

Change of Thermal Emittance of Fluorocarbon Polymeric Materials in Near-Earth Space Environment

V.E. Skurat

*Talrose Institute for Energy Problems of Chemical Physics of Russian Academy of Sciences
Moscow, 119334, Russia*

skurat@chph.ras.ru

Abstract

Polymeric materials are used in space technology as coatings of outer surfaces of spacecraft for their cooling by thermal emittivity. In open space, the polymer coatings are subjected to action of many destroying factors of space environment. Among them, the most important are solar radiation (SR) and atomic oxygen (AO) on near-Earth orbits. The main consequences of this action are polymer erosion with mass losses, change of absorptance and, in some cases, change of thermal emittance (TE). These changes are important from the point of view of spacecraft lifetime. Analysis of literature data shows that polymer erosion in near-Earth space is common feature for all polymeric materials as well as the increase of solar radiation absorptance. But, as a rule, the value of TE does not change or slightly increase for polymer consisting of carbon, hydrogen, oxygen, and nitrogen (hydrocarbon polymers), and decrease – for fluorocarbon polymers consisting of carbon and fluorine – PTFE and FEP. This anomalous behavior of fluorocarbon polymers is explained here on the basis of difference of erosion mechanisms for hydrocarbon and fluorocarbon polymers respectively. Erosion of hydrocarbon polymers is provoked by oxidative dry etching of polymers by AO with formation of simple volatile oxides, evaporating into vacuum. This dry etching is accomplished by the surface roughening and increasing area of the surface from which TE takes place. In contrast, erosion of fluorocarbon polymers is caused mainly by macromolecule destruction under the action of vacuum UV component of SR with consecutive decrease of number-average molecular mass and accumulation of polymer fragments. Erosion takes place as a consequence of evaporation of fragments with molecular masses which are sufficiently small for evaporation. Part of these fragments may be in liquid state. Surface tension of liquid prevents surface roughening during erosion. Because of this, radiating area surface does not increase and TE cannot increase.

Key words: atomic oxygen, polymers, thermal emittance, space environment, solar vacuum UV radiation

Changes of thermal emittance of polymer films during flight tests

Polymer	Initial thickness, μm	TE, after flight, initial	Polymer	Initial thickness, μm	TE, after flight, initial
Teflon FEP	50.8	0.80 0.85	Epoxy	2286	1.00 0.96
PTFE	50.8	0.76 0.80	Polypropylene	508	0.91 0.82
Kynar	152.4	0.92 0.94	Polyimide Kapton H	381	0.94 0.93

УДК 539.188:546.21:629.786.2

Изменение интегральной степени черноты фторполимерных материалов в условиях околоземного космического пространства

В.Е. Скурат

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт энергетических проблем химической физики имени В. Л. Тальрозе РАН
Россия, Москва, 119334, Ленинский проспект, 38, корпус 2
skurat@chph.ras.ru*

Аннотация

Полимерные материалы используются в космической технике в качестве плёночных покрытий наружных поверхностей космических летательных аппаратов (КЛА). Они предназначены для излучательного теплоотвода с поверхности КЛА, нагреваемой солнечным излучением (СИ) и теплом, выделяющимся при работе агрегатов КЛА. В условиях космического вакуума это единственный канал теплоотдачи КЛА. Полимерные плёнки подвергаются воздействию повреждающих факторов космического пространства, из которых главными в условиях околоземного космического пространства являются СИ и атомарный кислород. Основные последствия такого воздействия – эрозия полимера, изменения его поглощательной способности и изменение интегральной степени черноты (ИСЧ). Эти изменения важны с точки зрения обеспечения продолжительной эксплуатации КЛА. Эрозия и изменения свойств полимеров, состоящих из углерода, водорода, кислорода и азота, определяются окислительной деструкцией их поверхности под действием атомарного кислорода с образованием простых летучих оксидов, улетающих в вакуум. Для большинства таких полимеров при этом ИСЧ не изменяется или немного возрастает из-за увеличения площади поверхности вследствие повышения её шероховатости при уносе массы в результате сухого травления атомарным кислородом. В случае фторированных полимеров ИСЧ снижается. В данной работе дано объяснение этого аномального эффекта. Унос массы с поверхности фторполимеров происходит преимущественно в результате испарения в вакуум фрагментов главной полимерной цепи, возникающих при последовательных разрывах цепи под действием вакуумной УФ компоненты СИ (длины волн $10 \div 180$ нм). Наборы фрагментов на поверхности фторполимеров в ходе облучения проходят через жидкую фазу, в которой силы поверхностного натяжения сглаживают поверхность, уменьшая тем самым её площадь, что и приводит к наблюдаемому снижению эффективных величин ИСЧ фторполимеров в результате облучения.

Ключевые слова: атомы кислорода, полимеры, интегральная степень черноты, околоземное космическое пространство, солнечное вакуумное УФ излучение

1. Введение

Полимерные материалы широко используются в космической технике, в частности, в качестве плёночных покрытий наружных поверхностей космических летательных аппаратов (КЛА) в составе экранно-вакуумной теплоизоляции [1–4]. Их назначение – эффективный излучательный теплоотвод с поверхности для исключения перегрева КЛА солнечным излучением (СИ) и теплом, выделяющимся при работе агрегатов КЛА. В условиях космического вакуума это единственный канал теплоотдачи КЛА. Находясь на поверхности КЛА, полимерные плёнки подвергаются воздействию разнообразных повреждающих факторов, из которых главными в условиях околоземного космического пространства являются СИ и ато-

марный кислород из остаточной земной атмосферы [5, 6]. Основные последствия такого воздействия - унос массы, изменения поглотительной способности полимера и изменение интегральной степени черноты (ИСЧ) или коэффициента теплового излучения ε из-за химических превращений полимера. Эти изменения важны с точки зрения обеспечения продолжительной эксплуатации КЛА и поэтому интенсивно изучаются как в лётных испытаниях, так и в лабораторных условиях, моделирующих условия космического пространства [5, 6]. Унос массы и изменения свойств полимеров, состоящих из углерода, водорода, кислорода и азота, определяются окислительной деструкцией их поверхности под действием атомарного кислорода с образованием простых летучих оксидов – CO, CO₂, H₂O, NO, улетающих в вакуум. Для большинства таких полимеров, состоящих из атомов углерода, водорода, кислорода и азота, при этом ИСЧ не изменяется или немного возрастает из-за увеличения площади поверхности вследствие повышения её шероховатости при уносе массы в результате сухого травления атомарным кислородом с образованием простых летучих оксидов [4]. В случае фторированных полимеров ИСЧ снижается, несмотря на заметный унос массы. В данной работе дано объяснение этого аномального эффекта. Унос массы с поверхности фторполимеров происходит преимущественно не в результате сухого травления полимера атомарным кислородом с образованием простых летучих оксидов, а в результате испарения в вакуум фрагментов главной полимерной цепи, возникающих при последовательных разрывах цепи под действием вакуумной УФ компоненты СИ (длины волн 10 ÷ 180 нм). Дело в том, что при действии вакуумного УФ излучения на полностью фторированные полимеры – политетрафторэтилен (ПТФЭ) и сополимер тетрафторэтилена с гексафторпропиленом (ФЭП) – происходит разрыв химических связей С-С и С-Ф при обычных температурах не сопровождается сшиванием макромолекул. Эти полимеры при обычных температурах только деструктируют, в отличие от углеводородного аналога ПТФЭ - полиэтилена, в котором протекают также процессы сшивания макромолекул. При разрывах связей С-С в макромолекулах фторполимеров по закону случая происходит снижение их среднечисленной молекулярной массы от начальной величины (несколько миллионов Дальтон в случае ПТФЭ; несколько сотен тысяч в случае ФЭП) до величин, соответствующих достаточно быстрому испарению (сублимации) фрагментированного полимера в вакуум. Наборы различающихся по молекулярной массе фотофрагментов на поверхности фторполимеров в ходе облучения проходят через жидкую фазу, в которой силы поверхностного натяжения сглаживают поверхность, уменьшая тем самым её площадь, что и приводит к наблюдаемому снижению эффективных величин ИСЧ фторполимеров в результате облучения. Проведены расчёты доз облучения, при которых проявляется этот эффект.

2. Интегральная степень черноты полимеров и её изменения на поверхности КЛА

Схема типичного радиатора на поверхности КЛА [2] показана на рис. 1. Его главный элемент – полимерная плёнка толщиной около 127 мкм (1) с односторонней металлизацией (слой алюминия, серебра или золота толщиной около 150 нм (2)) и слоем инконеля (3) толщиной около 30 нм. При помощи липкой ленты (4) (толщина около 50.8 мкм) плёнка крепится к наружной поверхности КЛА так, чтобы сторона плёнки без нанесённого металла была обращена в сторону космического пространства. При такой конструкции радиатора слой металла (алюминий, серебро, золото) является эффективным отражателем солнечного излучения, которое проходит сквозь прозрачную полимерную плёнку, а сама плёнка служит эффективным излучателем теплового ИК излучения с длинами волн 2 ÷ 25 мкм.

Обычно такой радиатор обеспечивает рабочую температуру T_s поверхности КЛА в диапазоне от -40 до $+65^0$ С. Иногда на поверхность полимерного слоя снаружи наносят также тонкий слой оксида индия – олова (на рисунке не показан) для подавления электризации.

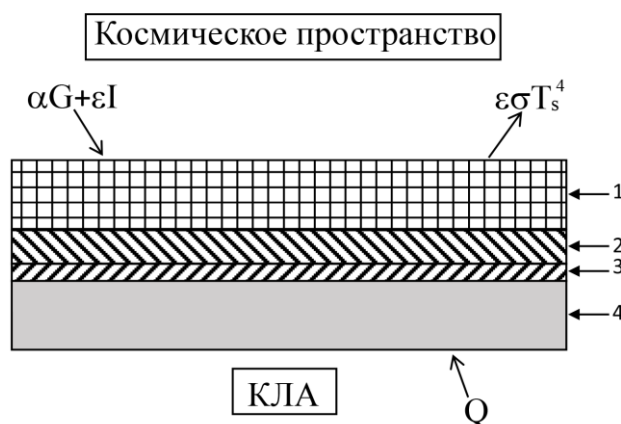


Рис. 1. Схема радиатора на поверхности космического аппарата
 1 – слой полимера, около 127 мкм; 2 – слой алюминия, около 150 нм;
 3 – слой инконеля, около 30 нм; 4 – липкая лента, около 50.8 мкм

Согласно работе [2], равновесная температура поверхности КЛИА может быть вычислена по формуле

$$T_s = \left[\frac{\alpha G + \varepsilon I + Q}{\varepsilon \sigma} \right]^{1/4},$$

которая следует из уравнения тепловых потоков

$$Q(\text{погл.}) + Q(\text{КЛИА}) = Q(\text{изл.}),$$

$$\alpha G + \varepsilon I + Q(\text{КЛИА}) = \varepsilon \sigma T_s^4$$

Здесь α – поглощательная способность полимерной плёнки; G – сумма падающего на поверхность потока солнечного тепла и альbedo Земли; I – поток ИК излучения земной поверхности; Q – поток тепла из КЛИА; ε – интегральная степень черноты полимерной плёнки; σ – константа Стефана – Больцмана.

В работе [1] на основе уравнения теплового баланса

$$A_s s \alpha = A \sigma \varepsilon T^4$$

уравнение для равновесной температуры поверхности КЛИА приведено в несколько ином виде:

$$T = \left[\frac{A_s}{A} \times \frac{s}{\sigma} \times \frac{\alpha}{\varepsilon} \right]^{1/4}$$

Здесь A_s – площадь, перпендикулярная солнечному излучению; A – полная площадь поверхности, испускающей тепловое излучение; s – солнечная постоянная; α – поглощательная способность полимерной плёнки; ε – интегральная степень черноты; σ – константа Больцмана.

В справочниках даются следующие определения ИСЧ:

- коэффициент теплового излучения ε – отношение энергетической светимости теплового излучателя M_e к энергетической светимости чёрного тела M_e^* при той же температуре в пределах пространственного угла 2π [7, стр.769].
- интегральная степень черноты ε – отношение полной интенсивности излучения реального тела к полной интенсивности излучения абсолютно чёрного тела, взятых при одной и той же температуре T [8, стр.645].

Однако в этих справочниках, как и в фундаментальных монографиях о тепловом излучении твёрдых тел [9–13], сведения об ИСЧ полимерных материалов, представляющих интерес для космической техники, скудны или отсутствуют вообще. Дело в том, что интерес к ИСЧ полимерных материалов возник лишь в середине 1980-х годов в связи с началом их широкого использования в КЛА. Величина ИСЧ является одной из наиболее важных характеристик полимерного материала при его выборе для использования в радиаторах на поверхности КЛА. Наиболее полные сведения о величинах ИСЧ ряда полимеров и об их изменении в результате экспонирования в условиях околоземного космического пространства даны в работе Бэнкса [4] для 46 полимеров. Особая ценность этой работы состоит в том, что экспонирование образцов и измерения их характеристик производились в одинаковых условиях, что повышает достоверность результатов их сравнительного изучения.

В работе Бэнкса [4] даны детальные сведения о ряде характеристик плёночных полимерных материалов (в том числе о величинах ИСЧ при температуре 300 К) до и после их экспонирования в открытом космическом пространстве в течение 39.5 месяцев на поверхности Международной космической станции. При анализе этих данных Бэнкс отметил, что для многих полимеров величина ИСЧ при экспонировании практически не изменяется или же изменяется лишь в малой степени. При рассмотрении приводимых в работе данных можно видеть, что при экспонировании плёнок некоторых полимеров (в том числе и имеющих практическое значение) величины ИСЧ могут как возрастать (в большинстве случаев), так и уменьшаться в зависимости от вида полимера. Результаты, полученные для некоторых полимеров, показаны в табл. 1.

Таблица 1

Изменения величин интегральной степени черноты ε полимерных плёнок при лётных испытаниях

Полимерная плёнка	Начальная толщина, мкм	ИСЧ ε , после полёта. Контроль	Полимерная плёнка	Начальная толщина, мкм	ИСЧ ε , после полёта. Контроль
поливинилфторид Tedlar	330.2	0.86 0.87	полиоксиметилен Delrin	1270	1.00 0.94
полиуретан	50.8	0.42 0.86	полиакрилонитрил	457.2	1.00 0.92
полиамид 6 Nylon 6	406.4	0.92 0.93	полиэтиленоксид	736.6	1.00 0.96
поликарбонат	508	0.92 0.95	эпоксид	2286	1.00 0.96
этилен-тетрафторэтилен Tefzel	152.4	0.87 0.88	полипропилен	508	0.91 0.82
ФЭП тефлон	50.8	0.80 0.85	пиролитический графит	2032	0.99 0.47
политетрафторэтилен ПТФЭ	50.8	0.76 0.80	полиимид Kapton H	381	0.94 0.93
перфторалкокси-сополимер	203.2	0.88 0.90	полиимид CP1	304.8	0.96 0.92
аморфный ПТФЭ AF	50.8	0.90 0.92	полиэфирэфиркетон	4572	0.97 0.93
поливинилиденфторид Kynar	152.4	0.92 0.94	хлортрифторэтилен Kel-F	127	0.94 0.92
			этилен-хлортрифторэтилен Nylar	228.6	0.90 0.89

Слева показаны величины ИСЧ до и после лётных испытаний плёнок полимеров, для которых величины ИСЧ уменьшаются, а справа – для полимеров, для которых величины ИСЧ увеличиваются. Бэнкс объяснил рост ИСЧ тем, что при экспонировании поверхности плёнки происходит её эрозия атомарным кислородом с развитием шероховатости в форме микровыступов, которые увеличивают площадь излучательной поверхности, что и приводит к наблюдаемому увеличению измеряемой (эффективной) величины ИСЧ. Действительно, как показано на рис. 2, воздействие быстрых атомов кислорода на плёнку полиимида типа Картон Н приводит к формированию ворсообразной структуры [14]. Она состоит из грибоподобных микровыступов (рис. 3) [14]. Снижение ИСЧ при экспонировании некоторых полимеров Бэнкс объяснил тем, что плёнки этих полимеров имели слишком малую толщину (например, 50.8 мкм), так что её дальнейшее снижение при травлении и было причиной наблюдаемого уменьшения измеряемой (эффективной) величины ИСЧ. Эффект толщины, конечно, имеет место, но он недостаточен. Наблюдение снижения ИСЧ и для более толстых плёнок может служить обоснованием для поиска другого объяснения в дополнение к предлагаемому Бэнксом. Оно даётся ниже.

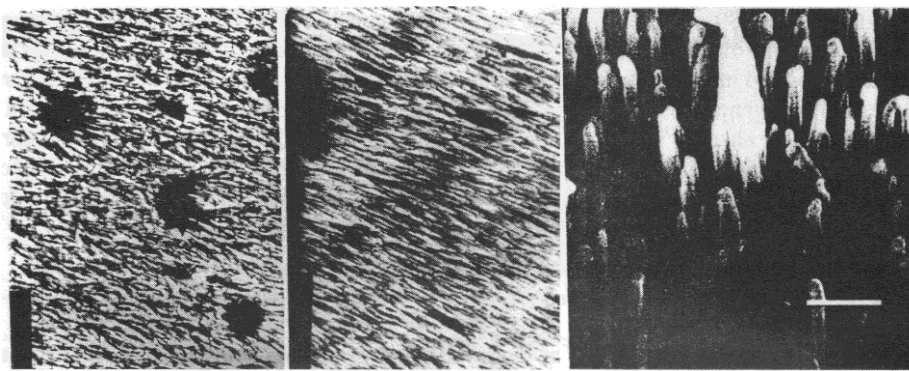


Рис. 2. Ворсообразная структура, возникающая на поверхности плёнки полиимида Картон Н при бомбардировке быстрыми атомами кислорода на установке ЦАГИ ВАТ 103 [14]

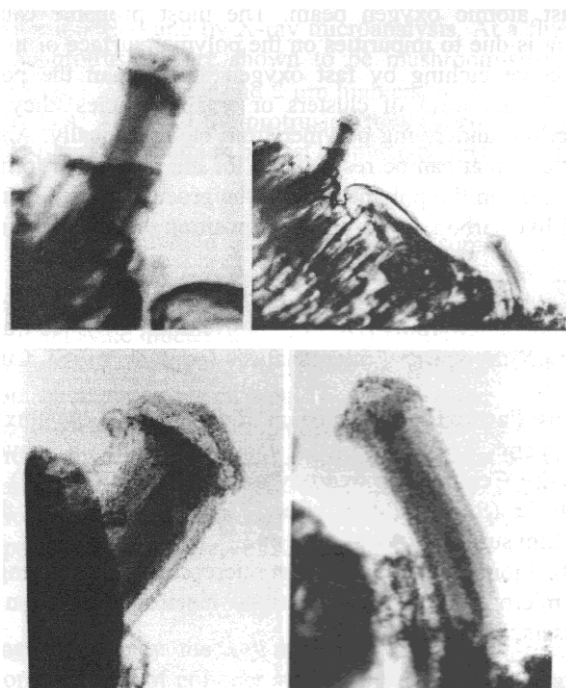


Рис. 3. Грибообразная структура выступов, показанных на рис.2 [14]

3. Возможный механизм изменения интегральной степени черноты фторполимеров в условиях космического пространства

Как упоминалось ранее, большинство полимеров, состоящих из атомов углерода, водорода, кислорода и азота, подвергаются эрозии атомарным кислородом в процессах сухого травления с образованием летучих оксидов и формированием шероховатой поверхности. В случае фторполимеров эрозия тоже происходит, но со значительно меньшей скоростью, под действием вакуумной УФ компоненты солнечного излучения, а не под действием атомарного кислорода [15–22]. Эрозия происходит не сразу при начале облучения. Она начинается со значительной задержкой (период индукции (ПИ)) (рис. 4) [21, 22].

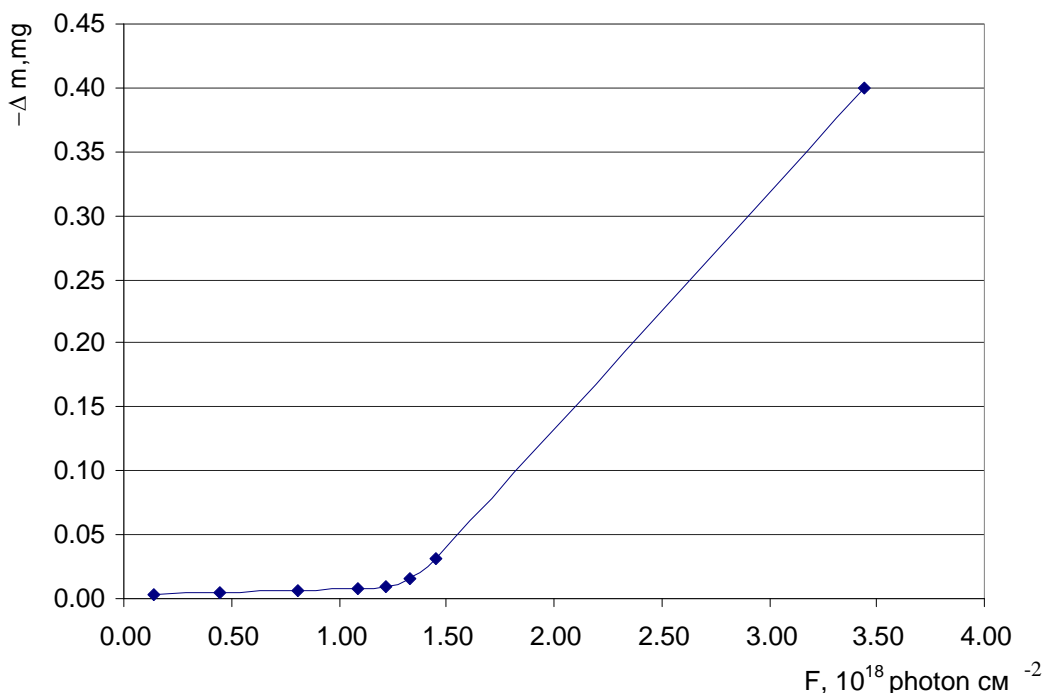


Рис. 4. Потери массы плёнки ФЭП при воздействии ВУФ излучения с длиной волны 147 нм в зависимости от флюенса [21, 22]

После начала облучения за время ПИ происходят последовательные процессы разрыва химических связей С–С по закону случая с образованием фрагментов макромолекул, сначала крупных, а затем — по мере увеличения флюенса ВУФ излучения — всё более коротких. Обладающие летучестью фрагменты малых размеров образуются и при низких флюенсах, но с очень малыми, практически незаметными выходами. Однако по мере роста флюенса содержание крупных фрагментов последовательно снижается, тогда как выход фрагментов малых размеров с летучестью, достаточной для перехода фрагмента в вакуум (он называется испарением при выходе фрагмента из жидкой фазы и сублимацией — при выходе фрагмента с поверхности твёрдой фазы), непрерывно растёт.

Наконец, достигается пороговое значение флюенса, при превышении которого разрыв любой химической связи С–С в фрагменте с наибольшим содержанием в поверхностном слое (этот фрагмент имеет молекулярную массу, которая соответствует среднечисленной молекулярной массе набора фрагментов, полученному к данному моменту в поверхностном слое) приводит к скачкообразному ускорению уноса массы (эрозии).

Как показывают экспериментальные данные и расчёты в работе [23], при температуре 293 К и действии ВУФ излучения с длиной волны 147 нм и интенсивностью порядка 10^{14} фотон $\times \text{см}^{-2} \times \text{с}^{-1}$ на ПТФЭ период индукции длительностью около 10^3 с или около 17 мин (типичная минимальная длительность эксперимента) характерен для молекул-фрагментов $\text{C}_{24}\text{F}_{50}$

с молекулярной массой $M = 1238$. Для образования фрагментов с такой среднечисленной молекулярной массой, согласно оценкам, требуется поглощённая в поверхностном слое полимера доза облучения 1.5×10^7 Гр или 1.5×10^3 Мрад.

Согласно работе [15], формула для времени жизни относительно перехода в вакуум молекулы с поверхности конденсированного вещества с плотностью ρ (жидкости или твёрдого тела), состоящего из молекул с массой m , имеет вид

$$\tau = P^{-1} (2\pi kT)^{1/2} \rho^{2/3} m^{-1/6}$$

Здесь P – давление насыщенного пара вещества; T – температура; k – постоянная Больцмана. Для скорости испарения (сублимации) имеем [15, 16]

$$j = P(2\pi kTm)^{-1/2} \frac{\text{молекула}}{\text{см}^2 \times \text{с}},$$

$$j \times m = P(2\pi kT)^{-1/2} m^{1/2} \frac{\Gamma}{\text{см}^2 \times \text{с}}$$

Комбинируя эти уравнения, получаем

$$j \times m = \frac{m^{1/3} \rho^{2/3}}{\tau}$$

В случае фрагмента фторполимера с химической формулой C_nF_{2n+2} имеем

$$m = \frac{50n + 38}{N} \text{ г},$$

где N – число Авогадро. При $\rho = 2.1 \text{ г} \times \text{см}^{-3}$ для ПТФЭ имеем

$$j \times m \left(\frac{\Gamma}{\text{см}^2 \cdot \text{с}} \right) = \frac{2.1^{2/3} (50n + 38)^{1/3}}{\tau \times (6.02 \times 10^{23})^{1/3}}$$

или, поскольку 38 много меньше чем $50n$,

$$j \times m \left(\frac{\Gamma}{\text{см}^2 \cdot \text{с}} \right) \approx 0.7 \times 10^{-7} \frac{n^{1/3}}{\tau}$$

Приняв для времени жизни величину 10^3 с (типичная минимальная продолжительность лабораторного эксперимента) и, считая заметной потерю массы за это время равной 10^{-4} г/см², получаем

$$10^3 \text{ с} = \frac{10^{-4}}{j \times m} = \frac{10^{-4} \times \tau}{0.7 \times 10^{-7} n^{1/3}},$$

$$\frac{\tau}{n^{1/3}} = \frac{0.7 \times 10^{-7} \times 10^3}{10^{-4}} = 0.7$$

Из этих оценок следует [15], что при температуре 293 К период индукции должен продолжаться около 10^3 с для получения фрагмента с $n = 24$, т.е. $C_{24}F_{50}$. Для этого необходима доза облучения светом 147 нм в поверхностном слое равная 1.5×10^7 Гр [23, табл.4]. При температуре + 65⁰С фрагмент $C_{24}F_{50}$ с максимальным содержанием в молекулярно - массовом распределении фотофрагментов на облучаемой поверхности ФЭП находится в твёрдом состоянии. Однако жидкая фаза, которая требуется для сглаживания поверхности травления,

может создаваться и более короткими фотофрагментами, которые всегда присутствуют в молекулярно-массовом распределении фотофрагментов, хотя и в меньших количествах.

Свидетельством в пользу предлагаемого объяснения аномального изменения ИСЧ фторполимеров в условиях космического пространства могут служить известные из литературы экспериментальные данные. А именно, как при экспонировании фторполимеров в открытом космосе, так и при их исследовании на наземных лабораторных установках, моделирующих условия космического пространства, развитие шероховатости поверхности полимера не наблюдалось никогда, по крайней мере, при температурах ниже 120°C , в отличие от полимеров, состоящих только из углерода, водорода, кислорода и азота, на поверхности которых при эрозии в этих условиях развивается шероховатость.

4. Заключение

В работе предложено объяснение аномального уменьшения интегральной степени черноты фторполимерных плёнок при экспонировании в околоземном космическом пространстве. Оно состоит в том, что в этих условиях на поверхности травления под действием вакуумной УФ компоненты солнечного излучения образуется жидкая фаза медленно испаряющихся в вакуум фторуглеродных фотофрагментов. Силы поверхностного натяжения жидкости, стремящиеся свести к минимуму свободную энергию поверхности жидкости, не позволяют сформироваться индуцируемой эрозией шероховатости поверхности травления, так что площадь поверхности, испускающей тепловое излучение, изменяется мало или не изменяется вообще. Поэтому измеряемая экспериментально эффективная ИСЧ фторполимера не изменяется или уменьшается из-за сглаживания поверхности или эффекта толщины, которая при эрозии уменьшается. В случае полимеров, состоящих из углерода, водорода, кислорода и азота, эрозия в условиях околоземного космического пространства также происходит, но уже преимущественно под действием атомарного кислорода. Эрозия этих полимеров является результатом сухого травления поверхности с образованием простых летучих оксидов элементов, составляющих такой полимер. Жидкая фаза при этом не образуется. Поэтому происходит беспрепятственное формирование шероховатости поверхности, увеличение её эффективной площади и результирующее повышение эффективной интегральной степени черноты.

Литература

1. Henninger J.H. Solar Absorptance and Thermal Emittance of Some Common Spacecraft Thermal Control Coatings. NASA Reference Publication 1121. April 1984. 47 p.
2. Angirasa D., Ayyaswamy P.S. Review of Evaluation Methodologies for Satellite Exterior Materials in Low Earth Orbit. J. Spacecraft Rockets. Vol. 51. No 3. Pp. 750–761. 2014.
3. Finckenor M.M., Dooling D. Multilayer Insulation Material Guidelines. NASA/TP-1999-809263. Alabama, Marshall Space Flight Center. April 1999. 33 p.
4. Banks B.A. Spacecraft Polymers Atomic Oxygen Durability Handbook. Technical Report. NASA-HDBK- 6024. Washington. June 2014. 205 p.
5. Skurat V.E. Polymers in Space. In: Encyclopedia of Aerospace Engineering. Vol. 4, Materials Technology. Eds. Blockley R. and Shyy W. Wiley. 2010. Part 21.
6. Skurat V.E. Polymers in Space. In: Encyclopedia of Aerospace Engineering. Vol. 4, Materials Technology. Eds. Blockley R. and Shyy W. Wiley. 2012.
7. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др. Физические величины. Справочник. Под ред. Григорьева И.С. и Мейлихова Е.З. М.: Энергоатомиздат. 1991. 1232 с. Глава 31. Новицкий Л.А. Оптические свойства веществ. С. 766.
8. Таблицы физических величин. Справочник. Под ред. акад. Кикоина И. К. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.

9. Козлов Л.В., Нусинов М.Д., Акишин А.И., Залетаев В.М., Козелкин И.И. Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей его среды. М.: Машиностроение. 1971. 380 с.
10. Брамсон М.А. Инфракрасное излучение нагретых тел. М.: Наука. 1964. 224 с.
11. Излучательные свойства твёрдых материалов: справочник. Под ред. Шейндлина А. Е. М.: Энергия. 1974. 404 с.
12. Топорец А.С. Оптика шероховатой поверхности. Л.: Машиностроение. 1988. 192 с.
13. Слободкин Л.С., Сотников-Южин Ю.М. Методы определения терморadiационных свойств полимерных покрытий. Минск: Наука и техника. 1977. 160 с.
14. Матвеев В.В., Никифоров А.П., Скурат В.Е., Чалых А.Е. О механизме возникновения шероховатости поверхности полиимида при её анизотропном травлении пучком быстрых атомов кислорода // Химическая физика. Т. 17. № 4. С. 120–126. 1998
15. Никифоров А.П., Терновой А.И., Самсонов П.В., Скурат В.Е. Проблемы изучения механизма взаимодействия вакуумного УФ излучения и гипертермического атомарного кислорода (5 эВ) с полимерными материалами космических летательных аппаратов // Химическая физика. Т. 21. № 5. С. 73–80. 2002.
16. Skurat V.E., Samsonov P.V. Some Peculiarities in Laboratory Simulation of Polymer Film Degradation by Solar Vacuum Ultraviolet Radiation in a Space Environment. High Performance Polymers. Vol. 13. No 3. Pp. S529–S537. 2001.
17. Skurat V.E. Perfluorocarbon Polymers. Behavior in Real Space Environment and in Simulated Laboratory Conditions. In: Proc of ISMSE 2012 - 12th International Symposium on Materials in the Space Environment, European Space Agency (Special Publication). 2013.
18. Скурат В.Е., Самсонов П.В. Превращения перфторуглеродных полимеров (политетрафторэтилена, Тефлона ФЭП) при высокоэнергетических воздействиях (вакуумное УФ излучение и быстрые электроны) // Известия Российской академии наук. Серия Энергетика. № 4. С. 119–128. 2008.
19. Skurat V.E., Dorofeev Yu.I., Barbashev E.A., Budashev, Nikiforov A.P., Ternovoy A.I., Van Eesbeek M., Levadou F. The Separate and Combined Effects of VUV Radiation and Fast Atomic Oxygen on Teflon FEP and Silicon Carbide. In: 7th International Symposium on Materials in Space Environment. European Space Agency, Special Publication. Vol. 399. Pp. 267–278. 1997.
20. Барбашёв Е.А., Дорофеев Ю.И., Скурат В.Е. Действие солнечного вакуумного УФ излучения как главная причина ухудшения деформационно-прочностных свойств политетрафторэтилена в условиях околоземного космического пространства// Доклады Академии наук. Т. 325. № 4. С. 730–734. 1992.
21. Байдаровцев Ю.П., Василец В.Н., Пономарёв А.Н., Дорофеев Ю.И., Скурат В.Е. Исследование кинетики накопления радикалов при фотолизе политетрафторэтилена светом 147 и 123.6 нм // Химическая физика. Т. 3. № 10. С. 1405–1408. 1984.
22. Van Eesbeek M., Levadou F., Skurat V.E., Dorofeev Y.I., Vasilets V.N., Barbashev E.A. Degradation of Teflon FEP due to VUV and Atomic Oxygen Exposure In: Proc of 6th International Symposium on Materials in a Space Environment. ESTEC. Noordwijk. European Space Agency. SP-368. Pp. 165–173. 1994.
23. Skurat V.E., Samsonov P.V., Nikiforov A.P. Vacuum Ultraviolet Radiation in Sources of Hyperthermal Atomic Oxygen. Photodestruction of Polytetrafluoroethylene (PTFE) and Teflon FEP for Indication of this Radiation. High Performance Polymers, Vol. 16. No 2. Pp. 339–355. 2004.

Статья поступила в редакцию 27 декабря 2016 г.