

Механизм пробития керамической обшивки аэрокосмического аппарата

*Виктор Баранов, Игорь Лопа,
Христо Христов*, Звезделин Чивиков***

Тулский государственный университет, Россия

** Военный научный технический институт, София*

*** "Дунарит" ЕООД, Русе*

Высокая твердость и термостойкость керамики в сочетании с относительно небольшой плотностью делают ее перспективным защитным материалом при проектировании различных космических аппаратов, особенно многократного пользования. В связи с этим актуальна проблема изучения ее стойкости к высокоскоростному удару и проникающему воздействию жестких метеоритных частиц. Ниже анализируется механизм разрушения керамической преграды толщиной h жестким цилиндрическим ударником массой M для случая нормального удара со скоростью V_0 .

В момент удара от лицевой поверхности преграды начинает генерироваться волна напряжения сжатия. Так как в керамике в силу ее хрупкости не развиваются значительные пластические деформации даже при разрушении, то передний фронт несет напряжения

$$(1) \quad \sigma_0 = \frac{\sqrt{E_1 \rho_1 E_2 \rho_2}}{\sqrt{E_1 \rho_1} + \sqrt{E_2 \rho_2}} V_0,$$

где E_1, E_2 - модули упругости материалов преграды и ударника; ρ_1, ρ_2 - плотности материалов преграды и ударника, соответственно.

При достижении фронтом волны напряжения сжатия тыльной поверхности преграды происходит ее отражение и трансформация в волну

напряжений растяжения, которая распространяется в обратном направлении, интерферируя с падающей волной напряжения сжатия. Тогда суммарное напряжение в произвольном сечении преграды [1]

$$(2) \quad \sigma_p(z) = \sigma_0 - \sigma_c(z),$$

где $\sigma_c(z)$ - напряжение сжатия в материале керамики в сечении z в момент прихода в него отраженной волны напряжений растяжения $t = (2h - z) / a$

$$(3) \quad \sigma_c(z) = \sigma_0 \exp\left[-\frac{2\rho_1 S}{M}(h - z)\right],$$

где $a = \sqrt{\frac{E_1}{\rho_1}}$ - скорость распространения упругой волны в керамике; S - площадь миделева сечения ударника.

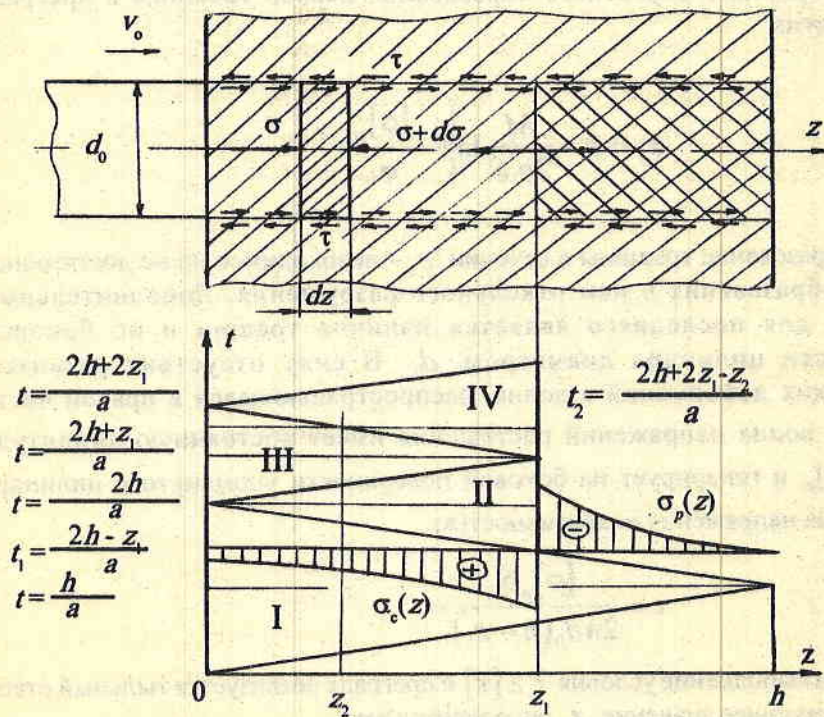


Рис. 1

Рассмотрим момент времени $t_1 = \frac{2h - z_1}{a}$ (рис. 1). Материал преграды перед ударником левее сечения z_1 находится в сжатом состоянии, правее в растянутом. Пусть в сечении z_1 напряжение растяжения $\sigma_p(z_1)$ равно допускаемому. Тогда в нем генерируется трещина, нарушается сплошность - и левая и правая часть в дальнейшем будут вести себя автономно. Причем в левой части будет продолжаться распространение фронта волны напряжений растяжения, а в правой произойдет отражение волны напряжений растяжения и преобразование ее в волну сжатия. При этом соответствующие амплитуды волн напряжений в каждой части преграды будут равны по модулю и вдвое меньше первоначального напряжения $\sigma_p(z_1)$.

Рассмотрим правую половину преграды. Напряжение растяжения в сечении z_1 равно:

$$\sigma_p(z_1) = \sigma_0 \left[1 - \exp \left[- \frac{2\rho_1 S}{M} (h - z_1) \right] \right] = [\sigma]_p,$$

откуда координата вероятного образования первой трещины в преграде при пробитии

$$(4) \quad z_1 = h + \frac{M}{2\rho_1 S} \ln \left| 1 - \frac{[\sigma]_p}{\sigma_0} \right|$$

Образование трещины в сечении z_1 - необходимое но не достаточное условие образования в нем откольного разрушения. Дополнительным условием для последнего является наличие трещин и по боковой поверхности цилиндра диаметром d_0 . В силу отсутствия развитых пластических деформаций в волне, распространяющаяся в правой части преграды, волна напряжений растяжения имеет постоянную амплитуду $\sigma_c(z) = \frac{1}{2} [\sigma]_p$ и генерирует на боковой поверхности упомянутого цилиндра касательные напряжения интенсивностью:

$$\tau = \frac{[\sigma]_p S}{2\pi d_0 (h - z_1)}$$

При выполнении условия $\tau \geq [\tau]$ в преграде реализуется тыльный откол и соответствующее значение z_1 определится так:

$$(5) \quad z_1 \geq h - \frac{d_0 [\sigma]_p}{8 [\tau]}.$$

Рассмотрим теперь левую половину преграды. В момент образования трещины эта часть нагружена сжимающим напряжением, определенным по формуле (3). Распространяющийся в этой части фронт волны напряжений растяжения с амплитудой $0,5[\sigma]_p$ (рис. 1) будет создавать суммарное напряжение $\sigma_\Sigma(z)$, определяемое по формуле:

$$(6) \quad \sigma_\Sigma(z) = \sigma_0 \exp\left[-\frac{2\rho_1 S}{M}(h-z) - \frac{1}{2}[\sigma]_p\right].$$

Под действием этого напряжения на цилиндрической поверхности d_0 будут генерироваться касательные напряжения [2], которые могут при определенных условиях привести к образованию пробки. Приведенное касательное напряжение, учитывающее неравномерность распределения суммарного нормального напряжения (6) по длине левой части, можно определить так:

$$(7) \quad \tau_{np} = \frac{S}{\pi d_0 z_1} \int_0^{z_1} \frac{\partial \sigma(z, t_1)}{\partial z} dz.$$

Теперь условие образования пробки в левой части преграды имеет вид $\tau_{np} \geq [\tau]$, или, с учетом (6) и (7):

$$(8) \quad \frac{1}{4} d_0 \sigma_0 \exp\left[-\frac{2\rho_1 h S}{M}\right] \left[\exp\left(\frac{2\rho_1 S z_1}{M}\right) - 1\right] \geq z_1 [\tau].$$

Выполнение условия (8) в совокупности с (4) и (5) логически означает полное пробитие ударником преграды в зоне II в фазовой плоскости $z \omega t$ (рисунок).

Если условие (8) не выполняется, то в левой части преграды возможны множественные повторные отколы, и полное пробитие преграды может произойти, например, в зоне IV фазовой плоскости. Следует отметить, что в зоне III разрушение возникнуть не может, так как отколов там нет и меньшая по сравнению с зоной II амплитуда сжимающих напряжений при фиксированной площади среза не может привести к образованию пробки. Время вероятного образования второго (и последующих) отколов t_2 (рисунок) и соответствующее ему сечение z_2 можно определить без принципиальных затруднений с помощью тех же уравнений, с соответствующими им начальными условиями.

Таким образом, показано, что разрушение керамической преграды

может произойти за счет множественного откола ее тыльной части из-за действия отраженных растягивающих напряжений и одновременного среза лицевой части в виде пробки из-за действия касательных напряжений, генерируемых волной напряжений сжатия. Сформулированы необходимые и достаточные условия пробития преграды и определены вероятные координаты сечения преграды, в которых возникают откольные разрушения.

Л и т е р а т у р а

1. Баранов, В.Л., И.В. Лоп а. Продольные упруго-вязкопластические волны в стержнях конечной длины-Известия ВУЗ, 1993, № 1, 54-57.
2. Баранов, В.Л., И.В. Лоп а. Радиальные волны кручения и продольного сдвига в толстой упруго-вязкопластической пластине с отверстием в неизоэтермической постановке -Известия ВУЗ, 1989, № 7, 27-30.

Поступила 7. X. 1995 г.

The mechanism of perforation of the ceramic lining of aero-space vehicles

Victor Baranov, Igor Lopa, Christo Christov, Zvezdelin Chiwickov

(S u m m a r y)

This paper analyzes a normal impact of a rigid rod upon a ceramic bulkhead with limited thickness in a wave scenery. There are formulated the necessary and sufficient conditions for the formation of a multiple rear breaking off, as well as the associated conditions for formation and cutting of a cork.