

ВОЗДЕЙСТВИЕ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ИОННЫХ ПОТОКОВ НА КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

А.Б. Надирадзе, Р.Р. Рахматуллин, В.В. Шапошников

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

E-mail: nadiradze@mai.ru

В настоящее время композиционные материалы находят широкое применение при изготовлении образцов ракетно-космической техники. В частности, многие конструктивные элементы автоматических космических аппаратов (КА), включая элементы крупногабаритных трансформируемых систем, изготавливаются с использованием углепластиков. В свою очередь, повышение требований к целевым характеристикам и энерговооруженности КА при наличии ограничений на массово-габаритные характеристики КА приводит к существенному “уплотнению” конструктивно-компоновочных схем современных КА, что обуславливает попадание ряда конструктивных элементов крупногабаритных трансформируемых систем под воздействие плазменных струй стационарных плазменных двигателей (СПД), приводящее к распылению материалов их поверхностей.

В связи с этим возникает необходимость повышения точности оценок эрозионного воздействия плазменных струй СПД на КА посредством учета «тонких» эффектов, характеризующих процессы распыления материалов, таких как влияние флюенса, индикатрисы распыления, анизотропии свойств материалов и пр.

Основная сложность измерения характеристик распыления композиционных материалов при низких энергиях ионов состоит в большом времени эксперимента, необходимом для получения приемлемой точности измерения. В связи с этим для проведения испытаний преимущественно обладают методы, позволяющие одновременно испытывать большое количество образцов. Реализовать такую схему измерений можно с помощью СПД, имеющих большую расходимость плазменного потока (до 40°), и позволяющих разместить в потоке до 10-15 образцов материалов. Исходя из этих соображений, для измерения коэффициентов распыления композиционных материалов была выбрана схема эксперимента, представленная на рис. 1.

Величина коэффициента распыления измеряется весовым методом при известных параметрах плазменного потока и времени воздействия плазмы на образец. Для обеспечения требуемой точности и повторяемости результатов измерений необходимо выполнять следующие основные ограничения на режимы проведения эксперимента.

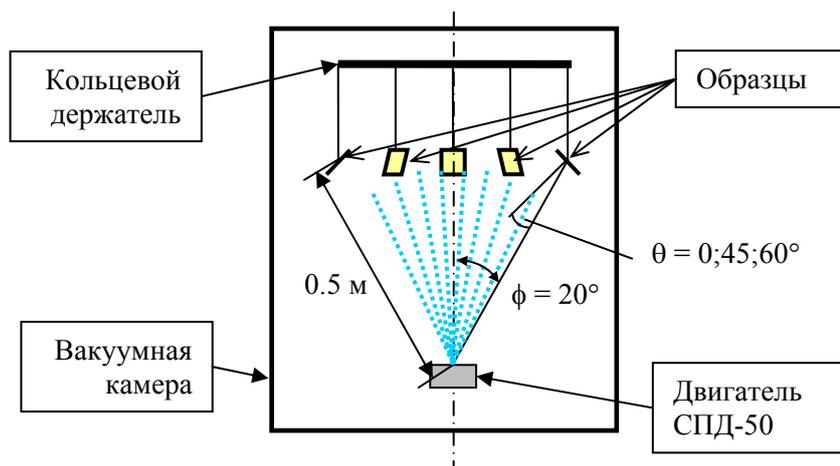


Рис. 1 – Схема эксперимента по определению характеристик распыления конструкционных материалов КА.

Потери массы образцов (за счет распыления) должны быть не менее $(20...30) \times \delta_M$, где δ_M – разрешающая способность используемых микровесов. Для аналитических рычажных весов $\delta_M = 0.1$ мг, следовательно, величина массы распыленного вещества должна быть не менее $\Delta M_{\text{данный}} \geq 0.1 \times (20...30) = 2...3$ мг.

Следует учитывать, что неметаллические и композиционные материалы обладают весьма существенной собственной потерей массы, обусловленной их гигроскопичностью и газовыделением материалов в вакууме. Стандартные параметры общих потерь массы (ОПМ) для современных материалов космического применения обычно не превышают 0.1%. Потери массы за счет газовыделения не должны превышать 3-5% массы распыленного вещества. Для указанной выше величины $\Delta M_{\text{расп}} = 2-3$ мг, это соответствует 0.1-0.2 мг. При этом масса образца должна быть не больше 0.1-0.2 г. Если масса образца превышает указанные значения, следует либо увеличивать $\Delta M_{\text{расп}}$, либо производить обезгаживание образцов.

Расстояние от двигателя не должно быть больше $\frac{1}{2}$ длины пробега ионов в камере ($\lambda \approx 1$ м при давлении $5 \cdot 10^{-4}$ торр.) иначе в потоке возрастет доля упругорассеянных ионов. Приближение образцов к двигателю также ограничено неравномерностью потока. Исходя из этого, расстояние от двигателя до образцов было выбрано равным 0.5 м.

Температура образца не должна превышать рабочей температуры материала (75-120°C) иначе в нем могут начаться необратимые деструктивные явления.

Положение образцов в камере должно выбираться так, чтобы минимизировать потоки осаждения на них продуктов распыления стенок вакуумной камеры.

Размеры образца ограничены неравномерностью плотности тока по длине образца, которая не должна превышать 3-5%.

Режим работы источника плазмы (плотность ионного тока) выбирают таким образом, чтобы обеспечить температурный режим образцов.

Время эксперимента $\tau_{\text{экс}}$ выбирают исходя из получения требуемой точности. Желательно, чтобы оно не превышало 40-50 часов, в противном случае стоимость работ резко возрастает.

В нашем эксперименте исследовались образцы углепластика на основе углеродного жгута, стеклонити и органического связующего. На внешней поверхности углепластика находится защитный слой, толщиной около 20 мкм, образованный тонкими стеклянными нитями, уложенными в одном направлении.

Эксперимент проводился на стенде ПП-2 МАИ [1], оснащенном современными безмасляными средствами откачки, обеспечивающими вакуум на уровне 10^{-5} торр. при работающем источнике плазмы. В качестве источника плазмы применялся стационарный плазменный двигатель типа СПД-50 (ток разряда 1.2-1.8 А, напряжение разряда 250-300 В). Образцы углепластика размещались в струе двигателя на расстоянии 0.5 м от среза, под углом 20° к оси струи. Углы падения ионов на поверхность образцов составляли 0° , 45° и 60° . Плотность ионного тока на образцах составляла 0.185 мА/см^2 , средняя энергия ионов – 200 эВ. Облучение образцов производилось в три этапа, продолжительностью 32, 16 и 12 часов.

На рисунке 2 приведена зависимость массы распыленного вещества от времени облучения (для угла падения ионов 0°).

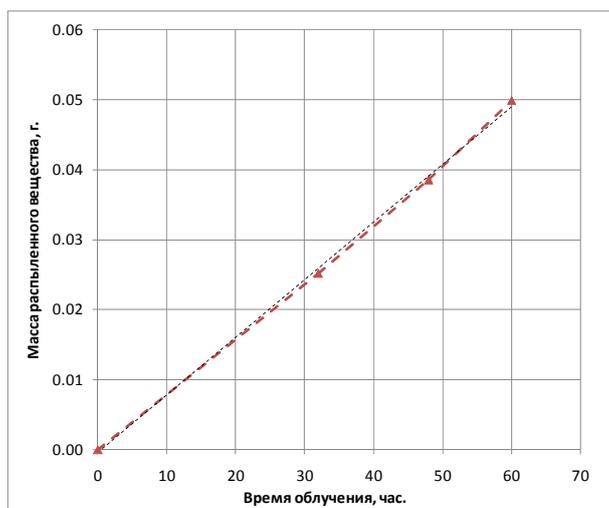


Рис. 2 – Зависимость массы распыленного вещества от времени облучения при нормальном падении ионов.

Как можно видеть из рисунка 2, существенного изменения скорости распыления по времени облучения не происходит. По-видимому, это связано с тем, что при реализованном в эксперименте флюенсе, глубина распыления составила около 10-15 мкм, что соответствует примерно 50% эрозии защитного слоя.

При дальнейшем воздействии потока плазмы можно прогнозировать полное распыление защитного слоя и переход к распылению углепластика. При этом, естественно, произойдет изменение скорости распыления, в соответствии с характеристиками распыления углепластика.

Коэффициент распыления защитного слоя при средней энергии ионов 200 эВ составил 0.24 атом/ион при среднем атомном весе распыленных частиц $M_w = 20.2$ (стекло). Массовый коэффициент распыления составил 0.05 мг/К, а объемный (при плотности материала 2.2 г/см^3) – $0.023 \text{ мм}^3/\text{К}$. Для сравнения отметим, что по данным [2] коэффициент распыления стекла (при энергии 200 эВ) составляет около 0.2-0.3, что соответствует измеренным значениям.

После распыления защитного слоя скорость распыления, по-видимому, должна уменьшиться в несколько раз, поскольку углерод более стоек к распылению, чем стекло. Так коэффициент распыления графита при энергии 200 эВ составляет около 0.04 атом/ион [3,4]. У углепластика за счет волокнистой структуры и наличия связующего коэффициент распыления будет несколько больше.

Зависимость коэффициента распыления от угла падения ионов приведена на рис.3.

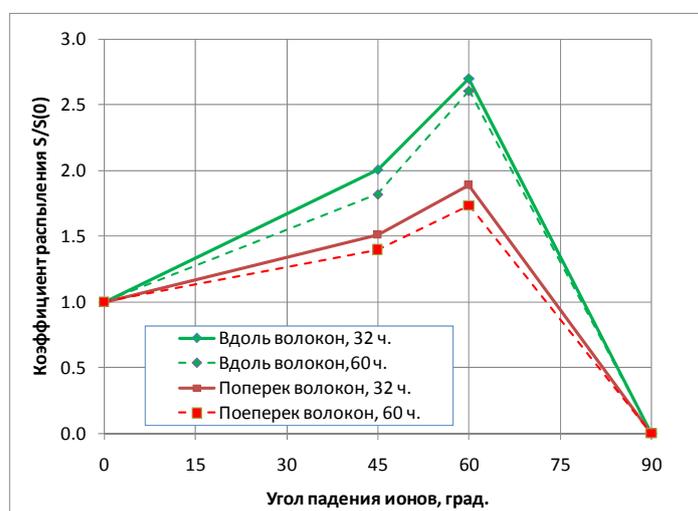


Рис. 3 – Зависимость коэффициента распыления от угла падения ионов.

На этой зависимости наблюдается заметное влияние ориентации образца относительно потока ионов. Так при ориентации вдоль волокон максимальный коэффициент распыления примерно в 1.4 раза больше чем при ориентации поперек волокон.

Причина этого эффекта, по-видимому, связана с частичным затенением материала при поперечной ориентации образца. Эту гипотезу подтверждают результаты исследования на электронном микроскопе.

На рисунке 4 приведены фотографии образцов при различной ориентации и при углах падения 45° .

На этих снимках отчетливо видно, что на образцах с поперечной ориентацией образуются «кристаллы», находящиеся в тени нитей стекловолокна защитного слоя. На образцах, ориентированных вдоль потока, таких «кристаллов» не образуется за исключением тех мест, где нити ориентированы под углом к потоку.

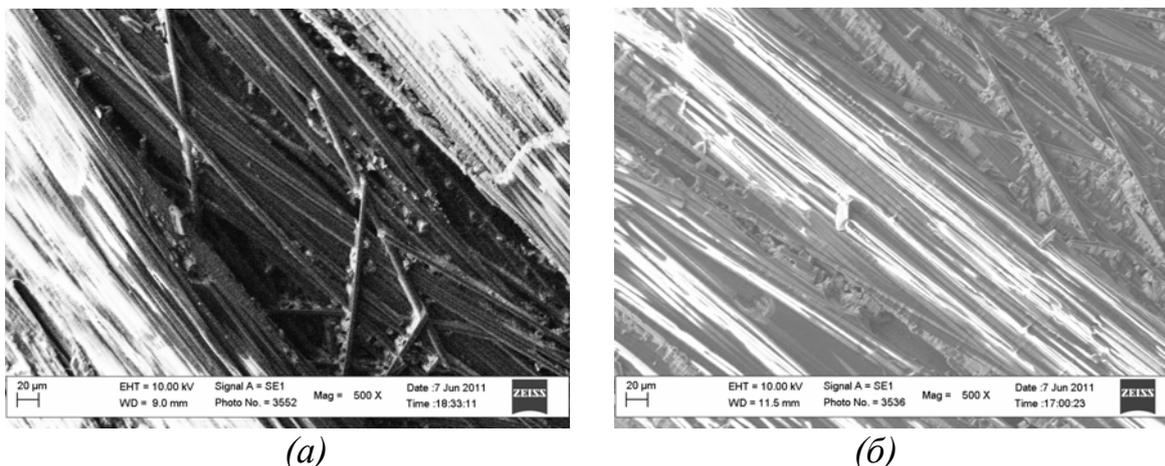


Рис. 4 – Поверхность образцов при угле падения ионов 45° при продольной (а) и поперечной (б) ориентации волокон относительно потока ионов.

По мере распыления образца наблюдается постепенное снижение максимума распыления при угле падения 60° . Возможно, что этот эффект связан с частичным оголением углеродных волокон, находящихся под стеклянными нитями.

Таким образом, показано, что для получения данных по распылению композиционных материалов необходимо строго выполнять множество ограничений на параметры эксперимента и проводить тщательную методическую подготовку.

Влияния флюенса на скорость распыления защитного слоя углепластика не обнаружено. При полном распылении защитного слоя возможно уменьшение коэффициента распыления за счет перехода к распылению углеволоконной основы.

Обнаружено значительное (около 40%) влияние ориентации образца относительно потока ионов на величину коэффициента распыления при наклонном падении ионов. Показано, что этот эффект связан с частичным затенением поверхности стеклянными нитями, образующими защитный слой углепластика.

1. Сайт стенда ПП-2 МАИ, <http://www.spp2.ru>
2. Eric J. Pencil, Thomas Randolph, David Manzella, "End-of-life Stationary Plasma Thruster far-filed plume characterization", AIAA-96-2709, Joint Propulsion Conference and Exhibit, 32nd, Lake Buena Vista, FL, July 1-3, 1996.
3. John D. Williams, Michael M. Gardner, Mark L. Johnson, and Paul J. Wilbur. Xenon sputter yield measurements for ion thruster materials. – IEPС-03-130 at the 28th Int'l Electric Propulsion Conf., Toulouse, France, 17-21 March 2003.
4. Проблемы прикладной физики. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой. Физическое распыление одноэлементных твердых тел/ Под ред. Р. Бериша: Пер. с англ./Под ред. В.А. Молчанова. М.: 1984. – 336 с.