

Влияние электронного облучения стекла К-208 на процесс загрязнения его поверхности высокомолекулярными соединениями

Р. Х. Хасаншин, Л. С. Новиков

Исследовано влияние электронного облучения стекла К-208 на процесс осаждения на его поверхности продуктов термостимулированного газовыделения полимерного композита. Облучение образцов электронами с энергией 30 кэВ при плотности потока в диапазоне от 10^{10} до $2 \cdot 10^{11}$ см⁻²с⁻¹ проводили в вакуумной камере при давлении 10^{-4} Па. Поверхности образцов изучены методами атомно-силовой микроскопии (АСМ). Показано, что на процесс образования пленок загрязнения значительное влияние оказывают структурные изменения поверхности, обусловленные электростатическими разрядами, вид которых зависит от плотности электронного потока.

Ключевые слова: электронное облучение, стекло К-208, электростатический разряд, полимерные композиционные материалы, летучие вещества, осаждение.

Введение

Использование на современных и разрабатываемых космических аппаратах (КА) большого количества высокочувствительной аппаратуры ужесточает требования к чистоте поверхностей оптических материалов и к надёжности прогнозирования изменения их функциональных свойств. В общем случае при решении задачи прогнозирования необходимо учитывать синергетические эффекты, возникающие при одновременном и последовательном воздействии нескольких факторов.

Например, деградация оптических свойств материалов внешних поверхностей геостационарного КА обусловлена воздействием магнитосферной плазмы [1, 2] и продуктов собственной внешней атмосферы [3, 4]. Результаты экспериментов показали, что ионизирующие излучения влияют как на скорость потери массы неметаллических материалов, используемых на КА [5], то есть на плотность его собственной атмосферы, так и на осаждение её продуктов на оптических поверхностях [6, 7].

Цель данной работы — изучение влияния электронного облучения стекла К-208, используемого в качестве защитного покрытия солнечных батарей и терморadiatorов КА, на процессы

загрязнения его поверхности под воздействием молекулярного потока (МП), создаваемого продуктами термостимулированного газовыделения полимерного композита.

Методика эксперимента

В экспериментах исследовали образцы стекла К-208 стандартных размеров $40 \times 40 \times 0,17$ мм, которые были разделены на пять групп. Группу 1 составили необлученные образцы, а образцы 2 – 5 групп, облучали электронами энергией $E_e = 30$ кэВ при следующих плотностях потока: $\varphi_{2e} = 2,5 \cdot 10^{10}$; $\varphi_{3e} = 5,1 \cdot 10^{10}$; $\varphi_{4e} = 7,7 \cdot 10^{10}$; $\varphi_{5e} = 1,1 \cdot 10^{11}$ см⁻²с⁻¹, соответственно. Значения флюенса электронов Φ_e лежали в диапазоне от $9,3 \cdot 10^{14}$ до $1,2 \cdot 10^{15}$ см⁻².

Источником молекулярных потоков служил полимерный композиционный материал ЭКОМ-1, состав летучих продуктов и кинетика газовыделения которого детально исследованы в [8]. Этот материал толщиной 100 мкм был нанесён на диски из сплава АМг-6 диаметром 100 мм, температура источника МП составляла 120 ± 1 °С.

Образцы стекла прикрепляли медными “лепестками” шириной 2 мм к полированной металлической поверхности термостатируемого столика испытатель-

ного стенда УВ-1/2 ОАО “Композит” и подвергали облучению и действию МП в вакууме при давлении 10^{-4} Па. Температура материала источника МП составляла 120 ± 1 °С, а столик охлаждали до 20 ± 1 °С.

При указанных условиях на поверхности образцов могут осаждаться только высокомолекулярные компоненты продуктов газовой выделения материала источника [8]. Все эксперименты проводили при одинаковом пространственном расположении источника МП и образцов стекла.

Поверхности образцов до и после облучения и бомбардировки МП исследовали методом АСМ с помощью атомно-силового микроскопа Solver P47–Multi–Technique SPM производства NT–MDT г. Зеленоград. Для изучения топологии поверхности образцов использовали полуконтактную атомно-силовую моду, которая при высокой точности измерений не разрушает поверхность. Радиус закругления иглы кантилевера SNG01/TiN составлял 35 нм, а резонансная частота механических колебаний балки кантилевера была равной 161,019 кГц (на данной частоте проводят измерения в полуконтактной моде).

Измерения коэффициентов пропускания образцов до и после воздействий проводили на двулучевом спектрофотометре в спектральном диапазоне 200 – 2500 нм со спектральным разрешением 2 нм. Зондирующее излучение направляли перпендикулярно к поверхности образца, размер его пятна на поверхности образца составлял 3×5 мм. Фотометрическая погрешность измерений не превышала 0,3%.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Были последовательно проведены две серии экспериментов. В первой из них изучали изменения спектрального коэффициента пропускания и структуры поверхностей образцов, облученных при разных плотностях потоков электронов. Вторая серия экспериментов заключалась в бомбардировке в течение трех часов молекулярными пучками поверхностей облученных образцов и в измерении их спектральных коэффициентов пропускания.

На рис. 1 представлены АСМ-изображения, характеризующие шероховатость участка поверхности необлученного стекла. Измерения показали, что на поверхности необлученного образца могут существовать отдельные микровыступы высотой до 20 нм, но их наличие не может оказать заметного влияния на общую структуру поверхности. Количество микровыступов и их размеры значительно увеличиваются при облучении, сопровождаемом отжигом дефектов и электростатическими разрядами. Рост числа микровыступов связан с тем, что одним

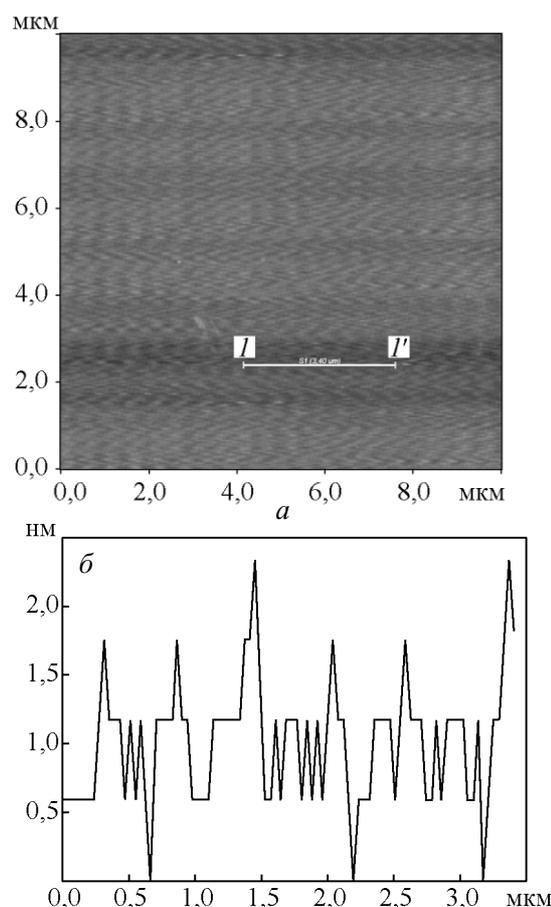


Рис. 1. АСМ-изображение поверхности необлучённого образца: а – кадр 10×10 мкм, б – сечение кадра вдоль линии “1 – 1”.

из каналов радиационно-стимулированного отжига различного рода дефектов, концентрация которых в приповерхностном слое стекла очень велика, является модификация поверхности с образованием микровыступов. Значительный вклад в увеличение размеров микровыступов вносят электростатические разряды с выбросом в окружающее пространство плазмы.

Действительно, при облучении электронами в образце формируются области с высокой плотностью заряда. По мере роста количества термализованных электронов, длина пробега которых в стекле при энергии 30 кэВ составляет ~ 9 мкм, максимум их распределения смещается к облучаемой поверхности (рис. 2) за счёт торможения первичных электронов в поле накопленного заряда. Приведенное на рис. 2 распределение термализованных электронов по толщине образца для разных значений времени после начала облучения рассчитано с помощью програм-

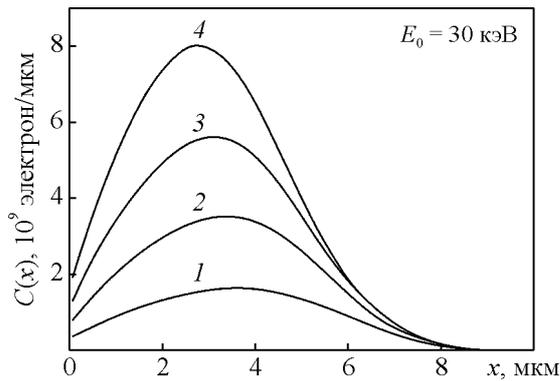


Рис. 2. Распределения термализованных электронов для моментов времени, с: 1 – 0,8842; 2 – 0,6631; 3 – 0,4420; 4 – 0,2210.

много комплекса GANT-4 [9] с учетом поля накопленного заряда.

При достижении критических значений напряжённости поля начинают развиваться электростатические разряды, как правило, двух типов:

- разряд микровыступ — остаточная ионизованная атмосфера вакуумной камеры;
- разряд вдоль облучаемой поверхности подложки.

Результаты экспериментов показали, что при плотностях потока в диапазоне от 10^{10} до $5,0 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$

происходят разряды первого типа. Они сопровождаются выбросом плазмы и многократно повторяются через отдельные микровыступы, что в свою очередь приводит к росту микровыступов за счет накопления остывшего стекла. При этом роль катода играет выступающий участок стекла, а роль анода — окружающая ионизованная остаточная атмосфера вакуумной камеры. В качестве примера на рис. 3а приведено АСМ-изображение облученной подложки, высота отдельных микровыступов на которой превышает 100 нм. С ростом плотности потока в указанном выше диапазоне концентрация микровыступов увеличивается, а их средняя высота уменьшается (рис. 3б).

При дальнейшем увеличении плотности потока электронов растет скорость ионизации остаточной атмосферы и концентрация положительных ионов, особенно в области, прилегающей к облучаемой поверхности, что в свою очередь стимулирует развитие разрядов второго типа (рис. 3в). При этом глубина разрядных каналов не превышает 2 нм, а средняя высота микровыступов составляет около 20 нм. При значениях $\phi_e \geq 1,0 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ разряды, развивающиеся вдоль облучаемой поверхности, начинают преобладать (рис. 3г) и глубина каналов может достигать 6 нм, а при $\phi_e > 2,0 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ разряды первого типа не наблюдаются.

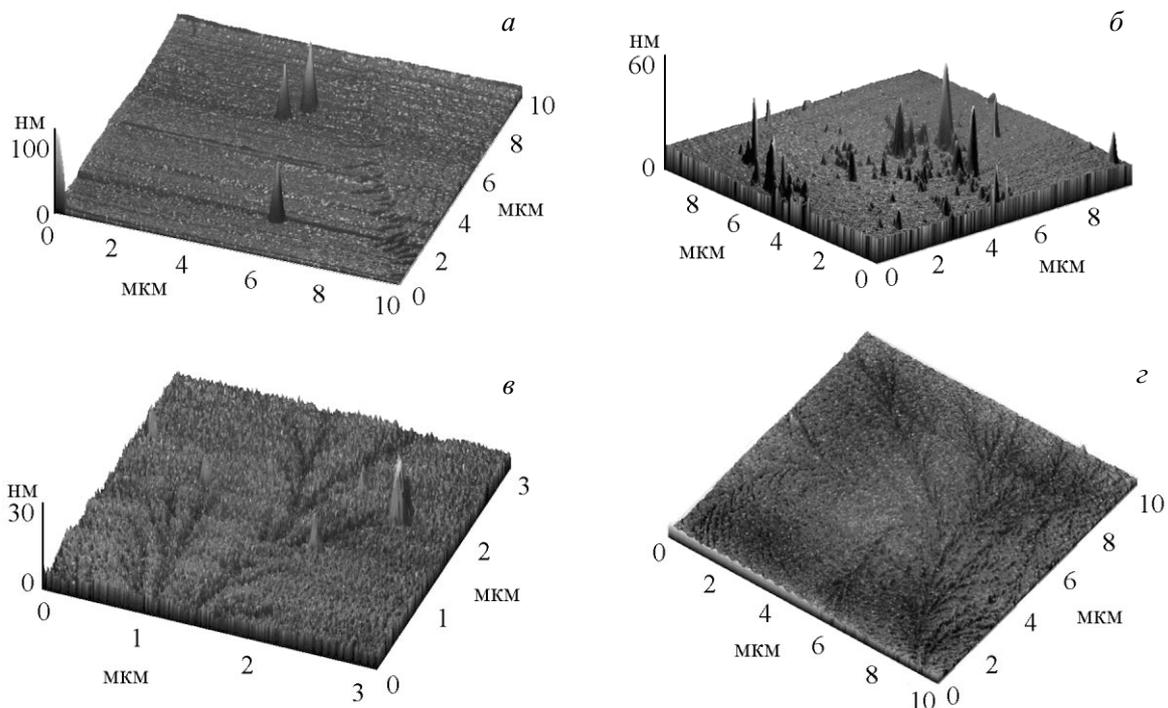


Рис. 3. 3D-изображение приповерхностных слоев образцов 2 – 5 групп, облучённых при разных плотностях потока $\phi_e, \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$: а – $2,5 \cdot 10^{10}$; б – $5,1 \cdot 10^{10}$; в – $7,7 \cdot 10^{10}$; г – $1,1 \cdot 10^{11}$.

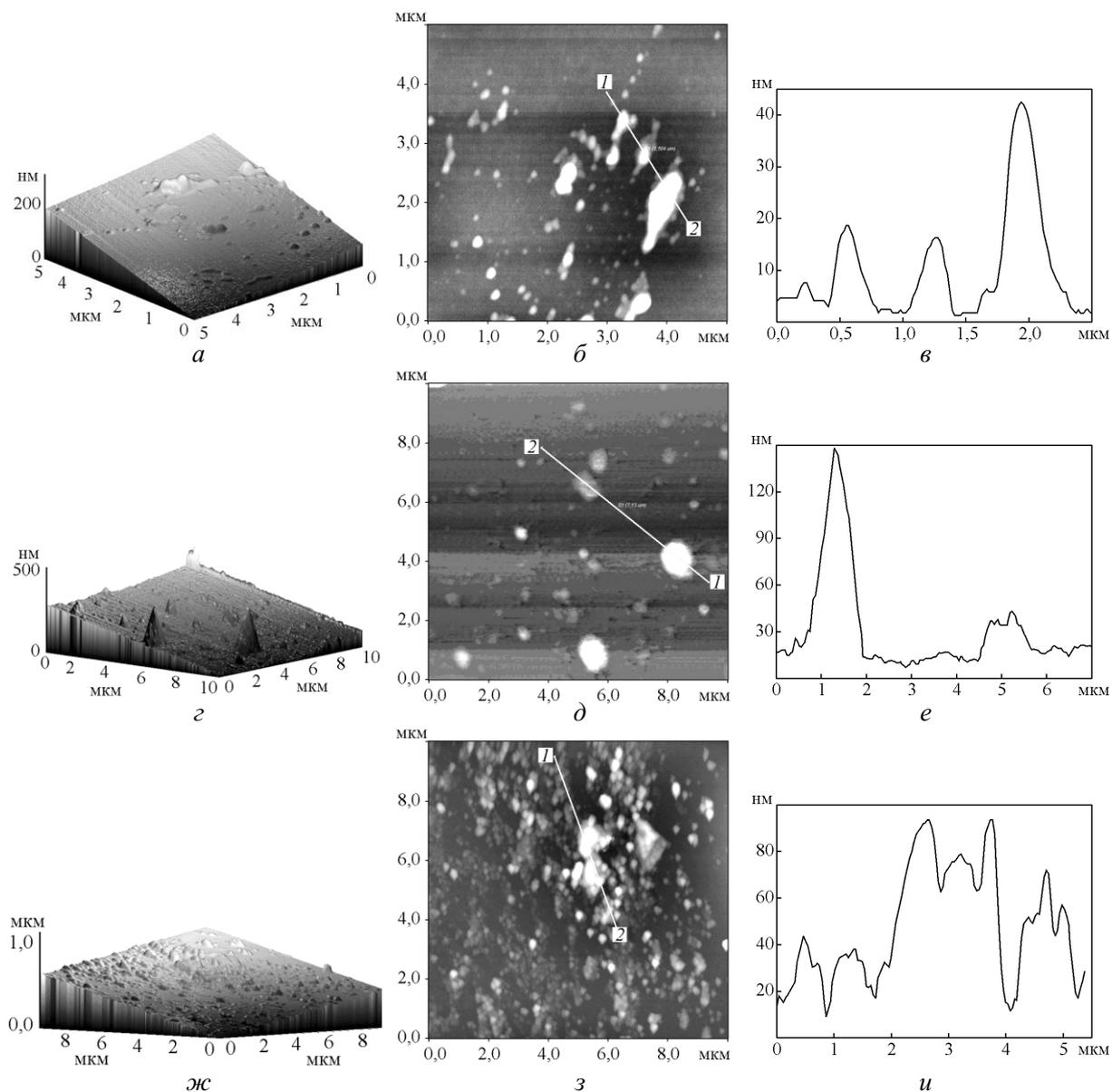


Рис. 4. АСМ-изображения участка поверхности 10×10 мкм образца из первой (а – в), третьей (з – е), пятой (ж – и) группы: а, з, ж – 3D-изображение; б, д, з – 2D-изображение; в, е, и – сечение кадра вдоль линии 1 – 2.

Во второй серии экспериментов исходные и облученные образцы подвергали действию молекулярных потоков. На рис. 4 виден островковый характер органической пленки, образованной на поверхности необлученного образца при бомбардировке МП. Отметим, что высота отдельных островков достигает 60 нм.

На рис. 4 приведены АСМ-изображения участков поверхностей образцов из третьей и пятой групп после воздействия на них МП. Из сравнения приведенных изображений следует, что с увеличением плотности потока предварительного электронного

облучения, приводящего к деструкции облучаемой поверхности, сплошность органической пленки увеличивается, а максимальная высота отдельных островков уменьшается от 150 (рис. 4е) до 95 нм (рис. 4и).

Изменения спектров пропускания образцов после облучения (линии 2) и последующего действия молекулярных потоков (линии 3) по сравнению со спектром исходного образца (линия 1) показаны на рис. 5.

Графики, приведённые на рис. 5а, демонстрируют влияние МП на спектр пропускания образца,

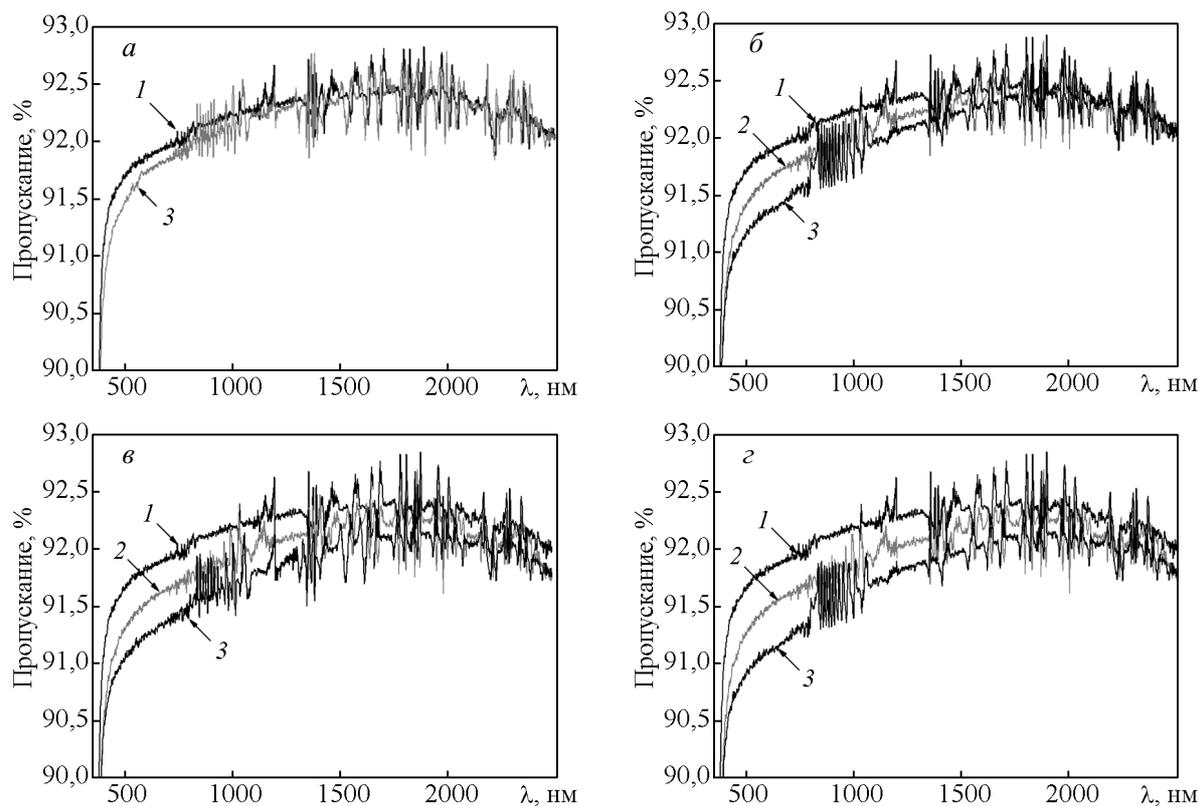


Рис. 5. Спектры пропускания образцов из первой (а), третьей (б), четвертой (в) и пятой (г) групп: 1 – исходной подложки; 2 – после облучения; 3 – после действия МП.

АСМ-изображение которого показано на рис. 1. Из рис. 5б – г видно как изменяются спектры пропускания образцов при облучении электронами с разными плотностями потока и последующей бомбардировке МП. Необходимо отметить, что деструкция поверхности образцов за счет разрядов второго типа заметно снижает коэффициент пропускания и в длинноволновой области.

Средние значения изменений коэффициентов пропускания электромагнитного излучения после облучения образцов ($\Delta T_{i\text{эл}}(\lambda)$, $i = 1, \dots, 5$) и последующей бомбардировки МП ($\Delta T_{i\text{МП}}(\lambda)$), соответствующие трем длинам волн для пяти групп образцов, приведены в табл. 1. Усреднение проводили

по результатам измерений спектров трёх образцов из каждой группы.

Условия воздействия МП на все образцы при проведении экспериментов были одинаковыми. Однако по мере роста плотности потока предварительного облучения увеличились и изменения коэффициентов пропускания подложек под действием МП. Например, в результате бомбардировки МП образцов из первой (рис. 5а) и пятой (рис. 5г) групп изменения коэффициентов пропускания при $\lambda = 700$ нм отличаются в 2,4 раза. Такая разница в полученных результатах может быть связана с изменениями условий на поверхностях облученных подложек.

Таблица 1

Изменения коэффициентов пропускания образцов после воздействия излучения и МП

λ , нм	Группа									
	№ 1		№ 2		№ 3		№ 4		№ 5	
	$\Delta T_{1\text{эл}}$	$\Delta T_{1\text{МП}}$	$\Delta T_{2\text{эл}}$	$\Delta T_{2\text{МП}}$	$\Delta T_{3\text{эл}}$	$\Delta T_{3\text{МП}}$	$\Delta T_{4\text{эл}}$	$\Delta T_{4\text{МП}}$	$\Delta T_{5\text{эл}}$	$\Delta T_{5\text{МП}}$
600	0,0	0,18	0,14	0,20	0,21	0,23	0,29	0,28	0,35	0,38
700	0,0	0,15	0,13	0,18	0,18	0,20	0,27	0,25	0,30	0,36
2400	0,00	0,00	0,01	0,0	0,02	0,00	0,08	0,03	0,10	0,03

Численный анализ экспериментальных результатов

Для численного анализа полученных данных были использованы модели термостимулированного газыделения полимерного композита [10] и осаждения образующихся летучих веществ (ЛВ) на поверхности подложки [6]. Первая модель, описывающая изменения концентрации $C_i(x, t)$ ($i = 1, 2, 3 \dots N$) ЛВ i -го вида в материале-источнике МП, представляет собой краевую задачу для дифференциального уравнения

$$\frac{\partial C_i(x, t)}{\partial t} = D_i \frac{\partial^2 C_i(x, t)}{\partial x^2} - \beta_i(x, t) C_i(x, t),$$

$$x \in (0, h), t > 0, \quad (1)$$

$$C_i(x, t)|_{t=0} = R_i(x), \quad x \in [0, h], \quad (2)$$

$$D_i \frac{\partial C_i(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=h} + k_i C_i(x, t) \Big|_{x=h} = 0, \quad t > 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial C_i(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad t > 0, \quad (4)$$

где $\beta_i(x, t)$ — эффективная скорость реакций первого порядка с участием ЛВ i -го вида, с^{-1} ; $D_i(x, t)$ — эффективный коэффициент диффузии ЛВ i -го вида, $\text{мкм}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; $R_i(x)$ — распределение концентрации ЛВ i -го вида в материале в начальный момент времени, $\text{молекул} \cdot \text{мкм}^{-3}$; $k_i(t)$ — эффективный коэффициент десорбции i -й компоненты, $\text{мкм} \cdot \text{с}^{-1}$; $S_i(x, t)$ — функция источника i -й компоненты, $\text{молекул} \cdot \text{мкм}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$; h — толщина образца материала, мкм .

В модели предполагается, что скорость выделения ЛВ i -го вида с единицы поверхности материала в вакуум прямо пропорциональна её концентрации в приповерхностном слое $C_i(h, t)$, которая определяется при решении задачи (1)–(4):

$$\frac{df_i(t)}{dt} = k_i C_i(h, t) =$$

$$= 2k_i R_i \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\exp\left[-\left(\lambda_{ni}^2 D_i + \beta_i\right)t\right]}{1 + h \left(\frac{k_i}{D_i} + \frac{\lambda_{ni}^2 D_i}{k_i}\right)}, \quad (5)$$

где λ_{ni} — решение трансцендентного уравнения:

$$\text{tg} \lambda_{ni} h = \frac{k_i}{\lambda_{ni} D_i}.$$

В свою очередь, скорость изменения массы продуктов газыделения i -го типа $dM_{ci}(\vec{r}, t) / dt$ на

единице поверхности подложки описывается уравнением [6]:

$$\frac{dM_{ci}(\vec{r}, t)}{dt} = \alpha_{cs}(\vec{r}) S_0 m_i \frac{df_i(t)}{dt} -$$

$$- k_{ci}(\vec{r}) M_{ci}(t) - \chi_{ci}(\vec{r}) M_{ci}(t),$$

где S_0 — площадь образца-источника ЛВ; m_i — масса ЛВ i -го типа; \vec{r} — радиус-вектор, определяющий координаты точек на поверхности относительно центра источника; $k_{ci}(\vec{r})$ — эффективный коэффициент ремиссии с поверхности подложки ЛВ i -го типа при воздействии излучения, с^{-1} ; $\chi_{ci}(\vec{r})$ — скорость химических реакций, к которым в рамках данной модели относится и хемосорбция, с участием ЛВ i -го типа на поверхности подложки, с^{-1} ; $\alpha_{sc}(\vec{r})$ — геометрический фактор, зависящий от взаимного расположения источника ЛВ и элемента поверхности подложки.

Суммарный вклад ЛВ i -го типа в массу продуктов газыделения, осаждённых на поверхности конденсации, можно определить из выражения

$$M_{ci}^{sum}(\vec{r}, t) = M_{ci}(\vec{r}, t) + \Delta_{ci}(\vec{r}, t),$$

где $\Delta_{ci}(\vec{r}, t)$ — масса ЛВ i -го типа, вступившего в химические реакции на поверхности подложки к моменту времени t , равна

$$\Delta_{ci}(\vec{r}, t, \chi_i) = \alpha_{cs}(\vec{r}) m_i S_0 \int_0^t \frac{df_i(\tau)}{d\tau} -$$

$$- M_{ci}(\vec{r}, t) - k_{ci}(\vec{r}) \int_0^t M_{ci}(\vec{r}, \tau) d\tau.$$

Общую массу вещества накопленного на единице поверхности подложки в окрестности точки \vec{r} , к моменту времени t , можно оценить с помощью выражения

$$\Delta_{total}(\vec{r}, t) = \sum_{i=1}^I \Delta_i(\vec{r}, t, \chi_i);$$

$$M_{c\ total}(\vec{r}, t) = \sum_{i=1}^I [M_{ci}(\vec{r}, t) + \Delta_i(\vec{r}, t, \chi_i)].$$

В качестве примера на рис. 6 приведены зависимости от времени основных величин, определяющих накопление ксилола ($\text{C}_6\text{H}_4(\text{CH}_3)_2$), являющегося компонентом растворителя при изготовлении ЭКОМ-1, на поверхностях исходной и облученной подложек. Значения функций $M_{ci}^{sum}(\vec{r}^*, t)$, $M_{ci}(\vec{r}^*, t)$, $\Delta_i(\vec{r}^*, t, \chi_i)$, рассчитанные на основе выше приведённой модели в окрестности точки \vec{r}^* приходящей на геометрический центр подложки, получены для двух случаев. В

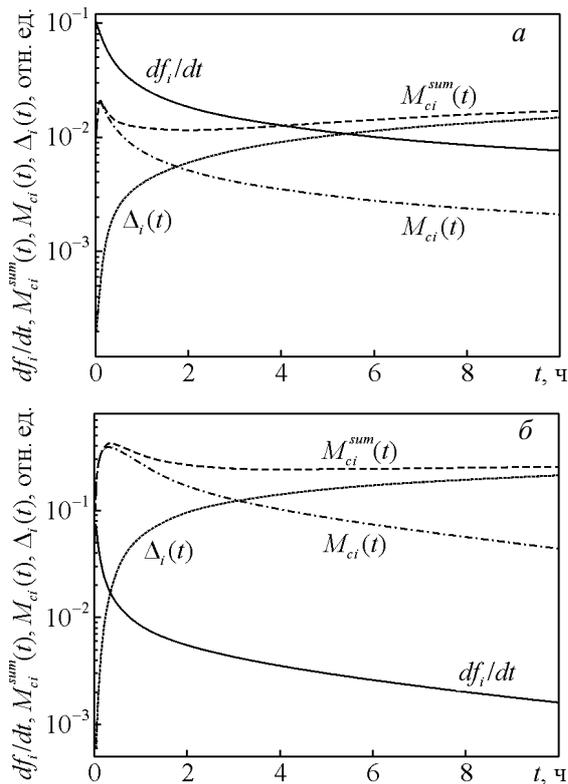


Рис. 6. Кинетика осаждения ЛВ i -го типа на поверхности образцов из первой (а) и пятой (б) групп.

первом случае МП поток (рис. 6а) падает на поверхность исходной подложки, а во втором, на поверхность облученной подложки (рис. 6б). Более быстрый рост функции $M_{ci}^{sum}(\bar{r}^*, t)$ во втором случае обусловлен снижением коэффициента ремиссии и увеличением скорости химических реакций с участием ЛВ на поверхности подложки. Отметим, что скорость газовыделения $df_i/dt(t)$ в обоих рассмотренных случаях одинакова, однако в случае облученной подложки значение $M_{ci}^{sum}(t)$ при $t=3$ ч превышает аналогичную величину, приведённую на рис. 6а, в 11 раз.

Анализ экспериментальных данных и результаты численного моделирования показали, что стимулированная облучением модификация поверхности стекла приводит к увеличению скорости адсорбции и хемосорбции и способствует росту органической плёнки на поверхностях подложек при попадании на них продуктов газовыделения.

Выводы

1. При облучении образцов стекла К-208 происходит модификация их поверхности за счёт радиационно-стимулированного отжига дефектов приповерхностного слоя и электростатических

разрядов. При этом наблюдается разряды двух типов. Разряды первого типа сопровождаются быстрыми фазовыми переходами материала из твёрдого состояния в жидкое, газообразное и плазменное и заканчиваются выбросом плазмы в окружающее пространство через микровыступы, высота которых растёт с числом разрядов за счёт накопления остывшего стекла. Разряды второго типа развиваются вдоль облучаемой поверхности стекла и начинают проявляться при плотности потока порядка $7,0 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, а при значениях плотности потока $10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ становятся преобладающими. Разряды обоих типов приводят к деструкции поверхности стекла и к снижению его коэффициента пропускания.

2. Предварительное облучение, приводящее к модификации поверхности образца, стимулирует осаждение на ней компонентов молекулярных потоков. Изменения спектров пропускания облучённых образцов после бомбардировки их молекулярными потоками свидетельствуют о том, что количество образующегося осадка зависит от степени радиационно-стимулированной модификации поверхности.

3. Результаты численного анализа позволяют объяснить полученные экспериментальные данные появлением на облученной электронами поверхности стекла дополнительных центров пленкообразования. С ростом плотности потока электронов количество таких центров увеличивается, что приводит к увеличению скорости адсорбции молекул и соответственно — к росту и слиянию островковых структур.

Литература

1. Бреховских С. М., Викторова Ю. Н., Ланда Л. М. Радиационные эффекты в стеклах. М.: Энергоиздат, 1982, 182 с.
2. Mackey I.H., Smith H.L., Halperin A. Optical studies in X-irradiated high purity sodium silicate glasses. J. Phys. Chem. Sol., 1996, v. 27, no. 11, p. 1759–1772.
3. Модель космоса. Под ред. Новикова Л.С. Выпуск 8. В 2-х томах. Т. 1. М.: Изд. МГУ, 2007, 872 с.
4. Fong M.C., Lee A.L., Ma P.T. External contamination environment of space station customer servicing facility. Lockheed Missiles Space Company, Inc. Sunnyvale, CAAIA 22nd Thermophysics Conference June 8 – 10, 1987. Honolulu, Hawaii, AAIA-87-1623.
5. Хасаншин Р.Х., Костюк В.И. Моделирование влияния электронного излучения на газовыделение материалов внешних покрытий космических аппаратов. Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2005, вып. 1 – 2, с. 15 – 19.
6. Хасаншин Р.Х., Костюк В.И., Александров Н.Г. К моделированию осаждения продуктов собственной

- внешней атмосферы на поверхностях высокоорбитального космического аппарата. Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, 2009, № 1, с. 28 – 32.
7. Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С. Изменения спектра пропускания стекла марки К-208 под действием ионизирующих излучений и молекулярных потоков. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2014, № 7, с. 83 – 87.
8. Хасаншин Р.Х., Надирадзе А.Б. Изменение оптических свойств функциональных поверхностей космических аппаратов при совместном воздействии электронов и ультрафиолета. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2013, № 3, с. 73 – 78.
9. Physics reference manual. Website: <<http://www.geant4.web.cern.ch/geant4/support/userdocuments.shtml>>.
10. Khassanchine R.H., Grigorevskiy A.V., Galygin A.N. Simulation of outgassing processes in spacecraft coatings induced by thermal vacuum influence. AIAA Journal of Spacecraft and Rockets, 2004, v. 41, no. 3, p. 384 – 388.
- from external coatings of spacecraft materials. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser.: Fizika radiatsionnogo vozdeystviya na radioelektronnyuyu apparaturu — Problems of atomic science and technology. Ser. Physics of irradiation effect on electronics*, 2005, iss. 1 – 2, pp. 15 – 19.
6. Khasanshin R.Kh., Kostyuk V.I., Aleksandrov N.G. K modelirovaniyu osazhdeniya produktov sobstvennoy vneshney atmosfery na poverkhnostyakh vysokoorbitalnogo kosmicheskogo apparata [Simulation of deposition of own external atmosphere product on surfaces of high orbital spacecraft]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser.: Fizika radiatsionnogo vozdeystviya na radioelektronnyuyu apparaturu — Problems of atomic science and technology. Ser. Physics of irradiation effect on electronics*, 2009, no. 1, pp. 28 – 32.
7. Khasanshin R.Kh., Novikov L.S. Izmeneniya spektra propuskaniya stekla marki K-208 pod deystviyem ioniziruyushchikh izlucheny i molekulyarnykh potokov [Changes of transmission spectrum of K-208 type glass under effect of ionizing irradiation and molecular flows. *Poverkhnost. Rentgenovskiyе, sinkhrotronnyе i neytronnyе issledovaniya — Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2014, no. 7, pp. 83 – 8.
8. Khasanshin R.Kh., Nadiradze A.B. Izmeneniye opticheskikh svoystv funktsionalnykh poverkhnostey kosmicheskikh apparatov pri sovmestnom vozdeystvii elektronov i ultrafioleta [Changes in optical properties of functional spacecraft surfaces under combined ultraviolet and electron effect]. *Poverkhnost. Rentgenovskiyе, sinkhrotronnyе i neytronnyе issledovaniya — Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2013, no. 3, pp. 73 – 78.
9. Physics reference manual. Website: <<http://www.geant4.web.cern.ch/geant4/support/userdocuments.shtml>>.
10. Khassanchine R.H., Grigorevskiy A.V., Galygin A.N. Simulation of outgassing processes in spacecraft coatings induced by thermal vacuum influence. AIAA Journal of Spacecraft and Rockets, 2004, vol. 41, no. 3, pp. 384 – 388.

References

Статья поступила в редакцию 16.05.2014 г.

Хасаншин Рашид Хусаинович — ОАО “Композит” (г. Королев, Московской обл.), начальник лаборатории, доцент, специалист в области моделирования процессов взаимодействия космических аппаратов с окружающей средой. E-mail: rhkhas@mail.ru.

Новиков Лев Симонович — НИИЯФ имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова (г. Москва), профессор, заведующий отделом, специалист в области космического материаловедения. E-mail: novikov@sinp.msu.ru

Effect of electron radiation on contamination of K-208 glass surface by high-molecular compounds

R. H. Khasanshin, L. S. Novikov

Effect of electron irradiation of K-208 type glass on process of deposition of thermo-stimulated gas emission products from polymeric composite was studied. The samples were irradiated in vacuum at the pressure of 10^{-4} Pa by 30 keV electrons with flux densities from 10^{10} to $2 \cdot 10^{11}$ $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Sample surfaces were studied by AFM methods. It was shown that formation of contamination films is significantly influenced by structural changes of surfaces caused by electrostatic discharges, which depend on irradiation flux density.

Key words: electron radiation, K-208 glass, electrostatic discharge, polymer composite materials, volatile products, deposition.

Khasanshin Rashid — JSC “Kompozit”, Korolev, Moscow region, Russia, associated professor, head of laboratory. E-mail: rhkhas@mail.ru

Novikov Lev — Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics Lomonosov Moscow State University, professor, DrSci (Phys.Math.), head of department. E-mail: novikov@sinp.msu.ru