

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ПОТЕРИ МАССЫ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ВАКУУМЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ РАДИАЦИИ И ТЕМПЕРАТУРЫ

*Ю.А. Похил, Р.В. Гаврилов, М.М. Пристюк,
Н.Н. Агашкова, И.Н. Богаенко, В.Б. Тарасов**

*Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина
Специальное конструкторско-технологическое бюро, г. Харьков;
* Государственное конструкторское бюро «Южное», г. Днепропетровск*

Проведено кількісне дослідження кінетичних процесів втрати маси різних класів функціональних матеріалів космічного призначення (терморегулюючих та змазочних композиційних покриттів) в імітованих радіоційних, вакуумних та температурних умовах космічного простору. Показано, що випаровування летучих компонентів під дією факторів космосу призводить до деградації поверхневих (оптичних, структурних, триботехнічних) властивостей і відповідно зниженню працездатності досліджуваних матеріалів.

Проведено количественное исследование кинетических процессов потери массы различных классов функциональных материалов космического назначения (терморегулирующих и смазочных композиционных покрытий) в имитируемых радиационных, вакуумных и температурных условиях космического пространства. Показано, что испарение летучих компонентов под воздействием факторов космоса приводит к деградации поверхностных (оптических, структурных, триботехнических) свойств и соответственно снижению работоспособности исследованных материалов.

In the report the quantitative research of weight-loss kinetics for various classes of functional space assignment materials (thermoregulating and lubricant composite coverings) in simulating radiation, vacuum and temperature space conditions is carried out. It has been shown that the evaporation of flying components under influence of the space factors results to degradation of superficial (optical, structural, tribotechnical) properties and, accordingly, decrease of serviceability of the investigated materials.

Введение

Космическое материаловедение включает в себя круг задач, связанных с исследованием физических свойств материалов и покрытий в условиях действия на них вакуума, электромагнитного, корпускулярного излучений, термоциклирования и других факторов.

Целью настоящей работы являлось изучение процессов потери массы, а также кинетики потери массы в процессе воздействия имитируемых факторов космического пространства и их связь с другими важными свойствами материалов космических аппаратов. Условия космического пространства вызывают существенные изменения в свойствах материалов, если в их составе имеется какой-либо компонент, имеющий тенденцию к испарению (потере массы). При наличии потери массы органических материалов происходит изменение их механических, оптических и электрических свойств.

1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведенные в этой работе эксперименты можно разделить на две группы. Первая группа - это измерение потери массы образцов до и после воздействия факторов космического пространства. Вторая группа экспериментов - это исследование кинетики

потери массы материалов непосредственно в вакуумной камере, т.е. *in situ* в условиях воздействия температуры и вакуума.

1.1. Терморегулирующие покрытия

В данной работе исследовалось одновременное влияние в ускоренном режиме корпускулярного излучения (потока протонов и электронов) с энергией $E = 150$ кэВ (время облучения 72 ч, коэффициент ускорения 10, что соответствует 720 ч облучения в космосе на геостационарной орбите при интенсивности излучения $2 \cdot 10^7$ см⁻² с⁻¹), вакуумного ультрафиолетового излучения в диапазоне длин волн $\lambda = 5 \dots 250$ нм, вакуума на потерю массы, топологию поверхности, оптические и терморadiационные свойства композитного материала космического назначения.

На рис.1 приведен общий вид имитатора, состоящего из следующих основных систем: инжектора протонов и электронов на совмещенных пучках [1]; имитатора излучения Солнца, источника ВУФ-излучения [2]; вакуумной камеры; криогенной системы откачки.

Для исследования структуры поверхности материалов методами оптической микроскопии в работе использовали микроскоп МИМ-8. Для изучения оп-

тических и терморadiационных характеристик использовали спектрофотометр ФМ-59 (измерялся коэффициент отражения в видимом диапазоне) и терморadiометр ТРМ-И (интегральный коэффициент излучения ϵ).

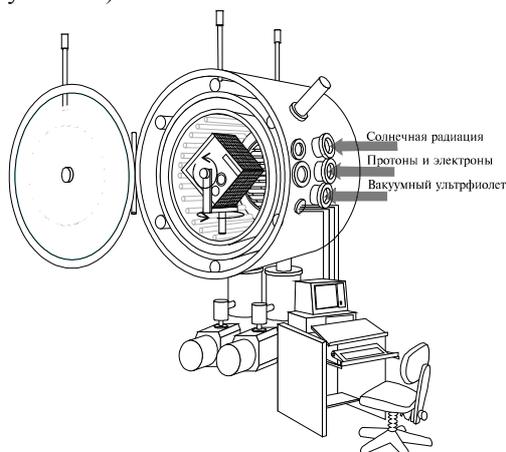


Рис.1. Схема комплексного имитатора факторов космического пространства

Измерение массы до и после воздействия имитируемых факторов космоса производили на аналитических весах АДВ-200 с точностью не хуже, чем 10^{-4} г.

Первая группа материалов представляет собой класс терморегулирующих покрытий, используемых в космических аппаратах.

К данным материалам предъявляются жесткие требования по их работоспособности в условиях открытого космоса, основные из которых следующие: потеря массы материалов за время жизни космического аппарата не должна превышать $\sim 1\%$, высокая стабильность оптических и терморadiационных параметров и др.

Необходимо было оценить потерю массы этого перспективного материала после воздействия факторов космического пространства, а также проанализировать связь потери массы материала с изменением его физических свойств. Объектами исследования в работе являлись образцы терморегулирующего покрытия GSFC (№1, 2).

1.2. Смазочные покрытия

Вторая группа исследованных материалов относится к органическим материалам с малой длиной молекулярной цепи - это масла и смазки, которые применяются в узлах трения космических аппаратов. В нашей работе исследовалась зависимость кинетики потери массы пластичных смазочных покрытий от температуры и вакуума *in situ*.

Пластичная смазка - это система, состоящая из дисперсионной (жидкой) среды, которая удерживается в ячейках структурного каркаса, последний образован твердыми частицами дисперсионной фазы (загустителя). Одним из факторов, влияющих на работоспособность пластичных смазок, является потеря массы. Испарение смазочного покрытия может привести к недопустимому появлению налетов масла на оптических стеклах, замасливаю подвижных электрических контактов. Потеря массы пла-

стичной смазкой определяется исключительно дисперсионной средой [3], потеря более 30...50% массы смазки приводит к резкому ухудшению работы механизма. Так как большинство промышленных смазок имеют широкий фракционный состав с разной степенью испаряемости, то существующие математические формулы нельзя использовать для расчета скорости испарения данных смазок. Поэтому кинетика процесса испарения таких смазок определяется экспериментально.

Для исследования кинетики потери массы смазочных покрытий мы пользовались методикой непрерывного взвешивания.

Исследование потери массы проводили в вакуумной камере при давлении $P = 10^{-4}$ Па в заданном интервале температур с помощью электромагнитных весов (рис.2) с чувствительностью $\leq 10^{-4}$ г.

Такие весы оптимально подходят для работы в вакууме, поскольку позволяют решить проблему дистанционного контроля, а также герметичности системы.

Исследуемый образец площадью 8 см^2 и массой ~ 40 мг помещался внутрь вакуумной камеры. В проводимых экспериментах образец нагревался до заданной температуры кварцевым нагревателем.

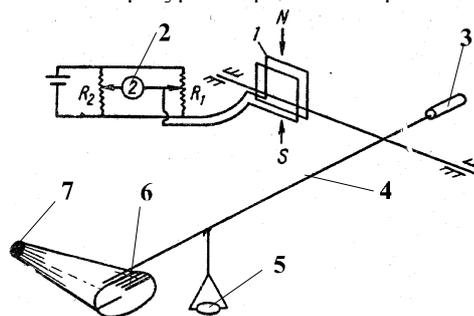


Рис.2. Схема электромагнитных весов:
1 - магнитное поле; 2 - электродвигатель; 3 - груз-противовес; 4 - коромысло; 5 - образец материала; 6 - зеркало; 7 - осветитель

В нашей работе исследовалась потеря массы пластичных смазок с разными дисперсионными средами. Смазка №1 - представляет собой смесь полиэтилсилоксана и нефтяного масла. Смазка №2 - фторуглеродная жидкость (перфторполиэфир).

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Терморегулирующие покрытия

В таблице приведены данные по изменению коэффициента черноты ϵ и потере массы $(\Delta m/m_0) \cdot 100\%$ образцов №1 и №2 терморегулирующего покрытия (ТРП) в результате воздействия факторов космического пространства (ФКП)

Потеря массы для всех исследованных материалов не превысила допустимого предела (0.47%).

Измерение коэффициентов отражения материалов $R(\lambda)$ проводили в интервале длин волн 360...1000 нм. На рис. 3 приведены спектры отражения образцов до и после воздействия факторов космоса.

Тип образца	Потеря массы, %	$\epsilon\%$ (исходный)	$\epsilon\%$ (после облучения)
GSFC №1	0,46	74	78
GSFC №2	0,47	70	75

На рис.3 видно, что после облучения форма спектральной кривой аналогична кривой исходного образца. Однако график отражения образца после облучения располагается ниже исходного примерно на 10%, т.е. снижается интенсивность отраженного света.

Анализ полученных данных показал, что после воздействия всех имитируемых факторов космоса - потоков протонов и электронов, ВУФ-излучения, произошли некоторые изменения структуры поверхности покрытий: она стала более развитой, шероховатой, что является, по-видимому, следствием травления поверхности [4,5]. Поверхность облученных покрытий содержит также разного типа неоднородности в том числе трещины (рис.4, а и 4, б).

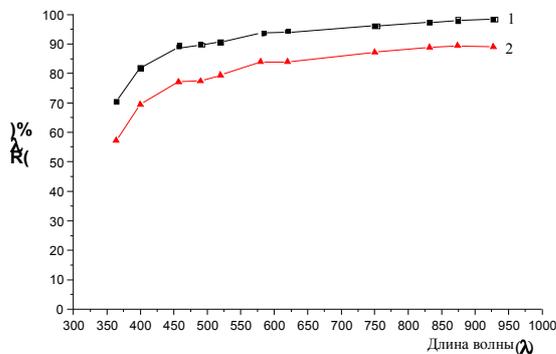


Рис.3. Изменение коэффициента отражения ТРП: 1 - исходный образец; 2 - облученный

Обнаруженное в настоящей работе растрескивание можно объяснить накоплением зарядов в приповерхностном слое, сильному кулоновскому взаимодействию между ними и, как следствие этого, образованию трещин в покрытии.

Прослеживается корреляция между потерей массы покрытия и изменением терморadiационных характеристик, которые, в свою очередь, связаны с изменением рельефа поверхности покрытий. Облучение модифицировало рельеф поверхности покрытий, усилив его неоднородность, что, в свою очередь, привело к повышению коэффициента черноты покрытия ϵ в инфракрасной области, а также уменьшению коэффициента отражения в видимой области $R(\lambda)$.

2.2 Смазочные покрытия

На рис.5 представлены графики, характеризующие кинетику потери массы смазки №1 в интервале температур $T=100...160\text{ }^\circ\text{C}$ и в вакууме 10^{-4} Па.

Как видно из рис.5, кинетические кривые $f(t)$ (где $f - (\Delta m/m_0) \cdot 100\%$, а t - время экспозиции) в интервале температур $T=100...140\text{ }^\circ\text{C}$ выходят на плато к четвертому часу эксперимента, тогда как с по-

вышением температуры образца до $160\text{ }^\circ\text{C}$ насыщение не происходит даже при времени $t > 6$ ч.

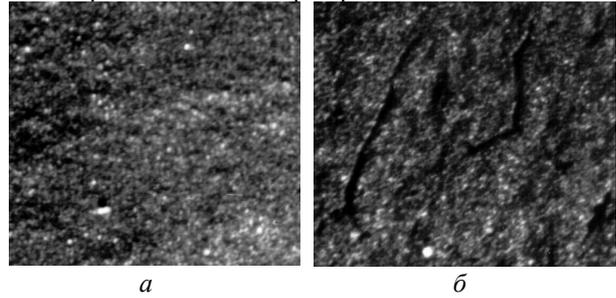


Рис.4. Структура поверхности ТРП GSFC: а - структура поверхности исходного образца; б - структура поверхности образца после воздействия факторами космического пространства

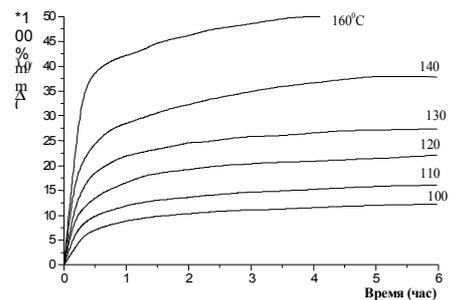


Рис.5. Графики зависимости кинетики потери массы смазки №1 при различных температурах

Показано, что наибольшая скорость потери массы наблюдается для всего интервала температур в первый час изотермической выдержки. Эта скорость выше допустимой (10^{-7} г/см²·с - скорость потери массы, принятая допустимой для испарения масла с единицы поверхности смазки [6]). Однако с увеличением времени экспозиции скорость испарения смазки уменьшается и, например, через 6 ч экспозиции при температуре $T=120\text{ }^\circ\text{C}$ составляет $0,8 \cdot 10^{-8}$ г/см²·с. Предельной рабочей температурой для смазки №1 является температура $T=140\text{ }^\circ\text{C}$, так как уже в интервале температур $150...160\text{ }^\circ\text{C}$ скорость потери массы смазки резко увеличивается, и в течение первого часа экспозиции смазка теряет около 47% дисперсионной среды (масла).

На рис.6 представлены графики зависимости кинетики потери массы смазки №2 от времени экспозиции её при различных температурах.

Следует отметить, что испаряемость смазки №2 на основе перфторполиэфира при прочих равных условиях намного ниже, чем у полиэтилсилоксановой (смазка №1) и при температуре $T=130\text{ }^\circ\text{C}$ составляет 3% после 6 ч экспозиции (в то время как у полиэтилсилоксановой смазки в таких же условиях потеря массы составляет ~25%).

Несмотря на низкую испаряемость смазки на перфторполиэфире, с повышением температуры до $T=150\text{ }^\circ\text{C}$ скорость потери массы увеличивается, что связано, очевидно, с проявлением при этой температуре начавшейся деструкции дисперсионной среды.

Полученные кинетические зависимости (см.рис.5, рис.6) позволяют рассчитать изменение скорости испарения смазок и методом экстраполя-

ции определить ресурс работы смазочного покрытия в данных условиях эксплуатации.

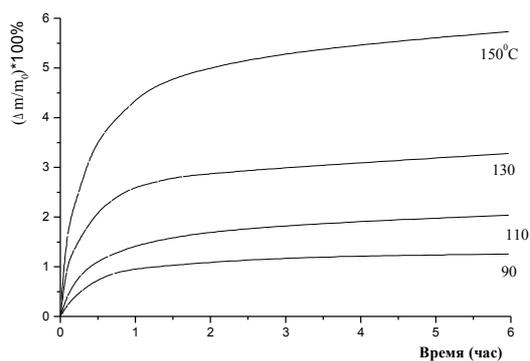


Рис. 6. Графики зависимости кинетики потери массы смазки №2 при различных температурах

Известно, что снижение остаточного давления в камере до 10^{-1} Па ухудшает условия работы смазочного материала. Дальнейшее его уменьшение вплоть до 10^{-4} Па сказывается на трибологических характеристиках смазок в узле трения в меньшей степени [6]. Однако проблема испаряемости смазки в вакууме остается актуальной.

На рис. 7 представлены графики зависимости кинетики потери массы смазки №1 от времени экспозиции её при различном остаточном давлении в вакуумной камере и температуре $T=130$ °C. Проведенные исследования показывают, что действительно снижение остаточного давления в вакуумной камере до $P = 10^{-1}$ Па приводит к увеличению потери массы смазки и, как следствие, ухудшению условий работы смазочного покрытия. Дальнейшее понижение давления вплоть до $P = 10^{-4}$ Па не оказывает заметного влияния на испарение данной смазки.

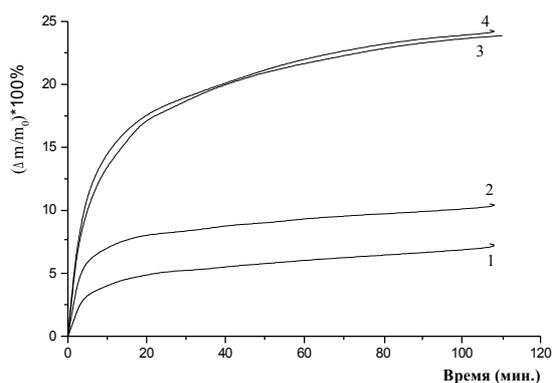


Рис. 7. Графики зависимости кинетики потери массы смазки №1 при различном остаточном давлении в вакуумной камере

Для смазки №2 снижение остаточного давления в вакуумной камере от $P=10^{-1}$ Па до $P=10^{-4}$ Па приводит к увеличению потери массы почти в 1,5 раза в течение 2 ч (рис. 8).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что чувствительность испаряемости исследованных смазочных покрытий к давлению окружающей среды определяется действием конкурирующих механизмов, а именно, соотношением давлений остаточ-

ных газов в камере ($P_{ост.}$) и парциальным давлением продуктов испарения ($P_{парц.}$) при данной температуре и скоростью диффузии молекул дисперсионной среды к поверхности материала. При $P_{ост.} > P_{парц.}$ преобладает первый механизм, а при $P_{ост.} < P_{парц.}$ – второй.

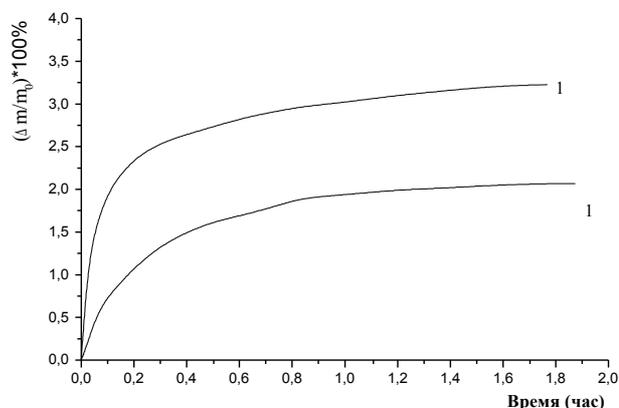


Рис. 8. Графики зависимости кинетики потери массы смазки №2 при различном остаточном давлении в вакуумной камере

Заключение

Проведенные исследования показывают, что потеря массы материала тесно связана с изменением поверхностных свойств материалов, поэтому изучение кинетики этого процесса позволит получить дополнительную информацию о работоспособности материалов в условиях космического пространства.

Созданный и усовершенствованный в СКТБ ФТИНТ НАНУ комплексный имитатор для наземной ускоренной имитации факторов космического пространства позволит в дальнейшем исследовать кинетику потери массы в процессе комплексного радиационного воздействия.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность сотрудникам СКТБ ФТИНТ НАНУ - В.И.Яременко, А.В.Кревсуну, Н.И.Величко, Г.И.-Сальтевскому, П.М. Шевченко, И.П. Зарицкому, Г.И. Максименко за участие в проведении экспериментов.

Литература

1. А.М. Маркус, В.Ф. Удовенко, В.А. Рыков и др. Установка для комплексных работ по радиационной физике твердого тела // ПТЭ. 1986, №3, с. 211-213.
2. Ф.М. Бабенко, Н.Н. Багров, В.И. Бондаренко, Э.Т. Верховцева и др. Криогенно-вакуумные системы // Криогенная техника / Под ред. Б.И. Веркина. Киев: «Наукова думка», 1985, с. 105-115.
3. К.И. Климов, В.А. Михеев. Научные принципы и новые методы испытаний материалов для узлов трения. М.: «Наука», 1968, 208 с.
4. Б.И. Хрущ, Ю.А. Ершов. Фоторазложение органических полимеров под действием ВУФ-излу-

чения // *Химия высоких энергий*. 1981, т.11, № 5, с.332-337.

5. М.М. Гуревич. *Оптические свойства лакокрасочных покрытий*. Л.: «Химия», 1984, 220 с.
6. В.В. Сеницын. *Подбор и применение пластичных смазок*. М.: «Химия».