилена

Образец	Температура начала разложения, °С	Температура 50%-ной потери массы, °С	Потеря массы при $T = 650^{\circ}\text{C}$, %
ПТФЭ _{исх}	450	525	97
ПТФЭ-Тi	490	550	80
ПТФЭ-Р	500	550	76
ПТФЭ-Тi-Р	490	550	80
ПТФЭ-Р-Тi	500	555	74

ДТА у модифицированных образцов (рис. 4, кривые 2–5): практически исчезает эндотермический пик плавления, что может свидетельствовать о частичной аморфизации поверхности ПТФЭ в процессе синтеза титан- и фосфорсодержащих структур. Вместо трех экзотермических пиков в области $500\text{--}600^{\circ}\text{C}$ остается один с максимумом при температуре $\sim 550^{\circ}\text{C}$. Исчезновение двух экзотермических пиков окисления продуктов деструкции ПТФЭ свидетельствует об активном влиянии титан- и фосфорсодержащих групп на деструкционные процессы. Кривые потери массы образцов (рис. 4) и данные табл. 2 показывают, что для всех модифицированных продуктов повышаются температуры начала разложения и 50%-ной потери массы. При завершении термоокислительного

процесса остаток у модифицированных продуктов составляет 20–26 мас%, а у исходной пленки ПТФЭ — около 3 мас%.

Как известно, соединения фосфора как антипирены катализируют процессы коксообразования в полимерных композициях, а в присутствии элементов-синергистов, к которым относится и титан, эффективность действия основной огнегасящей добавки повышается [1, 7, 16]. Несмотря на незначительные численные различия в потерях массы, представленные в табл. 2 данные согласуются с вышеизложенным. Таким образом, введение модифицирующих добавок фосфора и титана в поверхностный слой ПТФЭ повышает его термоокислительную стойкость.

Выводы

Модифицирование пленок политетрафторэтилена приводит к изменению энергетических характеристик поверхности, проявляющемуся в уменьшении краевого угла смачивания поверхности водой и изменении соотношения полярной и дисперсионной составляющих полной энергии. После выдержки в атмосфере с относительной влажностью 75% в ряду ПТФЭ → ПТФЭ-Тi → ПТФЭ-Р → ПТФЭ-Р-Тi → ПТФЭ-Тi-Р происходит закономерное увеличение полярной составляющей свободной энергии, наиболее сильно проявляющееся в образце ПТФЭ-Тi-Р.

Политетрафторэтилен с титаноксидными добавками, в том числе с двойными Тi-Р и Р-Тi системами, обладает более высокой стабильностью электростатического заряда, способствуя образованию новых ловушек, отличающихся более высокой энергией активации. Модифицирование политетрафторэтилена моно- и двухкомпонентными титан-фосфорсодержащими системами приводит к улучшению его термоокислительных свойств — температура начала разложения модифицированной пленки возрастает на 40°, потеря массы уменьшается на 17–23%.

Финансирование работы

Представленные результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки (проект № 16.1798.2017/4.6).

Конфликт интересов

Соавтор Малыгин А. А. заявляет, что он является заместителем главного редактора «Журнала прикладной химии», у остальных авторов конфликт интересов отсутствует.

Информация об авторах

Радюк Елена Анатольевна, аспирант, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9084-7683>

Соснов Евгений Алексеевич, к.х.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1639-9514>

Малыгин Анатолий Алексеевич, д.х.н., проф., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1818-7761>

Рычков Андрей Александрович, д.ф.-м.н., проф., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0627-8594>; Scopus Author ID: 7004148031

Кузнецов Алексей Евгеньевич, к.ф.-м.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7435-2207>; Scopus Author ID: 55428954700

Список литературы

- [1] Повстугар В. И., Кодолов В. И., Михайлова С. С. Строение и свойства поверхности полимерных материалов. М.: Химия, 1988. 192 с.
- [2] *Electrets* / Ed. R. Gerhard-Multhaupt. Morgan Hill, CA: Laplacian Press, 1999. V. 2. 338 p.
- [3] Гольдаде В. А., Зотов С. В., Кравцов А. Г., Овчинников К. В. // Материалы. Технологии. Инструменты. 2009. Т. 14. № 2. С. 43–50.
- [4] Тютнев А. П., Ихсанов Р. Ш., Саенко В. С., Пожиданов Е. Д. // Хим. физика. 2012. Т. 31. № 3. С. 76–81 [Tyutnev A. P., Ikhsanov R. Sh., Saenko V. S., Pozhidanov E. D. // Russ. J. Phys. Chem. B: Focus on Physics. 2012. V. 6. N 2. P. 315–320].
- [5] «Открытые инновации» в области полимерных пленок от Санкт-Петербургского центра полимерных пленок (Клэкнер Пентапласт) и Санкт-Петербургского Государственного Технологического института (Технического университета) / Под ред. К. Колерта и Е. В. Белухичева. СПб, 2016. 173 с. [Open Innovation for PVC films from Film Center St.Petersburg (Klöckner Pentaplast) and St.Petersburg State Institute of Technology (Technical University)/ Eds Ch. Kohlert, E. Belukhizev. St.Petersburg, 2016. 182 p.].
- [6] Кольцов С. И. // ЖПХ. 1969. Т. 42. № 5. С.1023–1028.
- [7] Малыгин А. А., Малков А. А., Соснов Е. А. // Изв. АН. Сер. хим. 2017. № 11. С. 1939–1962 [Malygin A. A., Malkov A. A., Sosnov E. A. // Russ. Chem. Bull. 2017. V. 66. N 11. P.1939–1962].
- [8] Рычков А. А., Гороховатский Ю. А., Рычков Д. А. // Перспектив. материалы. 2006. № 2. С. 19–25.
- [9] Рычков А. А., Малыгин А. А., Трифонов С. А., Рычков Д. А. // ЖПХ. 2004. Т. 77. № 2. С. 280–284 [Rychkov A. A., Malygin A. A., Trifonov S., Rychkov D. A. // Russ. J. Appl. Chem. 2004. V. 77. N 2. P. 276–280].
- [10] Пат. РФ 2648360 (опубл. 2018). Электростатический материал на основе полиэтилена и способ его изготовления.
- [11] Ефимов Н. Ю., Малыгин А. А., Рычков А. А. // ЖПХ. 2016. Т. 89. № 5. С. 771–777 [Efimov N. Y., Malygin A. A., Rychkov A. A. // Russ. J. Appl. Chem. 2016. V. 89. N 6. P. 930–936].
- [12] Сумм Б. Д., Горюнов Ю. В. Физико-химические основы смачивания и растекания. М.: Химия, 1976. 232 с.
- [13] Simmons J. G., Tam M. C. // Phys. Rev. B. 1973. V. 7. N 8. P. 3706–3713.
- [14] Ольхов Ю. А., Аллаяров С. Р., Диксон Д. А., Кочеткова Г. В. // Пласт. массы. 2010. № 7. С. 4–7.
- [15] Внутских Ж. А., Федоров А. А., Чекрышкин Ю. С., Исмагилов З. Р., Керженцев М. А. // Химия в интересах устойчив. развития. 2001. Т. 9. № 5. С. 621–623.
- [16] Кодолов В. И. Замедлители горения полимерных материалов. М.: Химия, 1980. 274 с.