

## 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, вызванным 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  $\tau$  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  $1 \text{ м}^2$  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  $\tau$  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;  $\alpha$  — 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  $120^\circ$  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  $120^\circ$  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

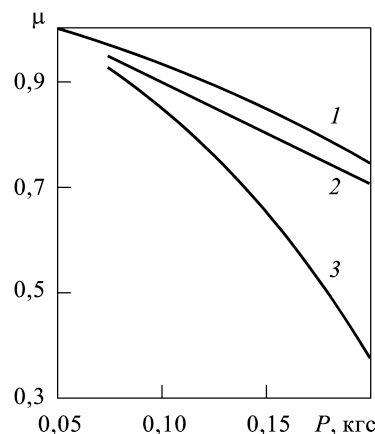


Рис. 1. Зависимость коэффициента деформации  $\mu$  от нагрузки  $P$  на индентор: 1 — 210 HV; 2 — 340 HV; 3 — 575 HV

при царапании «мягкой» стали (210 HV) с увеличением нагрузки на индентор  $P$  от 0,05 до 0,2 кгс наблюдается закономерное уменьшение коэффициента  $\mu$ . Характер зависимости  $\mu = F(p)$  можно объяснить с помощью теоретических положений. Поскольку критерием перехода от пластического оттеснения к резанию является отношение глубины внедрения сферы к ее радиусу, при увеличении нагрузки и, следовательно, глубины внедрения индентора процесс оттеснения металла будет переходить в процесс скалывания, что приведет к снижению значения  $\mu$  (рис. 1). Процесс износа связан главным образом с передеформированием поверхностных слоев металла, поэтому для повышения износостойкости сплавов необходимо прежде всего устранять активные деформационные явления на поверхностях трения. Можно повысить износостойкость, применяя материалы, способные, не разрушаясь, выдерживать многократную деформацию. При действии свободного абразива характер разрушения поверхности зависит от угла атаки. Поток микрометеорной пыли, действующий параллельно поверхности спутника, вызывает пластические деформации в материале с одновременными срезом и износом частиц металла.

В этом случае износ определяется следующим образом [9–11]:

$$V_F = mc^2 \cos^2 \alpha.$$

При угле атаки, близком к  $90^\circ$ , поверхностный слой металла хрупко разрушается под воздействием циклических напряжений. В этом случае  $V_F = \sin^n \alpha$ , где для металлов по Веллингтеру  $n = 1$ , для оптических стекол по Финнайю  $n = 2,5 \dots 4,0$ . Для расчета износа рекомендовано следующее выражение:

$$V = K_s K_w \left[ \frac{P_i}{f(H)} \right]^\beta,$$

где  $K_s$  — постоянная, зависящая от формы абразивного зерна;  $K_w$  — постоянная, зависящая от материала абразивного зерна;  $P_i$  — нагрузка на одно зерно;  $f(H)$  — функция твердости;  $\beta$  — параметр усталости материала.

В частном случае получается линейная зависимость относительной износостойкости  $e_F = SH$ , где  $H$  — твердость. Каждая методика при испытании на трение и износ может давать правильные результаты по отношению к натуре лишь в том случае, если на ней осуществляется тот вид обтекания, который имеет место на практике. Сам термин «износ» нуждается в уточнении, так как под ним под-

разумеваются в настоящее время разрушения металла под воздействием твердых микрочастиц, занесенных извне в место контакта или образовавшихся в процессе износа (наклепанные частицы износа). Однако эти твердые частицы могут совершать различное механическое воздействие, начиная от микрорезания и кончая упругим деформированием материала. Все зависит от формы твердых мелких метеорных частиц, степени их распределения, действующей нагрузки. Так, контртело, на которое переносится металл, рано или поздно покроеется слоем перенесенного металла, и, следовательно, будет происходить износ однородных материалов. Исследования показывают, что процесс износа при наличии адгезии идет сложнее, а именно, сначала металл переносится и намазывается на более твердую поверхность в виде тонкого слоя толщиной порядка  $0,5 \cdot 10^{-6}$  м, а затем уже отделяется в виде частиц износа в результате разрушения этого перенесенного, обычно окисленного, слоя металла.

Причина переноса металла заключается в том, что поверхностная энергия твердых тел различна, а потому в случае их контакта тело с меньшей поверхностной энергией стремится намазаться на тело с большей поверхностной энергией, однако для этого необходимо выполнение ряда дополнительных условий, например, намазываемое тело должно быть достаточно пластичным. Значения поверхностной энергии для некоторых металлов приведены ниже:

Металл .....	In	Pb	Al	Cu	Ni	Инструментальная сталь
Энергия, эрг/см <sup>2</sup> .....	1200	900	1800	2200	3400	3000

Исследования переноса металла в условиях сухого трения показывают, что при трении сферического индентора по плоскости в условиях сухого трения этот перенос связан с наростообразованием.

Наличие на поверхности трения пленки менее прочного материала, с нашей точки зрения, является условием внешнего трения, при котором требуется выполнение правила положительного перепада механических свойств. Следует отметить, что применительно к большой скорости скольжения принимается иной механизм износа. Например, в исследованиях [3–6] описывается механизм износа алмаза и металлов при больших скоростях скольжения. Алмаз под влиянием температуры 1000 °С превращается в аморфный углерод, который легко изнашивается. Принято, что фактическая площадь касания образуется в результате пластической деформации контактирующих неровностей, а износ обусловлен атомарным взаимодействием двух поверхностей.

Количество изношенного вещества, приходящееся на единицу пути скольжения, определяется по формуле

$$W = zq(HB)^{-1},$$

где  $Z$  — вероятность удаления атома с поверхности при встрече его с другим атомом;  $q$  — действующая нагрузка.

Принято, что при износе отделяются частицы, а не отдельные атомы, в результате взаимодействия не атомов, а шероховатостей. Принято, что площадка единичного контакта постоянна, и при увеличении нагрузки возрастает число площадок и частиц износа, размеры же их от нагрузки не зависят.

При скольжении на пути длиной 1 см происходит взаимодействие некоторого количества контактов. Пусть  $r$  — радиус пятна касания. Изнашиваемый объем будет пропорционален  $r^3$ , и тогда износ произойдет на пути, пропорциональном  $r$ . Следовательно, износ одного контакта на пути  $r$  должен быть пропорционален  $r^2$ . Тогда общее количество контактов пропорционально фактической площади, поэтому износ на единице пути для всех контактов должен быть пропорционален общей нагрузке, разделенной на твердость, откуда

$$W = K_q/3\sigma_T,$$

где  $\sigma_T$  — предел текучести.

Эксперименты показали, что  $K_q$ , коэффициент интенсивности напряжения при критической нагрузке, изменяется от  $10^{-2}$  до  $10^{-7}$ .

**Износ и трение от воздействия микрочастиц космической среды.** Экспериментальные данные об обтекании тел, полученные для условий разреженной среды, значительно отличаются от значений силовых и моментных характеристик, а также от параметров трения и теплопередачи, вычисленных по газодинамическим соотношениям для сплошной среды. Такое различие объясняется структурой этих соотношений, соответствующей гипотезе сплошности среды. Для разреженной атмосферы эта гипотеза недействительна, и поэтому необходимо использовать постулаты кинетической теории, исследующей динамику газа с помощью молекулярной механики. Основные выводы этой теории основаны на принятии дискретной схемы строения, согласно которой среда состоит из соударяющихся молекул, пробегающих достаточно большой свободный путь.

Не рассматривая подробно кинетическую теорию газов, остановимся лишь на тех сведениях, которые необходимы для понимания физических явлений, а также для выполнения аэродинамических расчетов, связанных с полетами в разреженной среде. Методы статистической физики устанавливают некоторый средний путь, пробегаемый молекулой до соударения. Его называют средней длиной свободного пробега. Эта длина определяется по формуле

$$l = \bar{c}t,$$

где  $\bar{c}$  — средняя скорость хаотического движения молекул [1];  $t$  — время между двумя соударениями молекулы, определяемое выражением  $t = n^{-1}$  ( $n = NS\bar{c}$  — число соударений в единицу времени,  $N$  — число молекул в единице объема,  $S$  — площадь поперечного сечения молекулы),  $l = (NS)^{-1}$ .

Например, для воздуха при нормальных условиях  $N = 2,69 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ,  $S = 10^{-15} \text{ см}^2$ , следовательно, длина пути свободного пробега  $l \approx 4 \cdot 10^{-5} \text{ см}$ . Отсюда следует, что средняя длина пути свободного пробега увеличивается с уменьшением плотности.

Для более практичного использования этой зависимости стоит вместо  $\bar{c}$  включить в нее скорость звука  $a$ , тогда  $l = 1,255v\sqrt{k}/a$ , где  $v$  — кинематический коэффициент вязкости;  $k$  — показатель адиабаты. При оценке степени разреженности и соответствующего режима течения целесообразно исходить из сравнения средней линии свободного пробега молекул  $l$  и расстояния между пластинками  $\delta$ , т. е. из отношения

$$\frac{1}{\delta} = 1,255 \frac{v\sqrt{k}}{V\delta} \frac{V}{a} = 1,255\sqrt{k} \frac{M}{\text{Re}},$$

где  $M$  — число Маха;  $\text{Re}$  — число Рейнольдса,  $\text{Re} = V\delta/v$ .

Параметр  $l/\delta$  называют числом Кнудсена и обозначают  $\text{Kn}$  ( $\text{Kn} = l/\delta$ ). Если число  $\text{Kn} \leq 0,01$ , то рассматривают газ как плотную среду, если  $\text{Kn} \geq 10$ , то газ следует считать сильно разреженным, и тогда гипотеза сплошности оказывается неприменимой.

Исследование движения газа вблизи поверхности связано с решением уравнений движения при определенных граничных условиях, налагаемых на это движение. Например, схема зеркального молекулярного отражения реализуется тогда, когда поверхность очень гладкая и наклонена под малым углом атаки. Согласно этой схеме, частицы, подойдя к стенке, после удара отражаются от нее под углом, равным углу атаки.

Таким образом, в данной схеме молекулы ведут себя подобно абсолютно упругим шарам. При зеркальном отражении абсолютные значения составляющих скорости не меняются, причем касательная составляющая к поверхности сохраняет свой знак, в то время как нормальная составляющая изменяет его на обратный. При таком идеальном взаимодействии частиц со стенкой силы трения в обычном понимании отсутствуют. Исследования показали, что даже тщательно отполированные поверхности не являются достаточно гладкими, чтобы полностью реализовывалась схема зеркального отражения. Практически, по этой схеме отражается лишь незначительная часть

молекул, примерно несколько процентов. В случае диффузного отражения предполагается, что поверхность имеет шероховатости и щели. Высота бугорков шероховатостей и ширина щелей поверхности КА должны быть соизмеримы с поперечными размерами молекул. Отсутствие какого-либо преобладающего направления движения диффузно отраженных молекул приводит к тому, что они не создают касательного напряжения. Поскольку реальная поверхность всегда отличается от идеально гладкой, большая часть молекул взаимодействует по схеме диффузного отражения.

Рассмотрим некоторые характеристики свободномолекулярного потока, обтекающего тело [3]. Будем считать, что молекулы отражаются диффузно, причем температура отраженных частиц равна некоторому значению  $T_r$ , отличному в общем случае от температуры стенки  $T_{ст}$  и первоначальной температуры газа  $T_i$ . Если молекулы движутся со скоростью, компоненты которой укладываются соответственно в интервалах скорости  $u, u + du; v, v + dv; \omega, \omega + d\omega$ , то число этих молекул равно произведению  $n_i f du dv d\omega$ , в котором  $n_i$  — число падающих молекул в единице объема (здесь и в дальнейшем с индексом « $i$ » обозначены частицы невозмущенного потока, параметры которого  $T_\infty, p_\infty, \rho_\infty$  и т. д.);  $f$  — функция распределения молекул по скоростям, т. е. функция распределения Максвелла.

В кинетической теории функция распределения определяется экспоненциальной зависимостью

$$f = (\pi c_m^2)^{-3/2} e^{-c^2/c_m^2}; \quad c_m = \bar{c} \sqrt{\pi/4}.$$

Функция распределения  $f$  относится только к неупорядоченной части движения молекул. Она зависит от скорости теплового движения  $c$  и от средней скорости  $\bar{c}$ , определяющей внутреннюю энергию единицы массы газа, равную  $\bar{c}^2/2$ . В общем случае  $\bar{c}$  и  $c$  зависят от координат и времени. Однако если рассмотреть имеющий большое практическое значение случай равновесного распределения скоростей, при котором в результате столкновений в каждом заданном элементе объема  $\tau = dx dy dz$  не изменяется число молекул газа, принадлежащих элементу пространства скоростей  $du dv d\omega$  в объеме  $\tau$ , то при этом функция распределения  $f$  не будет зависеть от времени  $t$ . Согласно кинетической теории газов, величину  $\bar{c}^2$  находят из выражения

$$\bar{c}^2 = 3RT, \quad \sqrt{\bar{c}^2} = 0,5\bar{c}\sqrt{3\pi/2} = c_m\sqrt{3/2}, \quad \text{т.е. } \sqrt{\bar{c}^2} = 1,086\bar{c} = 1,225c_m,$$

$$a = \sqrt{kRT} = \bar{c}\sqrt{\pi k/8} = \sqrt{\bar{c}^2}\sqrt{k/3}.$$



Отсюда следует, что значения средних молекулярных скоростей будут того же порядка, что и значения скорости звука. Функцию распределения Максвелла  $f$  можно определить с помощью графика, изображенного на рис. 2. Та часть числа падающих молекул, содержащихся в единице объема, которая соударяется с единичной поверхностью за 1 с, равна  $n_i v f du dv d\omega$ . Таким образом, в этом случае рассматриваются молекулы, которые пересекают поверхность и располагаются в выделенном объеме с единичной площадью основания и высотой, равной вертикальной составляющей скорости  $v$ . Частицы с составляющей скорости  $v < 0$  не будут достигать площадки. Общее число молекул  $N_i$ , соударяющихся с единичной поверхностью в 1 с, может быть получено интегрированием по всем возможным скоростям:  $-\infty < u < \infty$ ,  $0 < v < \infty$ ,  $-\infty < \omega < \infty$ , т. е.

$$N_i = n_i (\pi c_{mi}^2)^{-3/2} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{1}{2}H_1^2} du \int_0^{\infty} v e^{-\frac{1}{2}H_2^2} dv \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{1}{2}H_3^2} d\omega,$$

$$u = u' + \frac{c_{mi}}{\sqrt{2}} H_1, \quad v = v' + \frac{c_{mi}}{\sqrt{2}} H_2, \quad \omega = \omega' + \frac{c_{mi}}{\sqrt{2}} H_3,$$

$$\frac{H_1}{\sqrt{2}} = \frac{U}{c_{mi}}, \quad \frac{H_2}{\sqrt{2}} = \frac{V}{c_{mi}}, \quad \frac{H_3}{\sqrt{2}} = \frac{W}{c_{mi}},$$

где  $H_1, H_2, H_3$  — значения безразмерных скоростей движения по соответствующим направлениям скоростей;  $U$  — скорость по направлению компонента;  $\omega$  — скорость свободного молекулярного потока.

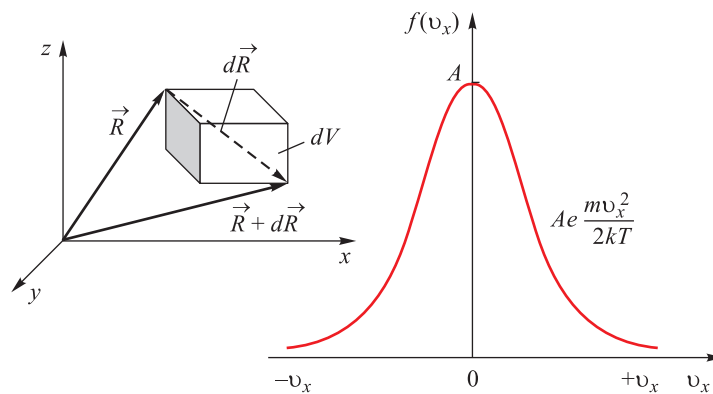


Рис. 2. Функция распределения Максвелла

Первый интеграл представим в следующем виде:

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{1}{2}H_1^2} du = c_{mi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{1}{2}H_1^2} d(H_1 / \sqrt{2}).$$

Интеграл в правой части этого выражения — известный интеграл Эйлера — Пуассона:

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{1}{2}H_1^2} d(H_1 / \sqrt{2}) = 2 \int_0^{\infty} e^{-\frac{1}{2}H_1^2} d(H_1 / \sqrt{2}) = \sqrt{\pi};$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{1}{2}H_1^2} du = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{1}{2}H_1^2} d\omega = c_{mi} \sqrt{\pi}.$$

Второй интеграл можно представить в виде

$$\int_{-\infty}^{\infty} v e^{-\frac{1}{2}H_2^2} dv = c_{mi} \int_{-v'/c_{mi}}^{\infty} \left( v' + \frac{c_{mi}}{\sqrt{2}} H_2 \right) e^{-\frac{1}{2}H_2^2} d\left( \frac{H_2}{\sqrt{2}} \right) = c_{mi}^2 \int_{-\bar{x}}^{\infty} (\bar{x} + y) e^{-y^2} dy,$$

$$\bar{x} = v' / c_{mi}, \quad y = H_2 / \sqrt{2}.$$

С учетом преобразований второй интеграл примет вид

$$\int_{-\infty}^{\infty} v e^{-\frac{1}{2}H_2^2} dv = \frac{c_{mi}^2}{2} \left[ e^{-\bar{x}^2} + \bar{x} \sqrt{\pi} (1 + \operatorname{erf} \bar{x}) \right], \quad \operatorname{erf} \bar{x} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\bar{x}} e^{-z^2} dz.$$

Для общего числа молекул  $N_i$  можно использовать зависимость

$$N_i = n_i \sqrt{\frac{RT_i}{2\pi}} \left[ e^{-\bar{x}^2} + \bar{x} \sqrt{\pi} (1 + \operatorname{erf} \bar{x}) \right], \quad c_{mi} = \sqrt{2RT_i}.$$

Произведение  $RT_i$  связано со скоростью звука соотношением  $a_i = \sqrt{kRT_i}$ . Здесь число падающих молекул определяется величиной параметра  $\bar{x}$ , соответствующего рассматриваемой точке поверхности. Если в выражении для параметра  $\bar{x}$  выразить  $c_{mi}$  через скорость звука, то  $\bar{x} = (v'/a_i) \sqrt{k/2}$ . Учитывая наряду с этим, что  $\beta$  — угол между направлением вектора  $\vec{V}_{\infty}$  и касательной к поверхности в данной точке (рис. 3), можно найти

$$\bar{x} = \sin \beta \frac{V_{\infty}}{a_i} \sqrt{\frac{k}{2}} = \bar{x}_{\infty} \sin \beta; \quad \bar{x}_{\infty} = \frac{V_{\infty}}{a_i} \sqrt{\frac{k}{2}} = M_{\infty} \sqrt{\frac{k}{2}}.$$

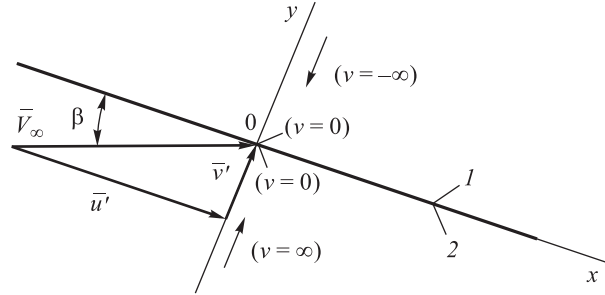


Рис. 3. Свободномолекулярный поток около плоской поверхности КА:  
1 — верхняя поверхность; 2 — нижняя поверхность

Формула получена для условий около поверхности, которым соответствуют пределы изменения  $0 < v < \infty$ . Если рассматривается верхняя сторона поверхности КА, то уравнение переноса массы будет иным, так как, в соответствии с рис. 3, пределы изменения  $v$  указанном интеграле будут  $-\infty < v < 0$ . Учитывая это, представим выражение для верхней поверхности:

$$N_i = -n_i (\pi c_m^2)^{-3/2} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{1}{2}H_1^2} du \int_{-\infty}^0 v e^{-\frac{1}{2}H_2^2} dv \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{1}{2}H_3^2} d\omega.$$

Здесь первый и третий интегралы определяются значением средней скорости. Второй интеграл можно представить в виде

$$\int_{-\infty}^0 v e^{-\frac{1}{2}H_2^2} dv = \frac{c_{mi}^2}{2} \left[ e^{-\bar{x}^2} - \bar{x} \sqrt{\pi} (1 - \operatorname{erf} \bar{x}) \right].$$

Если принять во внимание полученные значения интегралов, то зависимость для определения числа падающих молекул на верхнюю площадку КА примет вид

$$N_i = n_i \sqrt{\frac{RT_i}{2\pi}} \left[ e^{-\bar{x}^2} - \bar{x} \sqrt{\pi} (1 - \operatorname{erf} \bar{x}) \right].$$

Если рассматривается свободномолекулярный поток около криволинейной поверхности, то полученная формула применима к расчету числа падающих молекул на ее переднюю и заднюю стороны. При больших скоростях формулы можно упростить, воспользовавшись тем, что уже для  $\bar{x} \geq 2$  величина  $e^{-\bar{x}^2}$  по крайней мере на два порядка меньше единицы, а интеграл вероятности  $\operatorname{erf} \bar{x}$  мало отличается от единицы. Например, при  $\bar{x} = 2$  величина  $e^{-\bar{x}^2} = 0,018$ , а  $\operatorname{erf} \bar{x} = 0,995$ . Каждому  $\bar{x}$  соответствует значение  $M_\infty = (\bar{x} / \sin \beta) \sqrt{2/k}$ . В частности,

для  $\bar{x} = 2$ ,  $\sin \beta = 0,2$  и  $k = 1,4$  число  $M_\infty = 12$ . При  $\beta = 90^\circ$  наименьшее из возможных чисел  $M_\infty$  для  $\bar{x} = 2$  снижается. Таким образом, упрощенно формулу, определяющую число падающих молекул на верхнюю площадку КА, можно представить в следующем виде:

$$N_{if} = \bar{x} n_i \sqrt{2RT_i} = n_i V_\infty \sin \beta.$$

Здесь индекс «*f*» указывает на то, что рассматривается передняя сторона криволинейной поверхности. Если имеется в виду задняя сторона (индекс «*b*»), то формула при сделанных предположениях превращается в равенство  $N_{ib} = 0$ . Поскольку при большой скорости полета КА молекулы не достигают задней стороны его поверхности, диффузное отражение подчиняется максвелловскому распределению, если принять  $\bar{x} = 0$ , так как после соударения частицы теряют массовую скорость.

Отраженные частицы имеют другую температуру  $T_r$ , поэтому  $N_r = n_r \sqrt{RT_r / (2\pi)}$ , где  $n_r$  — число отраженных молекул в единице объема,  $R$  — универсальная газовая постоянная.

Если принять, что общее число падающих частиц равно числу отраженных, т. е.  $N_i = N_r$ , можно найти связь между концентрациями  $n_r$  и  $n_i$  для передней и задней обтекаемых поверхностей КА:

$$N_{rf} = n_i \sqrt{\frac{T_i}{T_r}} \left[ e^{-\bar{x}^2} + \bar{x} \sqrt{\pi} (1 + \operatorname{erf} \bar{x}) \right];$$

$$N_{rb} = n_i \sqrt{\frac{T_i}{T_r}} \left[ e^{-\bar{x}^2} - \bar{x} \sqrt{\pi} (1 - \operatorname{erf} \bar{x}) \right].$$

**Расчет эрозийного действия метеорных частиц.** Силовые конструкции КА, которые подвергаются воздействию метеорных частиц, сводят к двум расчетным схемам для определения:

толщины пробиваемой преграды

$$h_{\text{пр}} = 2,83 \left( \frac{m_0}{\rho_0} \right)^{1/3} \left( \frac{\rho_0 v_0}{a \rho_{\text{пр}}} \right)^{2/3};$$

диаметра входного кратера (при  $h \leq h_{\text{пр}}$ )

$$D = \left[ 1 + 3,2 \left[ \frac{\rho_0 v_0}{a \rho_{\text{пр}}} \right]^{1/5} \left( \frac{h}{d_0} \right)^{2/3} \right] d_0,$$

где  $m_0$ ,  $d_0$  — масса и средний диаметр микрометеорной частицы;  $\rho_0$ ,  $\rho_{\text{пр}}$  — плотность материала микрометеорного тела и преграды;  $v_0$  — скорость соударения;  $a$  — скорость звука в материале силовой конструкции.

При заданных условиях встречи, если толщина стенок силовой конструкции КА меньше заданной конструктивно, конструкция будет разрушена микрометеорными частицами, масса которых

$$m_0 \geq m_{\text{крт}} = \frac{h^3 \rho_0}{2,83^3} \left[ \frac{\rho_0 v_0}{a \rho_{\text{пр}}} \right]^2.$$

Значение ущерба определяют с помощью полуэмпирических выражений, построенных при следующих предположениях:

при соударении микрометеорных частиц с несущей поверхностью происходит разрушение как преграды, так и ударяющегося тела;

при разрушении несущей поверхности образуются вторичные осколки, которые вместе с осколками от микрометеорного тела, разлетаясь в сторону силовой стенки, образуют конический сноп;

масса летящих в конический сноп осколков от метеорного тела равна массе последнего в момент соударения;

вторичные осколки, оказывая воздействие на силовую стенку, вызывают ее деформирование.

На основании экспериментальных исследований установлено, что вторичные осколки разлетаются в конический сноп. При  $\frac{\rho_6 h_6}{\rho_0 d_0} > 1$

полуугол конуса  $\bar{\theta} = 30^\circ$ , а при  $\frac{\rho_6 h_6}{\rho_0 d_0} < 1$  полуугол конуса

$\bar{\theta} = \arctg \left( 0,6 \sqrt{\frac{\rho_6 h_6}{\rho_0 d_0}} \right)$ , где  $\rho_6$  — плотность материала,  $h_6$  — толщина

стенки.

Средняя осевая скорость разлета вторичных осколков определяется на основе постоянства количества движения, т. е.  $v_a = m_0 v_0 / (m_0 + m^*)$ , где  $m^*$  — суммарная масса вторичных осколков.

Значение параметра разрушения определяют экспериментально. При обработке опытных данных полагают следующее:

материал силовой стенки является идеально пластичным (в статических условиях за пределами упругости деформируется без упрочнения [4]) (рис. 4);

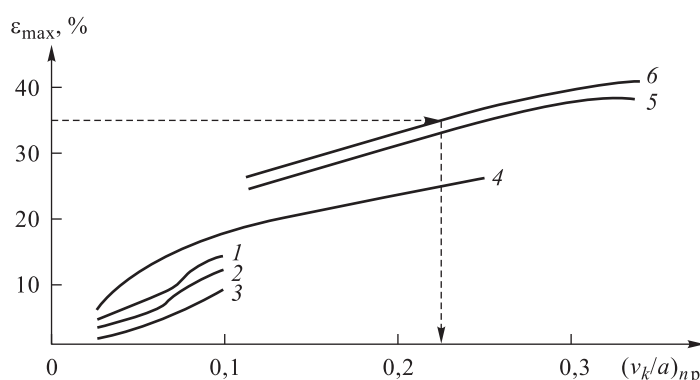
влияние скорости деформирования на механические свойства материала силовой стенки пренебрежимо мало;

силовую стенку конструкции при рассмотрении процесса ее деформирования можно рассматривать как бесконечную пластину;

разрушение силовой стенки произойдет тогда, когда максимальная ее деформация в условиях воздействия на стенку потока осколков равна или больше деформации, соответствующей моменту разрушения образца материала при статическом одноосном растяжении;

деформированное состояние силовой стенки можно характеризовать только деформацией срединной поверхности;

можно пренебречь составляющей деформации вследствие изгиба стенок.



**Рис. 4.** Зависимость максимальной деформации износа  $\varepsilon_{\max}$  от параметра износа  $(v_k/a)_{\text{пр}}$  для различных материалов:

$E$  — модуль упругости;  $\sigma_{0,2}$  — текучесть материала: ( $E/\sigma_{0,2}$ : 1 — 179; 2 — 143; 3 — 114; 4 — 260; 5 — 500, 6 — 650)

Максимальная деформация  $\varepsilon_{\max}$  силовой стенки конструкции зависит от модуля упругости  $E$ , предела текучести  $\sigma_{0,2}$  и параметра износа  $(v_k/a)_{\text{пр}}$  (см. рис. 2). В случае предварительного напряжения (нагружения) конструкции максимальная деформация разрушения  $\varepsilon_{\max} = \varepsilon_{0\max} + \bar{\sigma}/E$ , где  $\varepsilon_{0\max}$  — максимальная статическая деформация разрушения образца из материала силовой стенки без предварительного нагружения;  $\bar{\sigma}$  — напряжение предварительного нагружения конструкции силовой стенки.

В расчетах применительно к предварительно напряженной конструкции величина  $(v_k/a_2)_{\text{пр}}$  определяется по  $\varepsilon_{\max}$  на графике, приведенном на рис. 2. Для этого предварительно экспериментально определяют деформации износа  $\varepsilon_{0\max}$  при растяжении и рассчитывают  $\varepsilon_{\max}$ . Здесь  $v_0$  — скорость соударения;  $m_0, d_0$  — масса и диаметр

метеорных частиц;  $D$  — диаметр пробойны;  $h_6, \rho_6$  — толщина и плотность материала буфера;  $h_c, \rho_c$  — толщина и плотность материала силовой конструкции;  $\gamma_{\max}, \gamma_{\text{ср}}$  — максимальный и средний угол разлета вторичных осколков;  $r_{\text{ср}}$  — средний радиус разлета вторичных осколков в плане;  $S$  — расстояние между буфером и силовой конструкцией. Значения  $\varepsilon_{\max}$  и  $(v_k / a_2)_{\text{пр}}$  для некоторых материалов приведены в таблице.

**Характеристики сопротивляемости износу**

Материал	$\varepsilon_{\max}, \%$	$E \cdot 10^{-6},$ кг · с / м <sup>2</sup>	$\rho \cdot 10^3,$ кг / м <sup>3</sup>	$E / \sigma_{0,2}$	$a \cdot 10^3,$ м / с	$(v_k / a)_{\text{пр}}$
Титан	18	1,09	4,5	2,54	4,88	0,132
Вольфрам	14	3,67	19,3	460	5,46	0,158
Сталь (0,1 % с)	40	2,04	7,9	690	5,04	0,295
Бериллий	5,5	3,08	1,86	630	12,8	0,030

В ряде случаев при эксплуатации эрозионное изнашивание сочетается с ударными нагрузками, что приводит к ускорению изнашивания. При ударно-абразивном изнашивании возможны два варианта взаимодействия абразивных частиц с поверхностью:

1) абразивные частицы наносят удары по поверхности спутников, однако в целом нагрузки не могут привести к объемному разрушению детали;

2) абразивный износ сопровождается большими динамическими нагрузками, вызывающими трещинообразование и хрупкое разрушение поверхности спутника.

Первый вариант реализуется при ударе «через абразивную частицу». Примером второго варианта может быть случай, когда поток абразивных частиц с большой скоростью бьет по поверхности спутника под углом, близким к 90° (в этом случае ударно-абразивное изнашивание по своему механизму фактически близко к абразивно-эрозионному изнашиванию). В результате реализации первого варианта взаимодействия «частица — поверхность» вся поверхность покрывается лунками, причем износ резко возрастает даже по сравнению с микрорезанием. Если энергия единичного удара превышает пороговый для конкретного материала уровень, то разрушение приобретает хрупкий характер с образованием микротрещин и отделением крупных частиц от поверхности. В таких условиях применение сплавов с мартенситной основой ограничено. Чем выше энергия удара

абразива, тем меньше мартенсита должно быть в структуре сплава (соответственно возрастает количество остаточного аустенита).

Второй вариант взаимодействия абразивных частиц с поверхностью реализуется, например, в тех случаях, когда массивные куски абразивного материала сначала наносят удар, а потом, скользя по поверхности, вызывают ее микрорезание. В этих условиях использование стали является нерациональным, так как изнашивание не сопровождается равномерным деформационным упрочнением всей поверхности изделия. Однако сплавы с высоким сопротивлением абразивному изнашиванию являются довольно хрупкими и не выдерживают интенсивных ударов. Необходимое сочетание износостойкости и вязкости можно получить в комбинированных отливках, выполненных из вязкого материала, армированного вставками. В таких отливках вставки обеспечивают сопротивление абразивному изнашиванию, а сталь — конструкционную надежность в условиях ударов. Поэтому материалы для обшивки космических кораблей должны быть или очень теплоемкими, или тугоплавкими. К таким материалам относятся пять металлов — бериллий, ниобий, молибден, тантал и вольфрам. Наличие трещин в материале может привести к потере несущей способности изделия даже при нагрузках, не превышающих предела прочности материала. Поэтому исследование стойкости тугоплавких материалов, в частности вольфрама, является весьма актуальным.

Рассмотрим вопрос о возможности использования линейной механики разрушения для оценки износостойкости вольфрама в широком интервале температур, применяемого в важных несущих конструктивных элементах КА. Оценку осуществляли на образцах толщиной 6 мм [3, 4]. В качестве параметра износостойкости был выбран критический коэффициент интенсивности напряжения  $K_{Ic}$  [5], определяемый по формуле

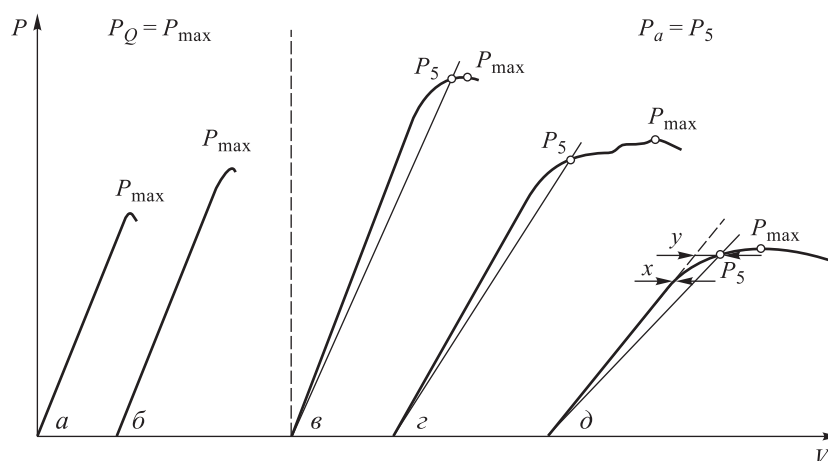
$$K_{Ic} = \frac{P_Q Y(l/\omega)}{B\sqrt{\omega}},$$

где  $P_Q$  — критическая нагрузка появления трещины;  $B, \omega$  — геометрические размеры образца;  $l$  — длина исходной трещины;  $Y(l/\omega)$  — коэффициент, учитывающий геометрию образца.

Нагрузку  $P_Q$  определяли по диаграммам деформирования (рис. 5). За расчетную величину  $P_Q$  принимали максимальную нагрузку ( $P_Q = P_{\max}$ ) при испытаниях в температурном диапазоне 20...50 °С (рис. 5, а, б). При более высоких температурах — от 600 до 2000 °С — нагрузку  $P_Q$ , соответствующую появлению исходной трещины,



определяли по методике 5%-ной секущей (рис. 5, в, з, д) [5]. Наличие пологого участка на диаграммах не свидетельствует об общем пластическом течении а, как показано в работе [6], является результатом особенностей развития магистральной трещины при различных температурах испытания вольфрама. Установлено, что в исследованном интервале температур (20...2000 °С) выполняются требования, предъявляемые к диаграммам деформирования:  $(P_{\max}/P_Q) \leq 1,1$ ;  $x \leq 0,25y$ . Кроме того, визуальный анализ показал, что разрушение образцов вольфрама во всем исследованном температурном диапазоне преимущественно хрупкое (прямой излом, отсутствие утяжки в вершине трещины). Эти выводы подтверждены результатами рентгеноструктурного и фрактографического анализов [8–12].



**Рис. 5.** Диаграммы деформирования вольфрама при температурах испытания, равных 20; 200...500; 600; 1200...1500; 1600...2000 °С (а–д соответственно);  $P$  — нагрузка,  $V$  — смещение

Степень деформированности зерен оценивали по кривым качания отдельных зерен при сходимости  $20'$  падающих на отдельное зерно лучей рентгеновского излучения. Анализ показал, что структура зерен на поверхности излома и на поверхности образца, не нагружаемой в процессе растяжения, практически не изменяется (полуширина кривых качания не увеличивалась). Это свидетельствует об отсутствии пластической зоны в вершине трещины. Результаты фрактографических исследований также свидетельствуют о хрупком характере износа вольфрама (рис. 6).

Тем не менее проверка корректности полученных результатов показала, что выбранная толщина образца, равная 5 мм, не удовлетворяет размерному требованию  $l, B, \omega - l \geq 2,5(K_{Ic}/\sigma_{0,2})^2$  [3], и

исследовать износостойкость необходимо на крупногабаритных образцах из вольфрама, толщина которых в отдельных случаях даже превышает толщину исследуемого изделия.

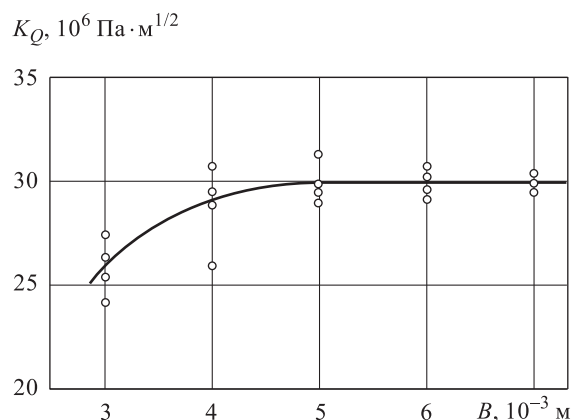


Рис. 6. Зависимость величины коэффициента  $K_Q$  от толщины стенки  $B$

Следовательно, на первый взгляд, снижение величины  $K_{Ic}$  при температурах, превышающих  $t = 600 \text{ }^\circ\text{C}$  (при  $t = 20; 400; 600; 800; 1200; 1600$  и  $2000 \text{ }^\circ\text{C}$  коэффициент  $K_{Ic}$  составил 27,5; 34,5; 50,0; 46,0; 28,0; 15,0 и 6,5 МПа·м<sup>1/2</sup> соответственно), может быть обусловлено погрешностью, возникающей при расчете  $K_{Ic}$  на образцах, не удовлетворяющих указанному требованию. Основной причиной погрешности может быть изменение податливости материала в вершине трещины, связанное либо с локальной пластической деформацией [7], либо с локальным растрескиванием в вершине магистральной трещины. Поскольку растрескивания не наблюдалось, а размер пластической зоны был значительно меньше длины трещины, можно предположить, что указанное размерное требование является слишком жестким при испытании образцов из вольфрама.

Данное предположение подтверждается тем, что  $K_Q$  не зависит от толщины образца (см. рис. 4) и размерные требования, предъявляемые к образцу, не изменяются во всем исследованном температурном интервале (рис. 7). Полученные зависимости возможны лишь тогда, когда коэффициент интенсивности напряжений  $K_Q$  принимает критическое значение, т. е.  $K_Q = K_{Ic}$ . Таким образом, износостойкость вольфрама можно исследовать на малогабаритных образцах.

Результаты экспериментального исследования трещиностойкости вольфрама показали, что максимальное значение  $K_{Ic}$  при  $t = 600 \text{ }^\circ\text{C}$

( $50 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ ) и минимальное значение при  $t = 2000 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $6,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ ) обусловлены физическими процессами, протекающими при указанных температурах. Параметр трещиностойкости вольфрама  $K_{Ic}$  коррелирует с физическими процессами, протекающими в нем. Следовательно, найденные значения трещиностойкости вольфрама корректны при всех температурах испытания и могут быть приняты при оценке конструкционной прочности изделий из вольфрама, используемых в объектах новой техники.

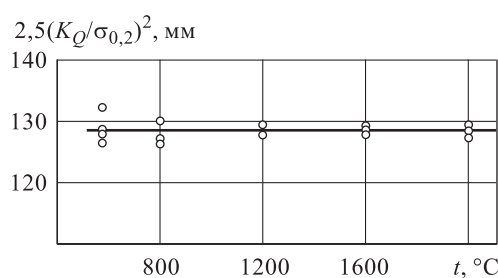


Рис. 7. Влияние температуры испытания на требования к размерам несущей поверхности

На основе проведенных исследований можно сделать вывод о возможности применения ЛМР при исследовании трещиностойкости вольфрама на несущих поверхностях КА в интервале температур  $20 \dots 2000 \text{ }^\circ\text{C}$ . Высокие удельная прочность, тугоплавкость, коррозионная стойкость обеспечили титановым сплавам широкое применение для изготовления деталей и узлов сверхзвуковых самолетов, ответственных узлов космических кораблей, а также в судостроении, химическом и нефтяном машиностроении. Использование титановых сплавов как высокотемпературных конструкционных материалов из-за их легкой окисляемости ограничено температурой порядка  $900 \text{ }^\circ\text{C}$ . Следовательно, титан, как и тугоплавкие металлы, нуждается в защите от окисления.

**Заключение.** Исследования показали, что при бомбардировке высокоскоростными ( $7 \dots 8 \text{ км/с}$ ) микрочастицами износ поверхности спутника, который происходит под влиянием динамических потоков твердых микрочастиц или электрических разрядов, в большинстве случаев приводит к возникновению питтингов, раковин, микротрещин, каверн со значительной потерей массы детали.

По механизму разрушения эрозия подразделяется на механохимическую и микроударную, по характеру распространения — на локальную и общую, по условиям протекания — на газовую, абразивную, гидроабразивную (при кавитации) и электрическую. Если энергии потока частиц недостаточно для проникновения пластической

деформации поверхностных слоев корпуса спутника на достаточную глубину, то разрушение определяется механохимическим механизмом.

Этот механизм связан с образованием и удалением защитных пленок вторичных (чаще — окисных) структур при трении сплошного потока по поверхности корпуса КА. Если энергия единичных ударов достигает определенной критической величины, то превалирующей формой изнашивания становится микроударная эрозия с образованием трещин. Импульсные нагрузки являются причиной микропластической деформации с образованием на поверхности трещин небольших объемов, размер которых сопоставим с размером зерна металла.

На первой стадии изнашивания отсутствуют любые внешние проявления образования микроцарапин, все изменения протекают на уровне формирования субструктуры и субмикрорельефа (скольжение дислокаций, двойникование, фазовые превращения, фрагментация зерен). Пластическая деформация с образованием микротрещины, локализованная в отдельных объемах, вызывает зарождение и развитие трещин, результатом чего является удаление частиц металла от основы. Если на поверхности возникают первые каверны, то процесс роста трещины ускоряется в связи с охрупченным состоянием металла возле дефекта, ударным действием газа по стенкам каверн.

При нестационарном воздействии температурной нагрузки наблюдается интенсификация эрозийного износа в отдельных местах поверхности спутника, вследствие чего на конструктивных элементах формируется характерный рельеф с локальными впадинами, а нередко и со сквозными отверстиями. Наиболее чувствительны к влиянию температуры свойства титана и вольфрама, характеризующие сопротивление пластической деформации (твердость, пределы прочности и текучести), а также ударная вязкость. На упругие свойства титана и вольфрама температура влияет в меньшей степени. При высоких температурах наибольшее постоянное напряжение вызывает остаточную деформацию, не превышающую заданного значения, равного, как правило, 0,2 %. Характеристики выносливости зависят от формы и размера несущей поверхности КА, а также от способа и интенсивности нагружения.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ушеренко С.М. *Сверхглубокое проникание частиц в преграды и создание композиционных материалов*. Минск, НИИИП, 1998, 208 с.
- [2] Калашников В.В., Ибатуллин И.Д., Ганигин С.Ю. и др. Разработка и исследование эффективности импульсных устройств на основе энергонасыщенных материалов для модификации поверхности деталей машин высокоскоростными потоками частиц. *Известия Самарского научного центра РАН*, 2012, т. 14, № 1, с. 615–619.

- [3] Сидняев Н.И. *Обтекание гиперзвуковых летательных аппаратов в условиях поверхностного разрушения*. Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2016. 304 с.
- [4] Солодов А.В., ред. *Инженерный справочник по космической технике*. Москва, Воениздат, 1969, 696 с.
- [5] Виноградов В.Н., Бирюков В.И., Назаров С.И., и др. Установка для исследования разрушения конструкционных материалов при контактном взаимодействии с абразивными частицами. *Заводская лаборатория*, 1979, № 8, с. 767–769.
- [6] Браун У., Сроули Дж. *Испытания высокопрочных металлических материалов на вязкость разрушения при плоской деформации*. Москва, Мир, 1972, 246 с.
- [7] Васильев Н.В., Бояркина А.П., Назаренко М.К. и др. Динамика притока сферической фракции метеорной пыли на поверхности Земли. *Астрономический вестник*, 1975, т. IX, № 3, с. 178–183.
- [8] Сидняев Н.И. Исследование разрушения поверхности КА при контактном взаимодействии с микрочастицами космической среды. *Космические исследования*, 2018, т. 56, № 3, с. 233–242.
- [9] Хеккель К. *Техническое применение механики разрушения*. Москва, Металлургия, 1974, 63 с.
- [10] Симоненко А.Н., Левин Б.Ю. Приток космического вещества на Землю. *Метеоритика. Вып. 31*. Москва, Наука, 1972, с. 3–17.
- [11] Усков Е.И., Бабак А.В. Методика исследования трещиностойкости вольфрама. *Заводская лаборатория*, 1981, № 1, с. 79–82.
- [12] Сидняев Н.И., Климова Н.С. Изменение поверхностных и объемных свойств космического аппарата при адсорбции и рекомбинация атомов кислорода и азота. *Космические исследования*, 2020, т. 58, № 3, с. 208–222.

Статья поступила в редакцию 19.07.2022

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Сидняев Н.И., Баранов И.В. Исследование стойкости поверхности спутников к эрозионному износу. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 8. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-8-2199>

**Сидняев Николай Иванович** — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Высшая математика» научно-учебного комплекса «Фундаментальные науки» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: [sidnyaev@yandex.ru](mailto:sidnyaev@yandex.ru)

**Баранов Иван Владимирович** — аспирант кафедры «Высшая математика» научно-учебного комплекса «Фундаментальные науки» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: [i.w.baranow@yandex.ru](mailto:i.w.baranow@yandex.ru)

## Study of satellite surface resistance to erosive wear

© N.I. Sidnyaev, I.V. Baranov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The purpose of the research was to study the high-speed impact interaction of a stream of meteor particles and the space satellite surface. The paper describes the effects arising from the movement of microparticles in a material, gives models of the solid particle–metal surfaces interaction, and introduces experimental and analytical dependencies. Within the study, we identified the main factors and estimated their influence on the wear of the surface parts. Furthermore, we examined the mechanism of material destruction depending on the ratio between the hardness of the wear particles and the material. The paper describes various ways of protecting satellites from the influence of the space environment: the use of high-strength and high friction resistance materials, e.g. tungsten, titanium, in the manufacture of the load-bearing structure; the limitation of the spacecraft operation time in space; the use of protective screens and multilayer walls. We studied friction and erosion caused by single particles, the possibility of thermally localized deformation, i.e. adiabatic shear, resulted from local heating, and introduced the mechanism of plastic materials erosion caused by small size abrasive particles. The response of the material at such particle velocities is little known. The study postulates that the material removal (wear) when the surface of the spacecraft is exposed to a stream of abrasive particles results from the interaction of several simultaneously occurring processes due to the separate or combined influence of the components of the stream of these particles. It is recommended that when considering the erosion of material in the stream around the space environment, it is necessary to take the following into account: collisions of particles with each other inside the oncoming stream; crushing of individual particles; screening of the treated surface by particles bouncing off it; a wide range of angles of incidence of particles at a certain point in time; influence of the treated surface on the trajectory of cosmic particles; subsurface damage to the material due to repeated impacts with microparticles; adsorption effect of reducing the strength of the spacecraft surface material at the interface between the spacecraft surface and the stream, etc.*

**Keywords:** penetration, microparticles, impact, structure, destruction, erosive wear, stream

### REFERENCES

- [1] Usherenko S.M. *Sverkhglubokoe pronikanie chastits v pregrady i sozдание kompozitsionnykh materialov* [Superdeep penetration of particles into barriers and the creation of composite materials]. Minsk, NIIP Publ., 1998, 208 p.
- [2] Kalashnikov V.V., Ibatullin I.D., Ganigin S.Yu., et al. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN — Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2012. vol. 14, no. 1, pp. 615–619.
- [3] Sidnyaev N.I. *Obtekanie giperzvukovykh letatelnykh apparatov v usloviyakh poverkhnostnogo razrusheniya* [Flow around hypersonic aircraft under conditions of surface destruction]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2016, 304 p.
- [4] Solodov A.V., ed. *Inzhenerny spravochnik po kosmicheskoy tekhnike* [Space Engineering Handbook]. Moscow, Voenizdat Publ., 1969, 696 p.
- [5] Vinogradov V.N., Biryukov V.I., Nazarov S.I., et al. *Zavodskaya laboratoriya — Industrial Laboratory*, 1979, no. 8, pp. 767–769.
- [6] Brown W., Strawley J. *Plane strain crack toughness testing of high strength metallic materials*. American Society for Testing and Materials, 1st ed., 1966,

- 129 p. [In Russ.: Brown W., Strawley J. Ispytaniya vysokoprochnykh metallicheskikh materialov na vyazkost razrusheniya pri ploskoy deformatsii. Moscow, Mir Publ., 1972, 246 p.].
- [7] Vasilev N.V., Boyarkina A.P., Nazarenko M.K., et al. *Astronomicheskiy vestnik — Solar System Research*, 1975, vol. IX, no. 3, pp. 178–183.
- [8] Sidnyaev N.I. *Kosmicheskie issledovaniya — Cosmic Research*, 2018, vol. 56, no. 3, pp. 233–242.
- [9] Heckel K. *Tekhnicheskoe primenenie mekhaniki razrusheniya* [Application of fracture mechanics]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1974, 63 p. (In Russ.).
- [10] Simonenko A.N., Levin B.Yu. Pritok kosmicheskogo veschestva na Zemlyu [The influx of cosmic matter to the Earth]. *Meteoritika. Vyp. 31* [Meteoritics, no. 31]. Moscow, Nauka Publ., 1972, pp. 3–17.
- [11] Uskov E.I., Babak A.V. Zavodskaya laboratoriya — *Industrial Laboratory*, 1981, no. 1, pp. 79–82.
- [12] Sidnyaev N.I., Klimova N.S. *Kosmicheskie issledovaniya — Cosmic Research*, 2020, vol. 58, no. 3, pp. 208–222.

**Sidnyaev N.I.**, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of Higher Mathematics, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: sidnyaev@yandex.ru

**Baranov I.V.**, post-graduate student, Department of Higher Mathematics, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: i.w.baranow@yandex.ru