

УДК 629.7.023.2:535.362

М.М. МИХАЙЛОВ, А.Н. ЛАПИН

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ МОДИФИЦИРОВАНИЯ МИКРОПОРОШКОВ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ НАНОПОРОШКАМИ Al_2O_3 НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И РАДИАЦИОННУЮ СТОЙКОСТЬ ПОКРЫТИЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ НА ИХ ОСНОВЕ

Изучено влияние температуры модифицирования нанопорошком Al_2O_3 в диапазоне 200–1000 °С на гранулометрический состав микропорошка оксида алюминия, на спектры диффузного отражения в области 360–2100 нм и интегральный коэффициент поглощения солнечного излучения и их изменение при облучении электронами покрытий, изготовленных на основе этих порошков. Установлено, что с увеличением температуры модифицирования уменьшается средний размер частиц порошков, ухудшается отрицательная способность и увеличивается радиационная стойкость покрытий.

Ключевые слова: наночастицы, порошки, модифицирование, радиационная стойкость, спектры отражения, покрытия.

Введение

Порошки Al_2O_3 широко применяются при изготовлении керамик, используемых в рентгеновских аппаратах, ускорителях заряженных частиц, ядерных реакторах, а также в качестве пигментов отражающих покрытий космических аппаратов. Их применение в этих областях техники обусловлено удовлетворительными электрическими, диэлектрическими и оптическими свойствами (большой шириной запрещенной зоны, достаточно хорошей отражательной способностью) и приемлемой радиационной стойкостью, повышение которой является актуальной задачей.

Фото- и радиационная стойкость оксидных порошков-пигментов может быть повышена модифицированием наночастицами, которые образуют на поверхности гранул слой, являющийся местом стоков электронных возбуждений, возникающих при облучении [1–4]. Однако модифицирование сопряжено с прогревом смеси микро- и нанопорошков, при котором происходит как осаждение наночастиц на поверхности гранул микроскопического размера (имеющее положительное влияние на радиационную стойкость), так и диффузия частиц нанопорошка в объем микрокристаллов с созданием дефектов внедрения и замещения вплоть до образования твердых растворов. Диффузия наночастиц в объем микропорошков может отрицательно сказаться на стабильности к действию излучений, поэтому модифицирование желательно осуществлять одноименными наночастицами. Кроме стабильности к облучению, модифицирование оказывает влияние и на оптические свойства до облучения, что также необходимо учитывать.

Ранее [5] проводили сравнительные исследования оптических свойств и радиационной стойкости порошков оксида алюминия микронных и наноразмеров, а также порошков микронных размеров, модифицированных нанопорошками. Цель настоящей работы – изучение влияния температуры прогрева при модифицировании нанопорошком Al_2O_3 микропорошка оксида алюминия на гранулометрический состав порошков, спектры диффузного отражения ρ_λ , интегральный коэффициент поглощения солнечного излучения и стабильность покрытий, изготовленных на основе этих порошков, к облучению ускоренными электронами.

Эксперимент

Объектом исследования была смесь, состоящая из 97 % микропорошка оксида алюминия квалификации Ч ТУ 6-09-426-75 и 3 % нанопорошка Al_2O_3 , полученного плазмохимическим способом [6]. Порошки перемешивали в магнитной мешалке, диспергировали в дистиллированной воде, выпаривали воду в печи при температуре 200 °С в течение 5 ч, затем смесь перетирали в керамической ступке. Смесь разделяли на 8 частей, каждую из которых прогревали в течение 2 ч при различной температуре от 200 до 1000 °С. После прогрева порошки повторно перетирали в керамической ступке.

Образцы для исследования получали путем смешивания порошков с лаком КО-859 в пропорции 3:1, нанесения пасты на алюминиевые подложки диаметром 18 мм и высушивания в течение

24 ч при комнатной температуре. Измерение спектров диффузного отражения в области 360–2100 нм осуществляли в установке «Спектр» [7] при температуре 300 К в вакууме 10^{-6} Торр на месте облучения образцов (*in situ*) электронами ($E = 30$ кэВ, $\Phi \leq 3 \cdot 10^{16}$ см $^{-2}$, $\varphi = 1 \cdot 10^{12}$ см $^{-2} \cdot$ с $^{-1}$).

Микрофотографии исследуемых покрытий получали на растровом электронном микроскопе ТМ-1000 с увеличением 3000. Значения размеров гранул усредняли по 300 измерениям.

Результаты и их обсуждение

Из функций распределения частиц по размерам (рис. 1), полученных по микрофотографиям исследуемых покрытий, следует, что размер частиц не превышает 60 мкм. С ростом температуры модифицирования от 200 до 900 °С максимум распределения смещается от 8,1 до 7,2 мкм, количество частиц в максимуме увеличивается от 60 до 100, средний размер частиц уменьшается от 21,3 до 11,9 мкм. Помимо основного максимума при температуре 200, 500 и 900 °С регистрируется максимум распределения в области размеров 30–35 мкм, а для температуры 800 °С – в области 20–25 мкм.

Таким образом, при увеличении температуры модифицирования от 200 до 900 °С средний размер частиц пигмента уменьшается почти в 2 раза, максимум распределения смещается в область меньших размеров.

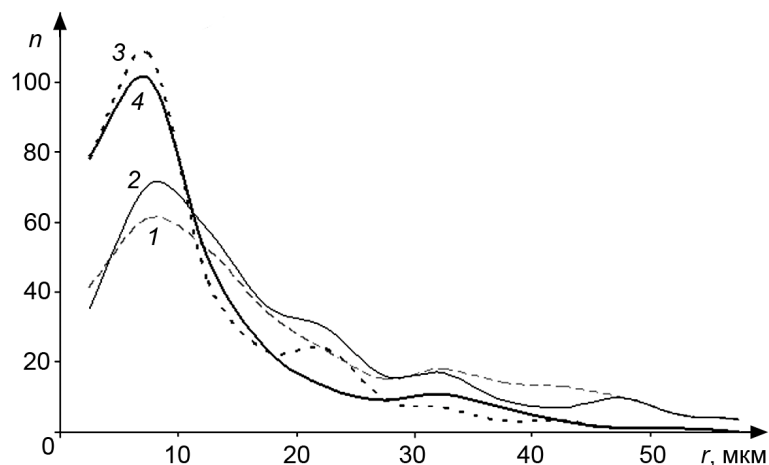


Рис. 1. Распределение частиц микропорошка Al_2O_3 , модифицированного нанопорошком оксида алюминия при температуре 200 (кр. 1), 500 (кр. 2), 800 (кр. 3) и 900 °С (кр. 4)

Из спектров диффузного отражения исследуемых покрытий (рис. 2) следует, что наибольшим коэффициентом отражения во всей спектральной области обладает покрытие, пигмент которого прогрет при минимальной температуре – 200 °С. Уменьшение коэффициента отражения покрытий, прогретых при более высокой температуре, составляет до 10 % в области от 360 до 1100 нм и до 5–7 % в области спектра 1100–2100 нм.

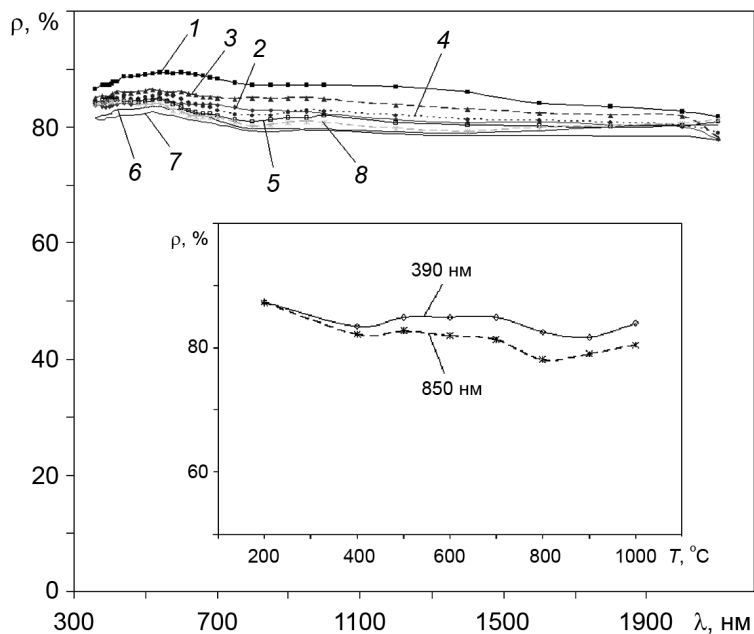


Рис. 2. Спектры диффузного отражения покрытий на основе модифицированного при различной температуре порошка оксида алюминия: 200 (кр. 1), 400 (кр. 2), 500 (кр. 3), 600 (кр. 4), 700 (кр. 5), 800 (кр. 6), 900 (кр. 7) и 1000 °С (кр. 8). На вставке приведена зависимость коэффициента отражения на длинах волн 390 и 850 нм от температуры модифицирования

Температурная зависимость коэффициента отражения показана на примере длин волн 390 и 850 нм (вставка рис. 2). Отражательная способность при увеличении температуры прогрева уменьшается. Минимальным коэффициентом отражения обладает покрытие, пигмент которого модифицирован при температуре 800 °С, при дальнейшем повышении температуры коэффициент диффузного отражения незначительно увеличивается (на 2–3 %).

Для выяснения влияния температуры модифицирования порошка оксида алюминия на процессы, происходящие на поверхности и в объеме порошков, анализировали разно-

стные спектры диффузного отражения $\Delta\rho_\lambda$, получаемые вычитанием спектров покрытий на основе порошков, модифицированных при температуре 800, 900 и 1000 °С из спектра покрытия на основе порошка, модифицированного при минимальной температуре 200 °С.

Спектры $\Delta\rho_\lambda$ показывают (рис. 3), что с увеличением температуры модифицирования порошков оксида алюминия от 200 до 800 (кривая 1), 900 (кривая 2) и 1000 °С (кривая 3) появляются дефекты, спектры поглощения которых в сумме дают бесструктурные контуры со слабо выраженными выступами. Эти контуры имеют максимумы в области 390–1100 нм. Наибольшие значения $\Delta\rho$ в области максимумов достигают 8 %.

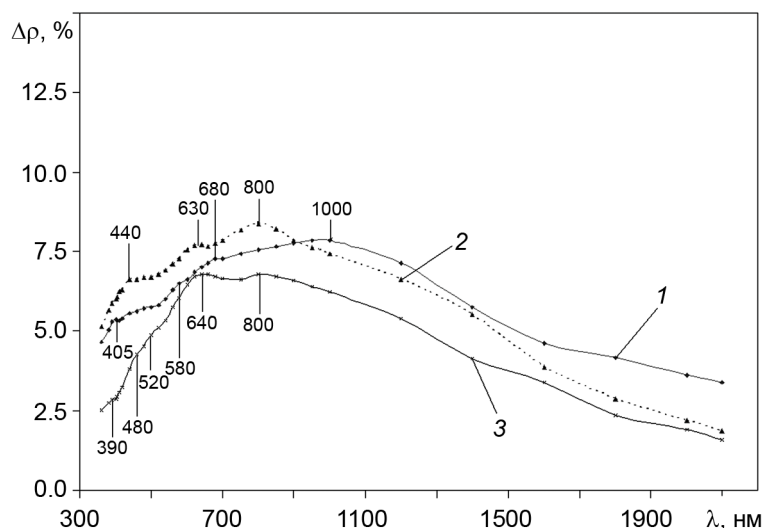


Рис. 3. Разностные спектры диффузного отражения (кр. 1–3), полученные вычитанием спектров (кр. 6–8) из спектра (кр. 1) (рис. 2) соответственно

щими вблизи 0,87, 0,64 и 0,55 эВ, молекулами кислорода, поглощающими в области 0,8–0,9 эВ, молекулами СО, поглощающими вблизи 0,64 эВ, и молекулами СО₂, поглощающими вблизи 0,51 эВ [1, 2, 4, 8, 9].

Принимая одинаковой энергию полос поглощения хемосорбированных газов на поверхности ZnO и Al₂O₃, получаем, что наведенное поглощение в ближней ИК-области может быть обусловлено ОН-группами, молекулами кислорода, СО и СО₂. Прогрев порошков приводит к увеличению их концентрации за счет десорбции, например, молекул органических веществ.

Поглощение в УФ и видимой областях спектра может быть обусловлено собственными точечными дефектами решетки Al₂O₃. Такими дефектами, концентрация которых увеличивается при прогреве порошка для модифицирования наночастицами, могут быть не только междоузельные ионы и атомы алюминия в различном зарядовом состоянии (Al_i^{3+} , Al_i^{2+} , Al_i^{+} , Al_i^0), что является объяснимым и наиболее вероятным фактом, но и F^- - и $F^{\cdot-}$ -центры [10–18]. Образование F^- - и $F^{\cdot-}$ -центров возможно после прогрева порошков в процессах захвата свободных электронов анионными вакансиями. Эти вакансии и свободные электроны появляются в результате десорбционных процессов, происходящих при прогреве порошков.

До прогрева эти вакансии соединены в комплексы с различными хемосорбированными газами. При прогреве их связи разрываются, вакансии захватывают освобожденные прогревом электроны и образуются F^- - и $F^{\cdot-}$ -центры на поверхности кристаллической решетки. При этом более вероятным представляется образование F^- -центров по сравнению с $F^{\cdot-}$ -центрами окраски, так как в условиях прогрева в атмосфере более вероятным является существование анионных вакансий в нейтральном электрическом состоянии, т.е. с двумя захваченными электронами.

Несмотря на то, что прогрев осуществляли на воздухе при высокой температуре с большой вероятностью насыщения кристаллической решетки кислородом, существующие на поверхности до прогрева анионные вакансии не заполняются кислородом, а превращаются в F^- - и $F^{\cdot-}$ -центры окраски. Концентрация таких «освобожденных» от связей с различными газовыми молекулами вакансий с увеличением температуры прогрева от 200 до 900 °С увеличивается.

Таким образом, прогрев микропорошков оксида алюминия от 200 до 800 °С при модифицировании их нанопорошками оксида алюминия приводит к уменьшению коэффициента диффузного

Максимумы смещаются с изменением температуры модифицирования.

Такая сложная форма спектров свидетельствует о существовании нескольких полос поглощения, обусловленных различными центрами поглощения, и об изменении соотношения интенсивности этих полос с изменением температуры прогрева порошков при модифицировании.

Известно [1, 2, 4], что в ближней ИК-области регистрируются полосы поглощения, обусловленные хемосорбированными газами, для всех типов порошков: микро- и нанопорошков Al₂O₃ и ZrO₂, а также порошков ZnO. Эти полосы определяются ОН-группами, поглощающими

отражения за счет хемосорбции ОН-групп, молекул кислорода, СО и CO_2 и образования F^- и F^+ -центров окраски, а также междоузельных ионов алюминия, имеющих полосы поглощения практически во всей спектральной области от 360 до 2100 нм. Перекрытие этих полос дает монотонный слабо разрешаемый интегральный контур поглощения. Повышение температуры прогрева до 900 °С приводит к увеличению интенсивности полос поглощения в области 360–1000 нм и к уменьшению интенсивности полос поглощения в области 1000–2100 нм. Дальнейшее повышение температуры прогрева до 1000 °С приводит к уменьшению интенсивности полос поглощения во всей спектральной области от 360 до 2100 нм.

После облучения покрытий электронами коэффициент диффузного отражения уменьшается в основном в области до 360–700 нм. В разностных спектрах диффузного отражения, полученных вычитанием спектров отражения облученных покрытий из соответствующих спектров до облучения (рис. 4), регистрируется явно выраженная полоса в области 360–900 нм с максимумом при 390 нм. На её длинноволновом крыле видны слабовыраженные максимумы при 600 и 660 нм. Наибольшее изменение коэффициента отражения происходит в области от 360 до 700 нм (до 50 % для покрытия с пигментом, прогретым при 200 °С).

В области свыше 700 нм коэффициент отражения для всех видов покрытий изменяется незначительно (до 5–7 %), а в области 1100–2100 нм он или уменьшается, или увеличивается на уровне не более 2–3 %.

Несимметричная форма полосы поглощения при 390 нм и наличие отдельных максимумов указывают на её неэлементарный характер. Форма полос поглощения покрытий на основе пигментов, модифицированных при различной температуре, не отличается, что может свидетельствовать об одинаковом количестве и соотношении интенсивностей элементарных полос, определяющих интегральные контуры. Такими собственными дефектами кристаллической решетки могут быть вакансии кислорода и алюминия, междоузельные катионы и анионы в различном зарядовом состоянии с энергией ионизации и возбуждения, определяющей соответствующие полосы поглощения.

Анализ литературных данных позволяет сделать предположение о том, что зарегистрированный максимум при 390 нм (3,18 эВ) может соответствовать F^+ -центрам кубической решетки Al_2O_3 , присущей как микро-, так и нанопорошку. В более длинноволновой области, по сравнению с этой полосой, по аналогии с другими соединениями, могут быть расположены полосы, обусловленные более сложными центрами поглощения анионной подрешетки.

Отличие спектров наведенного поглощения покрытий на основе порошка, модифицированного при температуре 200 °С, от спектров наведенного поглощения покрытий на основе порошков, модифицированных при температуре 800, 900 и 1000 °С после облучения флюенсом электронов $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, показано на рис 5.

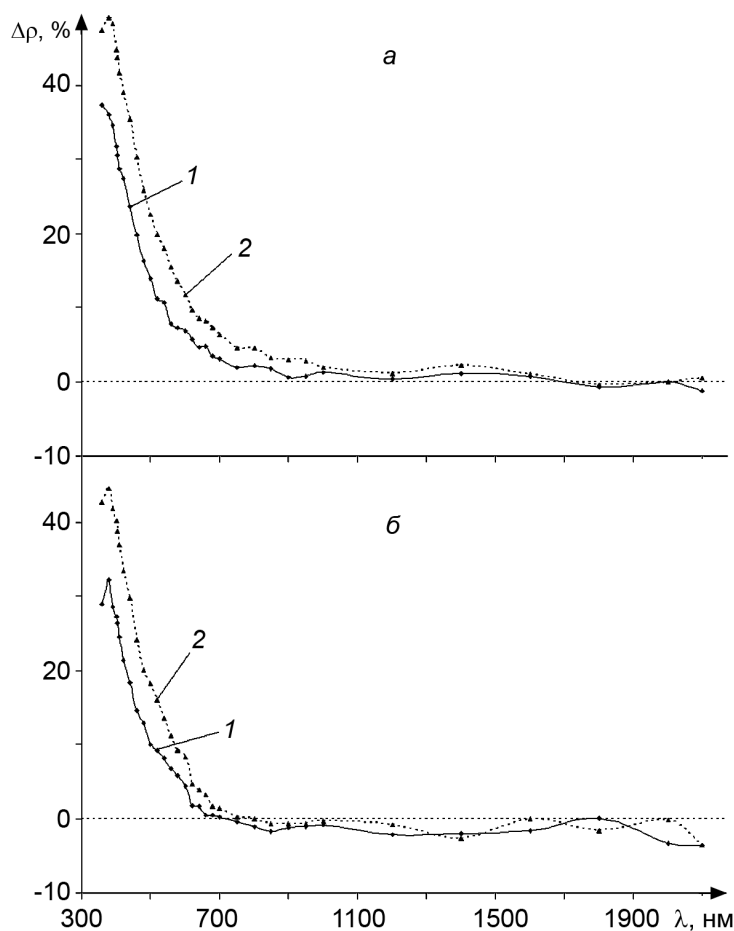


Рис. 4. Разностные спектры диффузного отражения покрытий на основе модифицированных микропорошков оксида алюминия, прогретых при температуре 200 (а) и 900 °С (б) после облучения электронами с энергией 30 кэВ флюенсом $\times 10^{16} \text{ см}^{-2}$: 0,5 (кр. 1) и 1 (кр. 2)

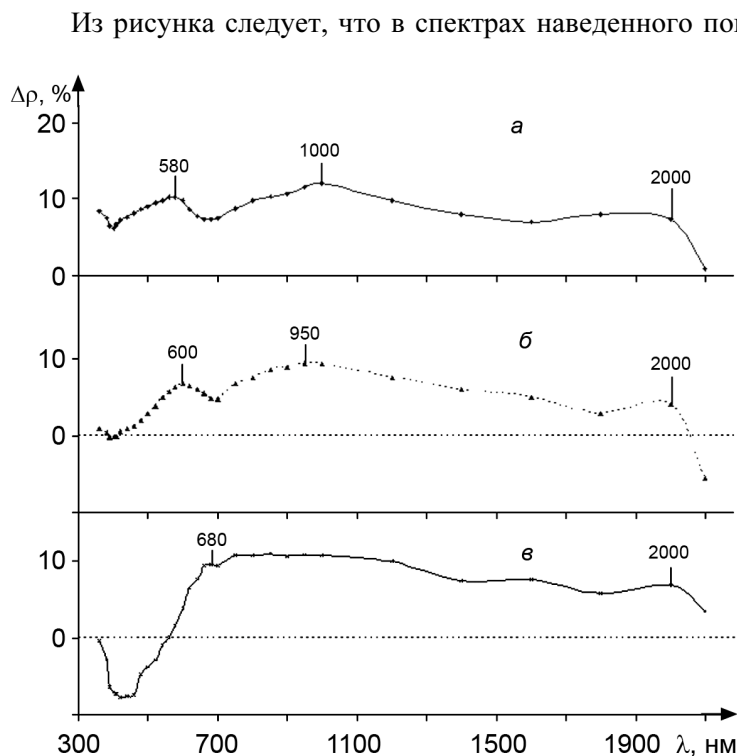


Рис. 5. Разностные спектры диффузного отражения, полученные вычитанием спектров покрытий на основе пигментов, модифицированных при температуре 800 (а), 900 (б) и 1000 °С (в) из спектра покрытия на основе пигмента, модифицированного при температуре 200 °С после облучения флюенсом электронов $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ с энергией 30 кэВ

Из рисунка следует, что в спектрах наведенного поглощения покрытий на основе пигмента, модифицированного при температуре 200 °С, большее поглощение происходит в видимой и ближней ИК-области спектра по сравнению с покрытиями, модифицированными при температуре 800, 900 и 1000 °С. В контурах поглощения проявляются максимумы в видимой области при 580, 600 и 680 нм и в ближней ИК-области при 950, 1000 и 2000 нм.

Интегральный коэффициент поглощения солнечного излучения (a_s) покрытий является среднеарифметической величиной, характеризующей весь спектр диффузного отражения по отношению к спектру излучения солнца. Расчёты значений a_s по спектрам диффузного отражения с применением методики [19] до и после облучения ускоренными электронами показывают (табл. 1), что до облучения он не превышает 0,2, что позволяет отнести исследуемые покрытия к классу «солнечные отражатели». При увеличении температуры модифицирования пигментов от 200 до 900 °С интегральный коэффициент поглощения покрытий увеличивается от 0,126

до 0,192, т.е. на 52 %. Повышение температуры до 1000 °С приводит к незначительному его уменьшению.

Таблица 1

Зависимость интегрального коэффициента поглощения покрытий от температуры модифицирования пигмента оксида алюминия до и после облучения электронами с энергией 30 кэВ

Флюенс электронов, см^{-2}		Температура модифицирования пигмента, °С							
		200	400	500	600	700	800	900	1000
0	a_s	0,126	0,157	0,154	0,168	0,173	0,190	0,192	0,189
	Δa_s	0,079	0,085	0,075	0,074	0,073	0,071	0,058	0,056
$5 \cdot 10^{15}$	a_s	0,205	0,242	0,229	0,242	0,261	0,261	0,250	0,245
	Δa_s	0,079	0,085	0,075	0,074	0,073	0,071	0,058	0,056
$1 \cdot 10^{16}$	a_s	0,252	0,279	0,266	0,278	0,282	0,296	0,284	0,284
	Δa_s	0,126	0,122	0,112	0,110	0,109	0,106	0,092	0,095

После облучения a_s всех покрытий увеличивается. С ростом флюенса электронов от $5 \cdot 10^{15}$ до $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ деградация оптических свойств усиливается. Наибольшие изменения присущи покрытию, пигмент которого модифицирован при температуре 200 °С. С ростом температуры модифицирования радиационная стойкость повышается. Увеличение радиационной стойкости покрытия, пигмент которого модифицирован при температуре 900 °С, по сравнению с покрытием, пигмент которого модифицирован при 200 °С, составляет 27 %.

Для расчета изменений интегрального коэффициента поглощения при длительном времени облучения использовали модели деградации [20]. Расчеты показали, что наиболее близко экспериментальные результаты описываются моделью, включающей две составляющие:

$$a_s(t) = k_1 \left(1 - e^{-[k_2 \cdot t]^{k_3}}\right) + k_4 \left(1 - e^{-k_5 \cdot t}\right).$$

Коэффициенты модели k_2 , k_4 и k_5 одинаковы для покрытий на основе пигментов, модифицированных при температуре 200 и 900 °С (табл. 2). Отличие кинетики определяется коэффициентами k_1 и k_3 , сумма которых даёт предельное изменение интегрального коэффициента поглощения, составляющее 0,48 и 0,33 для покрытий на основе пигментов, модифицированных при температурах 200 и 900 °С соответственно.

Первая составляющая модели определяет потемнение покрытий в начале облучения, т.е. характеризует процессы деградации за счет дефектов на поверхности, превращающиеся в центры поглощения при малом времени действия электронов. Вторая составляющая характеризует процессы радиационного дефектообразования в объеме порошков, она дает основной вклад в кинетическую кривую при длительном облучении.

Примечательным является то, что отличие вклада поверхностных процессов в общую деградацию значительно меньше ($0,16 - 0,12 = 0,04$) отличия вклада процессов деградации в объеме ($0,32 - 0,21 = 0,11$) между покрытиями на основе порошков, модифицированных при температурах 200 и 900 °С.

Результаты расчетов по приведенной модели показывают (рис. 6), что с увеличением времени облучения разность значений Δa_s покрытий на основе порошков, модифицированных при температурах 200 и 900 °С, увеличивается.

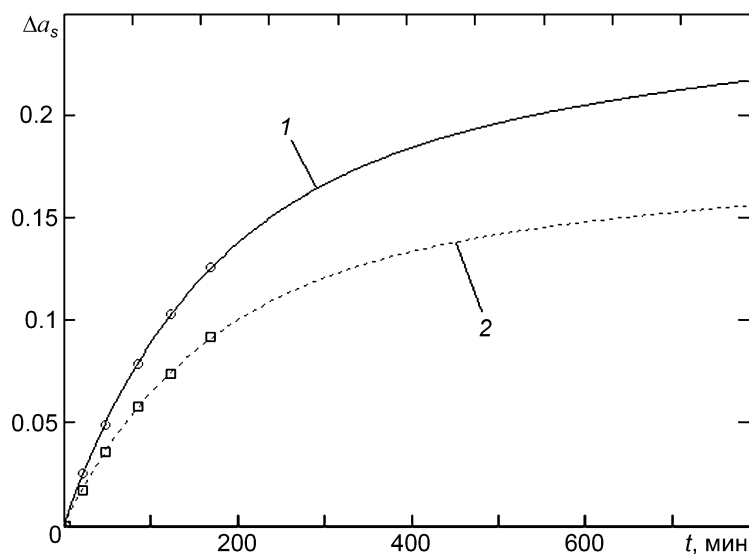


Рис. 6. Зависимость изменений интегрального коэффициента поглощения после облучения электронами ($E = 30$ кэВ, $\varphi = 1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, $T = 300$ К) покрытий на основе порошков оксида алюминия, модифицированного нанопорошками прогревом при температурах 200 (кр. 1) и 900 °С (кр. 2)

Для максимального расчетного значения флюенса $4,8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ время действия электронов составит 184 сут.

Таким образом, эффективность повышения радиационной стойкости при повышении температуры модифицирования микропорошков оксида алюминия одноименными нанопорошками от 200 до 900 °С для времени пребывания покрытий на основе таких порошков на геостационарной орбите в течение примерно полугода составляет $\beta_{\phi} = (0,22 - 0,154) \cdot 100 \% / 0,22 = 30 \%$. Аналогичные расчеты для времени пребывания покрытий на этой орбите в течение 15 лет дают значение эффективности 32 %.

Увеличение интегрального коэффициента поглощения при увеличении температуры прогрева при модифицировании микропорошка оксида алюминия от 200 до 900 °С составляет от 0,126 до 0,189 (табл. 1), что дает $\beta_0 = (0,189 - 0,126) \cdot 100 \% / 0,189 = 33 \%$.

Таблица 2
Значения коэффициентов модели для покрытий на основе пигментов, модифицированных при температуре 200 и 900 °С

Температура прогрева, °С	Значения коэффициентов				
	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5
200	0,16	9,95	0,32	0,209	0,679
900	0,12	9,92	0,21	0,209	0,679

Для максимального расчетного времени облучения, равного 800 мин при плотности потока электронов $1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, значения изменений интегрального коэффициента поглощения Δa_s составляют 0,155 и 0,22 для покрытий на основе порошков оксида алюминия, модифицированных при температурах 900 и 200 °С соответственно. Это время облучения при плотности потока электронов соответствует флюенсу электронов $4,8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$.

Если принять, что электроны с энергией 30 кэВ имитируют действие всего спектра электронов, например, на геостационарной орбите, то эквивалентная плотность потока для данной орбиты, согласно имеющимся расчетно-экспериментальным данным, для других подобных покрытий будет примерно равна $3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ [16]. Для полу-

Заключение

Выполненные исследования показали, что с ростом температуры прогрева пигмента на основе модифицированного оксида алюминия коэффициент отражения покрытий, получаемых на его основе, уменьшается. Это приводит к увеличению интегрального коэффициента поглощения от 0,126 до 0,189. Повышение радиационной стойкости покрытий на основе таких порошков при повышении температуры их модифицирования от 200 до 900 °С составляет 32 % в случае действия электронов с энергией 30 кэВ, имитирующих действие всего спектра электронов на геостационарной орбите в течение 15 лет.

В первом приближении напрашивается вывод о не очень большом положительном эффекте от введения нанопорошков в микропорошки оксида алюминия. Если использовать такие порошки в качестве пигментов для терморегулирующих покрытий, то повышение радиационной стойкости аннулируется ухудшением отражательной способности при модифицировании по сравнению с исходным состоянием.

На самом деле ситуации более сложная, чем может представляться при сравнении только этих показателей. При конструировании систем пассивного терморегулирования космических аппаратов большое значение имеют обе величины: интегральный коэффициент поглощения в начале полета и его изменение через определенный период полета. Если увеличение этого коэффициента в процессе конструирования может быть компенсировано увеличением площади радиатора терморегулирования, то увеличение коэффициента поглощения в процессе полета не компенсируется, что приводит к повышению температуры космического аппарата.

Поэтому повышение температуры модифицирования микропорошков оксида алюминия нанопорошками до 900 °С является необходимым условием повышения радиационной стойкости покрытий, изготовленных на их основе, и может быть рекомендовано в качестве способа получения пигментов для терморегулирующих покрытий космических аппаратов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайлов М.М., Нещименко В.В. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2009. – № 8. – С. 88.
2. Михайлов М.М., Нещименко В.В., Ли Чундун, Дедов Н.В. // Там же. – 2009. – № 9. – С. 105.
3. Михайлов М.М., Соколовский А.Н. // Изв. вузов. Физика. – 2007. – № 7. – С. 90.
4. Михайлов М.М., Лапин А.Н., Андриец С.П., Дедов Н.В. // Там же. – 2009. – № 10. – С. 32.
5. Веревкин А.С. Исследование оптических свойств, фото- и радиационной стойкости порошков диоксида циркония и терморегулирующих покрытий, изготовленных на их основе: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Томск: ТУСУР, 2004. – 17 с.
6. Ларин В.К., Кондаков В.М., Дедов Н.В. // Изв. вузов. Цветная металлургия. – 2003. – № 5. – С. 59–64.
7. Косицын Л.Г., Михайлов М.М., Дворецкий М.И. и др. // ПТЭ. – 1985. – № 4. – С. 176–180.
8. Михайлов М.М., Дворецкий М.И. // Изв. вузов. Физика. – 1988. – № 7. – С. 86–90.
9. Blanco M., Coello J., Ityriaga H., et al. // Analyst. – 1998. – V. 124. – P. 135–150.
10. Кортов В.С., Мильман И.И., Никифоров С.С. // ФТТ. – 2003. – Т. 45. – Вып. 7. – С. 1202–1207.
11. Кортов В.С., Ермаков А.Е., Зацепин А.Ф. // Там же. – 2008. – Т. 50. – Вып. 5. – С. 916–920.
12. Кортов В.С., Ермаков А.Е., Зацепин А.Ф. // Материалы Второй Всерос. конф. по наноматериалам «Нано-2007». Новосибирск, 13–16 марта 2007 г. – Новосибирск, 2007. – С. 177.
13. Kristianpoller N., Rehani A., et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. – 1998. – V. 141. – P. 343–346.
14. Arnold G.W. and Compton W.D. // Phys. Rev. Lett. – 1960. – V. 4. – P. 66–69.
15. Kotomin E.A. and Popov A.I. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. – 1998. – V. 141. – P. 1–15.
16. Lee K.H. and Crawford J.H. // Phys. Rev. B. – 1979. – V. 19. – P. 3217–3221.
17. Levy P. Color // Phys. Rev. – 1961. – V. 123. – P. 1226–1230.
18. Aluker E.D., Gavrilov V.V., et al. // Phys. Status Solidi B. – 1992. – V. 171. – No. 1. – P. 283–288.
19. Johnson F.S. // J. Meteorological. – 1954. – V. 11. – No. 6. – P. 431–439.
20. Mikhailov M.M. and Krutikov V.N. // J. Adv. Mater. – 1996. – No. 3. – P. 106–113.

Томский государственный университет систем управления
и радиоэлектроники, г. Томск, Россия
E-mail: membrana2010@mail.ru

Поступила в редакцию 27.11.09.