

Исследование стойкости поверхности спутников к эрозийному износу

© Н.И. Сидняев, И.В. Баранов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия,

Приведены результаты исследований высокоскоростного ударного взаимодействия потока метеорных частиц и поверхности космических спутников. Описаны эффекты, возникающие при движении микрочастиц в материале, приведены модели взаимодействия твердой частицы с металлическими поверхностями. Представлены экспериментальные и аналитические зависимости. Выявлены основные факторы и выполнена оценка их влияния на износ поверхности деталей. Исследован механизм разрушения материала в зависимости от соотношения твердостей изнашивающих частиц и материала. Рассмотрены различные способы защиты спутников от воздействия космической среды: применение для изготовления силовой конструкции высокопрочных материалов (вольфрама, титана), обладающих высокой сопротивляемостью трению, ограничение времени функционирования КА в космосе, использование защитных экранов и многослойных стенок. Уделено внимание трению и эрозии, вызванному одиночными частицами, а также возможности появления термически локализованной деформации (адиабатического сдвига) в результате локального нагрева. Представлен механизм эрозии пластичных материалов абразивными частицами малых размеров, однако реакция материала при таких скоростях частиц малоизвестна. Постулируется, что удаление материала (износ) при воздействии на поверхность космического аппарата потока абразивных частиц происходит вследствие взаимодействия нескольких одновременно протекающих процессов, обусловленных отдельным или совместным влиянием компонентов потока этих частиц. Рекомендовано, что при рассмотрении эрозии материала, обтекаемого космической средой, необходимо учитывать: соударения частиц внутри набегающего потока; дробление отдельных частиц; экранирование обрабатываемой поверхности отскакивающими от нее частицами; широкий диапазон углов падения частиц в определенный момент времени; влияние обрабатываемой поверхности на траекторию движения космических частиц; подповерхностное повреждение материала вследствие многократных ударов микрочастицами; адсорбционный эффект понижения прочности материала поверхности аппарата на границе раздела его поверхности и потока и т. д.

Ключевые слова: проникание, микрочастицы, удар, конструкция, разрушение, эрозийный износ, поток

Введение. Известны разные способы защиты космических аппаратов (КА) от воздействия метеорных тел: изготовление силовой конструкции из высокопрочных материалов (вольфрама, титана), обладающих большой сопротивляемостью износу, ограничение времени функционирования КА в космосе, применение защитных экранов и многослойной силовой конструкции [1–3]. Отрицательное воздействие микрочастиц на открытые элементы конструкции приводит к деградации (износу) поверхностного слоя КА. В зависимости

от величины потока микрочастиц степень износа изменяется, и сам процесс продолжается несколько лет. Микрометеороиды, как правило, заряжены, поэтому они представляют собой так называемую «пылевую плазму». Скорости потоков частиц космической пыли лежат в диапазоне 10...50 км/с, а скорости частиц космического мусора изменяются от 1 до 16 км/с. Поэтому исключительно важными становятся технологии применения материалов с повышенным сопротивлением эрозийному износу. В космических технологиях используют материалы, наиболее эффективные для защиты от потока микрометеоритов, приводящих к их разрушению, испарению и распылению с внешней поверхности оболочки КА. Износ обшивки обычно сопровождается возникновением разных дефектов [4, 5]. Для защиты КА от эрозии его обшивку изготавливают из материала, обладающего большой сопротивляемостью отрыву, не имеющего резких нарушений неоднородности, непрерывности и других центров рассеяния, приводящих к местным напряжениям. Необходимо подбирать такую толщину оболочки КА, чтобы во время нахождения КА на орбите не происходило из-за эрозии недопустимого снижения прочностных характеристик конструкции.

Цель работы — исследовать влияние космических микрочастиц, двигающихся со скоростями от 2 до 8 км/с и обладающих большой кинетической энергией, что может привести к появлению микротрещин, длина которых превышает расчетную, и, как следствие, к разрушению корпуса.

Постановка задачи. Время безопасного функционирования КА в космосе определяется вероятностью его столкновения с микрометеорными телами. Считается, что число попавших в КА микрометеорных тел подчиняется распределению Пуассона. Поэтому в аппаратах с площадью мишени S_m за время τ вероятность попадания n микрометеорных тел:

$$P_n = \left(\frac{(v\tau S_m)^n}{n!} \right) e^{-v\tau S_m},$$

где v — средняя частота столкновения метеорных тел массой m , т. е. площадкой 1 м^2 за единицу времени; наблюдениями установлено, что $v \approx m^{-1,11} \cdot 10^{-12}$, если масса метеорного тела m выражена в граммах, а время — в секундах [6–9].

Задавая вероятность попадания в КА определенного числа микрометеорных тел, из представленной формулы определяют время τ безопасного функционирования КА. Для того чтобы предохранять отдельные агрегаты КА от столкновения с метеорными телами, применяют защитные экраны, материалы и размеры которых выбирают

такими, чтобы при малых скоростях соударения они могли противостоять пробивному воздействию метеорного тела, а при больших скоростях — обеспечить раздробление последнего на мелкие частицы с целью исключить недопустимые повреждения защищаемого агрегата. Толщина h (м) металлического экрана, который не будет пробит при воздействии метеорного тела, движущегося со скоростью 10...100 км/с, может быть определена по эмпирической формуле

$$h \geq 1,25 \cdot 10^{-5} \sqrt{\frac{\bar{E}}{H_B}} \cos \alpha,$$

где \bar{E} — кинетическая энергия соударения; H_B — твердость материала оболочки по Бринеллю; α — угол между нормалью и скоростью ударяющего тела.

Эта формула будет справедлива применительно к компактному ударяющему телу в случае, когда объем выбоины в преграде пропорционален энергии соударения.

Отдельно проводили измерения по взаимодействию модели несущей поверхности КА с единичным абразивным зерном (конус из сплава ВК6 с углом при вершине 120° и радиусом закругления 0,1 мм) [5–8]. Для того чтобы проверить справедливость отмеченных положений и выяснить роль отдельных факторов в протекании процессов разрушения поверхности металлов, были проведены соответствующие эксперименты, позволившие определить связь между твердостью сплава, скоростью царапания, давлением на индентор и объемом выдавливаемого по краям царапины металла $V_{\text{выд}}$, отнесенного к общему объему впадины $V_{\text{вп}}$, образованной при царапании (рис. 1). Для оценки характера деформации в процессе образования царапины принят коэффициент деформации $\mu = V_{\text{выд}} / V_{\text{вп}}$. В качестве индентора, имитирующего абразивную микрочастицу, использовали конус из сплава ВК6 с углом при вершине 120° и радиусом закругления 0,1 мм. Цилиндрические образцы диаметром 80 мм из стали 50 подвергали закалке и отпуску на разную твердость.

Результаты испытаний показали, что характер деформирования металла в процессе царапания зависит от условий взаимодействия индентора с поверхностью образца. Установлено, что

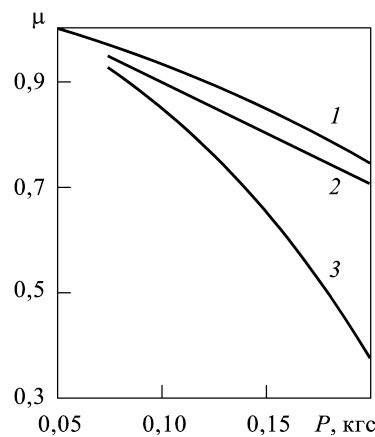


Рис. 1. Зависимость коэффициента деформации μ от нагрузки P на индентор:
1 — 210 HV; 2 — 340 HV; 3 — 575 HV