

горитмически заданным ограничениям на атрибуты. Сформированное базовое множество с заданным набором атрибутов позволяет применять методы многоатрибутивного принятия решений при решении задачи выбора лучшего варианта структуры АСУ ЛА. Проведены исследования методов многоатрибутивного принятия решений с целью их использования в оптимизационно-имитационной процедуре выбора структуры АСУ ЛА. Разработан алгоритм метода многоатрибутивного принятия решений на базе процедуры TOPSIS, обеспечивающий решение задачи выбора лучшего варианта построения пунктов управления АСУ ЛА. Программно реализована система поддержки принятия решений, показавшая на модельном примере эффективность оптимизационно-имитационного подхода к формированию структуры АСУ ЛА.

Библиографический список

1. Цвиркун, А. Д. Имитационное моделирование в задачах синтеза структуры сложных систем (оптимизационно-имитационный подход) / А. Д. Цвиркун, В. К. Акинфиев, В. А. Филиппов. М.: Наука, 1985.
2. Тюпкин, М. В. Проблема синтеза структуры АСУ летательными аппаратами / М. В. Тюпкин, Р. Ю. Царев // Фундаментальные исследования. 2007. № 8. С. 36–38.
3. Ковалев, И. В. Оптимизационно-имитационный подход к синтезу автоматизированных систем управления / И. В. Ковалев, М. В. Тюпкин, Р. Ю. Царев, Ю. Д. Цветков // Программные продукты и системы. 2007. № 3. С. 73–74.
4. Пронин, Е. Г. Проектирование бортовых систем обмена информацией / Е. Г. Пронин, О. В. Могуева. М.: Радио и связь, 1989.
5. Вязгин, В. А. Математические методы автоматизированного проектирования / В. А. Вязгин, В. В. Федоров. М.: Высш. шк., 1989.
6. Ковалев, И. В. Формирование оптимальных по составу информационно-управляющих систем / И. В. Ковалев, Р. Ю. Царев, Ю. Д. Цветков, М. В. Тюпкин // Программные продукты и системы. 2007. № 4. С. 48–50.
7. Система анализа структуры информационного обеспечения распределенных систем обработки данных (программная система «Iware Analysis ver. 1.0») / И. В. Ковалев и др. М., 2007. Деп. в ВНИИЦ, № 50200701711.
8. Система имитационного моделирования телекоммуникационных систем реального времени (Программная система «AirCalc ver. 1.0») И. В. Ковалев и др. М., 2008. Деп. в ВНИИЦ, № 50200701805.

I. V. Kovalev, Ju. A. Nurgaleeva, S. N. Gritsenko, A. V. Usachev

PRELIMINARIES TO CHOOSING AN AUTOMATED CONTROL SYSTEM STRUCTURE OF AIRCRAFTS

The problem statement, steps and formation procedures of the automated control system structure of aircraft are considered. The rational variant of the system structure using optimization and simulation models is selected.

Keywords: control system, aircraft, structure, variant choosing.

© Ковалев И. В., Нургалеева Ю. А., Грищенко С. Н., Усачев А. В., 2009

УДК 629.78.002.3

В. И. Халиманович, В. А. Харламов, Р. А. Ермолаев, А. Е. Михеев, А. В. Гирн

ИСПЫТАНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ ОБРАЗЦОВ ТЕРМОРЕГУЛИРУЮЩИХ ПОКРЫТИЙ УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Проведены исследования терморегулирующих покрытий углепластиковых элементов конструкций космических аппаратов, полученных ионно-плазменным напылением. Выявлены режимы получения покрытий, которые удовлетворяют требованиям по терморадикационным характеристикам.

Ключевые слова: космический аппарат, терморегулирующие покрытия, ионно-плазменное напыление.

В процессе эксплуатации космический аппарат (КА) периодически и неравномерно освещается Солнцем, подвергается воздействию потоков заряженных частиц. Происходит неравномерный нагрев и электростатическое заряджение поверхностей КА. Неравномерный нагрев при-

водит к искажению формы конструкций из углепластика, имеющего анизотропные коэффициенты теплового расширения и теплопроводность. Это может приводить к ухудшению коэффициента усиления и диаграмм направленности антенных систем и ухудшению ориентации сол-

нечных батарей (БС) на Солнце и снижению их мощности. Электрические разряды, возникающие из-за воздействия заряженных частиц, вызывают помехи и сбои бортовой аппаратуры и деградацию бортовых систем. Для предотвращения указанных негативных явлений необходимо обеспечить терморегулирование антенн, каркасов БС, бортовых систем и защиту их от электризации.

Важную часть систем терморегулирования объектов космической техники составляют терморегулирующие покрытия (ТРП) и экранно-вакуумная теплоизоляция (ЭВТИ), которые покрывают все внешние поверхности КА. ЭВТИ и ТРП устанавливают баланс между выделением тепла внутри КА, энергией, поглощаемой из космоса (от солнечного излучения), и энергией, излучаемой в космическое пространство.

Терморегулирующие покрытия характеризуются терморadiационными характеристиками: коэффициентом поглощения солнечного излучения A_s и коэффициентом излучения (степенью черноты) E_n . Отношением A_s/E_n определяется равновесная температура тела при радиационном теплообмене (чем больше это отношение, тем выше равновесная температура) [1].

Под действием различных факторов космического пространства (особенно ионизирующего излучения) наблюдается увеличение коэффициента поглощения A_s , что приводит к повышению температуры бортовых систем КА и снижению сроков его активного существования. Поэтому создание ТРП классов «солнечные отражатели» и «истинные отражатели», обладающих стабильными терморadiационными характеристиками и одновременно антистатическими свойствами при длительной эксплуатации в космосе, с низким газовыделением является одной из важных задач космонавтики XXI в. Разработка таких покрытий позволит снизить до минимума отклонения от заданного теплового режима, уменьшить сбои в работе и отказы высокочувствительной оптической и радиоэлектронной аппаратуры, что даст возможность увеличить технический ресурс КА до 15 лет и более. Для достижения требуемой равновесной температуры данных конструкций коэффициент E_n должен быть от 0,2 до 0,4 при отношении $A_s/E_n \leq 1$. Поверхностное электрическое сопротивление покрытий должно быть не более 10^5 кОм/кв.драт.

В процессе выполнения исследований по разработке терморегулирующих покрытий для углепластиковых эле-

ментов каркасов БС был проведен выбор материалов и методов нанесения терморегулирующих покрытий.

Для проведения необходимого объема испытаний ТРП специалистами ОАО «ИСС» и СибГАУ были изготовлены образцы терморегулирующих покрытий, включающих подслоу лака, отражающий слой алюминия, и теплоизлучающий электропроводный слой на основе оксидов алюминия и циркония. Нанесение покрытий проведено ионно-плазменным магнетронным напылением. Такая технология выбрана в связи с известными преимуществами ионно-плазменных технологий перед традиционными методами термического испарения: высокой однородностью и адгезионной прочностью покрытий, возможностью нанесения слоев из тугоплавких соединений, оксидных полупроводников и др. [2].

Определение физико-технических характеристик образцов проводилось в ОАО «ИСС» следующим образом:

- толщину напыленных слоев алюминия и оксидов определяли на стеклянных образцах-свидетелях на микроинтерферометре МИИ-4;
- адгезионную прочность покрытий определяли методом отрыва приклеенных штоков;
- терморadiационные характеристики образцов A_s , E_n были измерены фотометром ФМ-59 и терморadiометром ТРМ-И;
- поверхностное электрическое сопротивление покрытий измеряли двухзондовым методом с помощью тераомметра Е6-13А;
- массу образцов покрытий измеряли на весах ВЛАО-20 г.

Основные характеристики изготовленных образцов приведены в табл. 1.

Масса всех изготовленных схем ТРП составляет не более 50 г/м². Как показывают данные (табл. 1), наиболее близки к предъявляемым требованиям образцы покрытий № 5, 7, 10, 11.

Для окончательного выбора схемы покрытия и корректировки технологических режимов было проведено исследование стабильности основных характеристик изготовленных образцов ТРП под воздействием факторов хранения и эксплуатации. Исследование было разделено на два этапа:

- экспрессные испытания для оценки соответствия выбранных схем покрытий техническим требованиям и корректировки технологических режимов;

Таблица 1

Характеристики покрытий на экспериментальных образцах

Номер образца	Материал подложки	Состав покрытия	Толщина слоя оксида, мкм	Адгезионная прочность, кг/см ²	Терморadiационный коэффициент		A_s/E_n	Удельное электр. сопротивление кОм/кв.драт
					A_s	E_n		
2	КМУ-4Л	Al-ZnO	0,6–0,8	75	0,38	0,19	2	$\sim 10^{-2}$
3	КМУ-4Л	Al-MoO ₃	0,4–0,6	70	0,29	0,14	2	$\sim 10^{-2}$
5	КМУ-4Л	Al-Al ₂ O ₃	0,8–1,0	60	0,24	0,22	1,1	$1 \cdot 10^5$
6	КМУ-4Л	Al-Al ₂ O ₃	0,5–0,7	65	0,22	0,18	1,2	$6 \cdot 10^4$
7	КМУ-4Л	Al-ZrO ₂	0,4–0,6	65	0,19	0,18	1	$3 \cdot 10^3$
8	КМУ-4Л	Al-ZrO ₂	1,2	65	0,24	0,25	1,0	$\sim 10^7$
10	КМУ-4Л	Al-ZrO ₂	1,5	65	0,20	0,28	0,7	$2 \cdot 10^6$
11	КМУ-4Л	Al-Al ₂ O ₃ -ZrO ₂	0,5; 0,5	70	0,27	0,21	1,3	$1,1 \cdot 10^5$

– контрольные испытания для определения стабильности характеристик ТРП в условиях воздействия факторов хранения и эксплуатации.

Ускоренные климатические испытания (УКИ) образцов покрытий проводили при влажности до 98 % и температуре до +70 °С.

Испытания на воздействие циклического изменения температуры в вакууме (термоциклирование (ТЦ)) проводили в вакуумной камере, при остаточном давлении $P < 5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. Нагрев термостолы с образцами осуществляли лампами типа КГ-127-1000, а охлаждение – жидким азотом. Количество циклов – 10 при экспресс-испытаниях и 50 – при контрольных. Диапазон температур от –150 до 150 °С.

Все полученные образцы прошли экспресс-испытания, результаты которых приведены в табл. 2. Данные показывают (табл. 2), что экспериментальные образцы покрытий № 5, 8 и 10 удовлетворяют предъявляемым тре-

бованиям по терморadiационным характеристикам и адгезионной прочности.

Характеристики опытных образцов терморегулирующих покрытий на углепластике и результаты контрольных испытаний приведены в табл. 3 и 4.

Относительное изменение коэффициента A_s образцов в процессе испытаний (средние значения) представлено на рисунке.

В результате УКИ наблюдается снижение коэффициента A_s на 2–8,5 % относительно исходного значения, далее, после ТЦ, изменение коэффициента A_s составляет от 0 до 2 %. Такое поведение покрытия может быть объяснено дефицитом кислорода в слое MeO при изготовлении и доокислением покрытия в процессе УКИ.

Из результатов испытаний следует, что по терморadiационным коэффициентам и адгезионной прочности достаточно близки или удовлетворяют техническим требованиям все испытанные варианты покрытий опытных

Таблица 2

Результаты экспресс-испытаний экспериментальных образцов покрытий

№ образца	Покрытие	Воздействие УКИ					ТЦ			
		A_s		E_n		A_s/E_n	A_s	E_n	A_s/E_n	Адгезия, кг/см ²
		до	после	до	после	после	после			
2	Al-ZnO	0,38	0,41	0,19	0,40	1,0	0,48	0,40	1,2	60
3	Al-MoO ₃	0,29	0,42	0,14	0,28	1,5	0,43	0,30	1,4	60
5	Al-Al ₂ O ₃	0,24	0,21	0,22	0,22	1,0	0,22	0,22	1,0	70
6		0,22	0,20	0,18	0,18	1,1	0,20	0,19	1,1	60
7	Al-ZrO ₂	0,19	0,21	0,18	0,19	1,1	0,21	0,19	1,1	65
8		0,24	0,22	0,25	0,25	0,9	0,22	0,25	0,9	65
10		0,20	0,19	0,28	0,28	0,7	0,19	0,28	0,7	60
11	Al-Al ₂ O ₃ -ZrO ₂	0,27	0,25	0,21	0,22	1,1	0,25	0,23	1,1	70

Таблица 3

Исходные характеристики и результаты УКИ опытных образцов ТРП

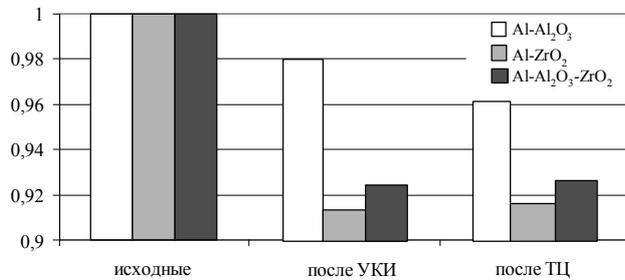
№ образца	Покрытие	A_s		E_n		A_s/E_n	Адгез. прочность, кг/см ²		Удельное электр. сопротивление, кОм/квдрат	
		до	после	до	после		до	после	до	после
22	Al-Al ₂ O ₃	0,20	0,20	0,21	0,21	1,0	65	60	$0,7 \cdot 10^5$	$0,9 \cdot 10^5$
23		0,26	0,25	0,40	0,40	0,6	65	65	$\sim 10^9$	$\sim 10^9$
35	Al-ZrO ₂	0,22	0,20	0,19	0,21	1,2	70	70	$6 \cdot 10^3$	$7 \cdot 10^3$
36		0,21	0,20	0,25	0,26	0,8	65	65	$7 \cdot 10^4$	$9 \cdot 10^4$
37		0,26	0,23	0,31	0,30	0,8	65	65	$\sim 10^7$	$\sim 10^7$
38		0,35	0,32	0,39	0,40	0,9	60	60	$1,1 \cdot 10^5$	$\sim 10^7$
42	Al-Al ₂ O ₃ -ZrO ₂	0,27	0,25	0,24	0,24	1,1	75	70	$8 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^5$

Таблица 4

Результаты термоциклирования опытных образцов ТРП

№ образца	Покрытие	A_s		E_n		A_s/E_n	Адгез. прочность, кг/см ²		Удельное электр. сопротивление, кОм/квдрат	
		до	после	до	после		после	до	после	до
22	Al-Al ₂ O ₃	0,20	0,20	0,21	0,21	1,0	60	60	$0,9 \cdot 10^5$	$0,9 \cdot 10^5$
23		0,25	0,24	0,40	0,40	0,6	65	60	$\sim 10^9$	$\sim 10^9$
35	Al-ZrO ₂	0,20	0,21	0,21	0,21	1,0	70	65	$7 \cdot 10^3$	$7 \cdot 10^3$
36		0,20	0,20	0,26	0,27	0,7	65	60	$9 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^4$
37		0,23	0,22	0,30	0,30	0,7	65	65	$\sim 10^7$	$\sim 10^7$
38		0,32	0,32	0,40	0,39	0,8	60	60	$\sim 10^7$	$\sim 10^7$
42	Al-Al ₂ O ₃ -ZrO ₂	0,25	0,25	0,24	0,24	1,0	70	65	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$

образцов. По удельному электрическому сопротивлению удовлетворяют требованиям образцы № 22 ($\text{Al}-\text{Al}_2\text{O}_3$), № 35, 36 ($\text{Al}-\text{ZrO}_2$) и № 42 ($\text{Al}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{ZrO}_2$) – от 6 до 80 Ом·м, что соответствует удельному поверхностному сопротивлению от $6 \cdot 10^3$ до $8 \cdot 10^4$ кОм/квадрат при толщине покрытий ~ 1 мкм. Варианты покрытий $\text{Al}-\text{ZrO}_2$ № 35 и $\text{Al}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{ZrO}_2$ отличаются наибольшей стабильностью характеристик при воздействии факторов испытаний. Для трехслойного ТРП масса составит не более 45 г/м².



Изменение отношения A_s/A_{s0} покрытий в процессе испытаний

Таким образом, проведено изготовление трех схем терморегулирующих покрытий для углепластиковых элементов конструкции КА для обеспечения заданного теплового режима. Характеристики опытных образцов ТРП удовлетворяют требованиям по коэффициенту E_n (от 0,20 до 0,40) и отношению A_s/E_n (от 0,6 до 1,0). Адгезионная прочность покрытий на нормальный отрыв не менее 60 кг/см², масса не более 50 г/м². Удельное электрическое сопротивление зависит от схемы, толщины, технологических режимов нанесения покрытия и находится в пределах от 6 до $\sim 10^6$ Ом·м или от $6 \cdot 10^3$ до $\sim 10^9$ кОм/квадрат. Опытные образцы ТРП выдержали контрольные испытания на воздействие основных факторов хранения и эксплуатации.

Библиографический список

1. Физика тонких пленок : пер. с англ. / под ред. Г. Хасса и Р. Э. Туна : в 2 т. Т. 2. М. : Мир, 1967.
2. Waits, R. K. Planar magnetron sputtering / R. K. Waits // J. Vac. Sci. Technol. 1978. Vol. 15. No. 2. P. 179–187.

V. I. Khalimanovich, V. A. Kharlamov, R. A. Ermolaev, A. E. Mikheev, A. V. Girn

TESTING LABORATORY PATTERNS WITH THERMOREGULATION COATINGS ON CARBON DETAILS OF SPACE VEHICLES

The scientific research of thermoregulation properties of coatings, conducted by ion-plasma spraying method on carbon details of space vehicles and satellites was carried out. Regimes of ion-plasma spraying with best thermoregulation properties of carbon details were identified.

Keywords: space vehicle, thermoregulation coatings, ion-plasma spraying.

© Халиманович В. И., Харламов В. А., Ермолаев Р. А., Михеев А. Е., Гирн А. В., 2009