

К обоснованию использования механохимически активных материалов в качестве защитных экранов космических аппаратов

03, март 2014

УДК: 519.63:539.5

автор: Абросимова А. С., Колпаков В. И.

abrosimova.anna91@gmail.com

Kolpakov54@mail.ru

МГТУ имени Н.Э.Баумана

Одним из возможных направлений развития противодействия высокоскоростным частицам космической среды является использование защитных экранов (щитов Уиппла), вынесенных на некоторое удаление от космического аппарата с использованием механохимически активных материалов [1]. В настоящей работе предложена физико-математическая модель поведения таких материалов и результаты численного моделирования функционирования экранной защиты космического аппарата с использованием различных механохимически активных веществ.

При численном моделировании ударных и взрывных явлений необходимо учитывать как прочность, так и сжимаемость твердой среды. При этом наиболее часто используются модели упругопластической или идеальной упругопластической сред. Все перечисленные модели базируются на фундаментальных законах сохранения массы, импульса и энергии, включают в себя кинематические и физические соотношения в форме Прандтля – Рейсса при наличии критерия пластичности Мизеса [2]. Кроме того, задачи рассматриваются в адиабатическом приближении.

Для замыкания системы исходных уравнений, описывающих поведение упругопластической среды используются уравнения состояния взаимодействующих тел; прочностной и деформационный критерии разрушения среды [3]. Начальные условия для взаимодействующих тел задавались исходя из того, что их материалы в момент начала движения не деформированы и не возмущены. Все индивидуальные частицы защитного экрана находятся в покое, а индивидуальные точки микрочастицы движутся с одинаковой начальной скоростью. Принималось также, что в момент соударения химически активное вещество (ХАВ) мгновенно реагирует с выделением внутренней энергии.

Для описания этого процесса предполагалось также, что при соударении с метеоритом в начальный момент времени плотность ХАВ не изменится, а внутреннюю энергию химического превращения можно оценить по экспериментальным данным работы [1]. Высказанные предложения можно реализовать подбором соответствующего уравнения состояния ХАВ, в качестве которого рассматривались следующие соотношения.

Уравнение состояния полиномиального типа

$$p = A_1\mu + A_2\mu^2 + A_3\mu^3 + (B_0 + B_1\mu)\rho_0 e \quad (1),$$

где $\mu = \rho / \rho_0 - 1$. В первом приближении $A_1 = K$ ($K = 4.64 \dots 5.03$ ГПа – модуль объемного сжатия [1]), $A_2 = A_3 = 0$, $B_0 = B_1 = (n_e - 1) = B$ ($n_e = 1.25 \dots 1.49$ – показатель изэнтропы [1]).

В итоге получаем

$$p = K\mu + B\rho_0 e.$$

Уравнение состояния совершенного газа

$$p = (\ddot{i}_a - 1)\rho e \quad (2)$$

С учетом высказанных предположений $e_0 = \frac{p_{\max}}{(n_e - 1) \cdot \rho_0}$,

где $p_{\max} = 1.24 \dots 2.20$ ГПа – максимальное давление в ХАВ [1], тогда $e_0 = 0.89 \dots 2.23$ МДж/кг. Необходимо отметить, что числовое значение e_0 для ХАВ соизмеримо с аналогичным показателем взрывчатых веществ, например, для тротила $e_0 = 5.4$ МДж/кг.

В случае когда $A_1 = 0$, уравнение (1) вырождается в уравнение (3) близкое по своей сути к соотношению (2)

$$p = (\ddot{i}_a - 1)\rho_0 e \quad (3)$$

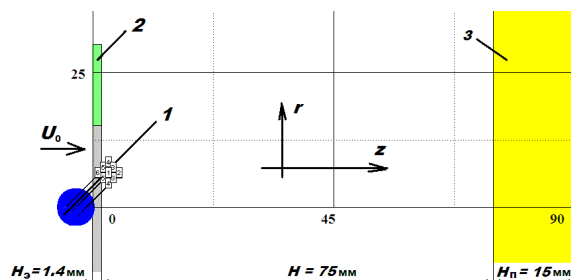


Рис.1. Расчетная схема, где 1 – высокоскоростная частица, движущаяся со скоростью U_0 , 2 – защитный экран из механохимически активных веществ, 3 – имитатор обшивки КА (преграда)

В качестве материала микрочастицы (рис. 1), как это принято, рассматривался алюминиевый сплав. Физико-механические свойства всех перечисленных материалов принимались следующими. Для алюминия – плотность $\rho_0 = 2.785$ г/см³, модуль объемного сжатия $K = 60.5$ ГПа, модуль сдвига $G = 27.3$ ГПа, динамический предел текучести $Y = 0.15$ ГПа. Для ХАВ $\rho_0 = 2.27 \dots 3.95$ г/см³, модуль объемного сжатия $K = 4.64 \dots 5.03$ ГПа.

Конкретные расчеты проводились для микрочастиц массой $m = 0.39$ г, движущихся со скоростью $U_0 = 2$ км/с. В качестве ХАВ использовался металлокомпозит на основе алюминия (массовая доля 26%) плотностью 2.27 г/см³. Остальные физико-механические константы принимались следующими [1]: $K = 5.03$ ГПа, $e_0 = 1.98$ МДж/кг, $p_{\max} = 2.2$ ГПа, $n_e = 1.49$.

Результаты выполненных расчетов представлены на рис. 2-5.

На рис. 2 показаны результаты взаимодействия микрочастицы с экраном из алюминиевого сплава АМг6. На рис. 3 – результаты взаимодействия микрочастицы с защитным экраном из ХАВ, описанным уравнения состояния (1). При этом принималось, что в начальный момент времени (момент соударения микрометеорита с экраном) химически активное вещество полностью срабатывалось с выделением внутренней энергии $e_0 = 1.98$.

На рис. 4 показаны результаты аналогичных расчетов взаимодействия микрочастицы с защитным экраном, в качестве которого также использовалось ХАВ, описываемое уравнением (1), но без реализации химического превращения, т.е. $e_0 = 0$.

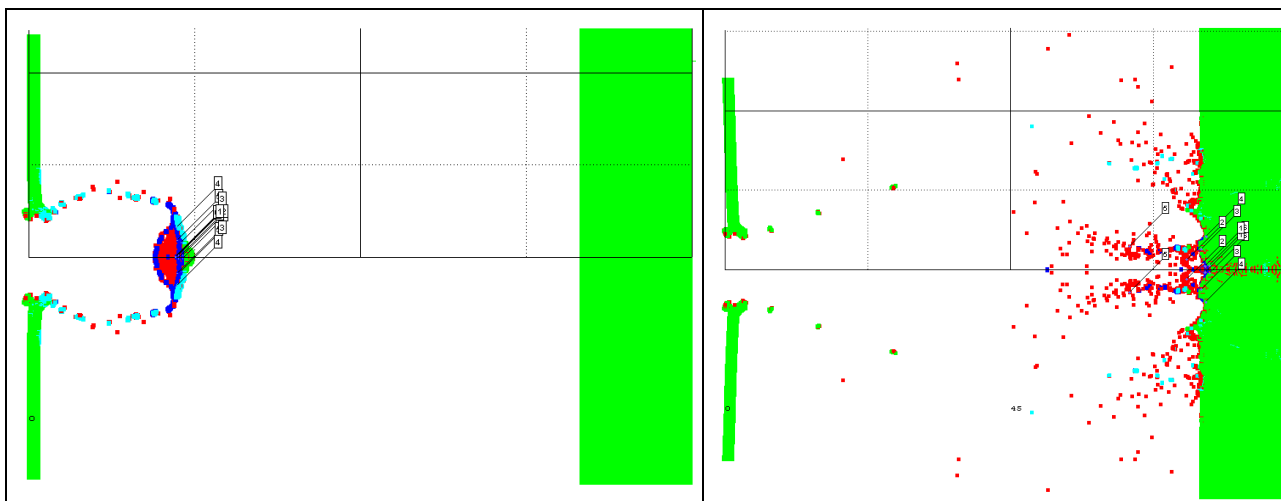


Рис. 2

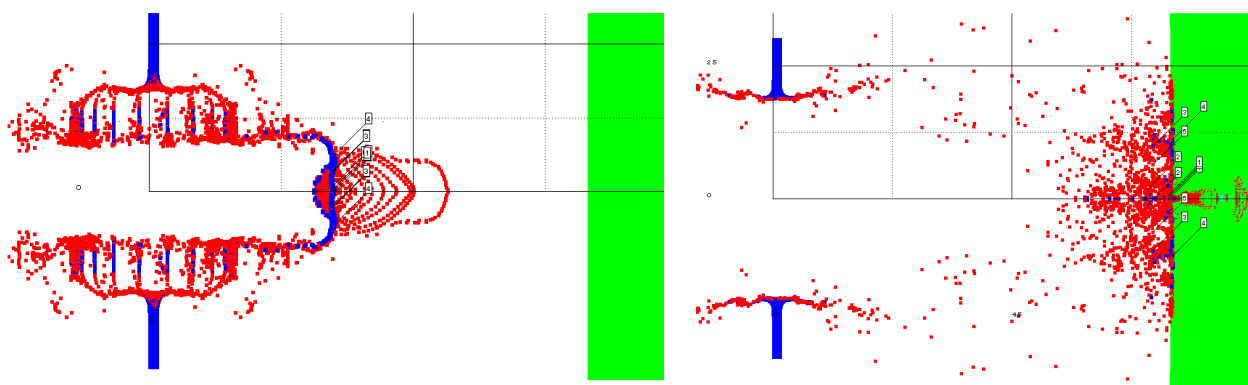


Рис. 3

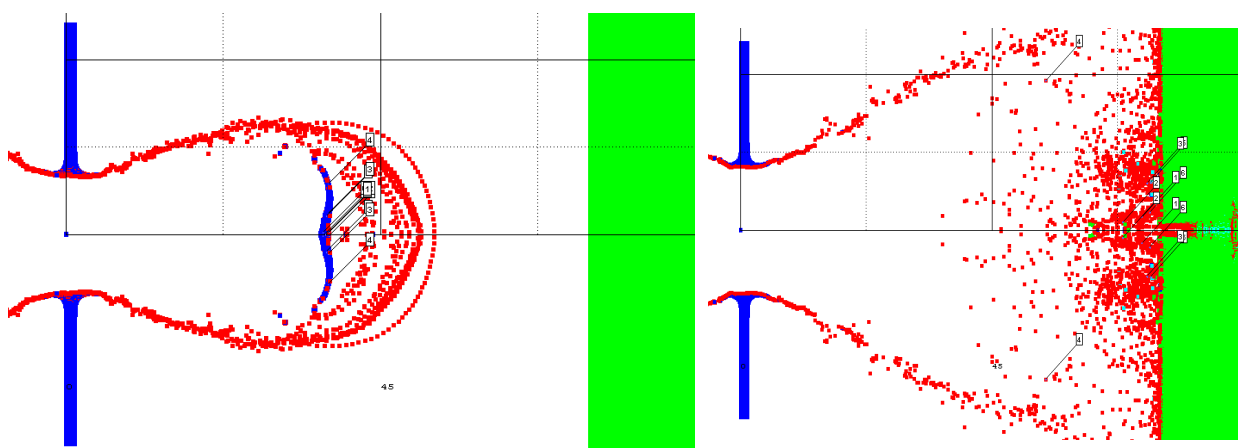


Рис. 4

Наконец на рис. 5 показаны результаты расчетов, в которых ХАВ описывалось уравнением совершенного газа (2). Здесь же отметим, что результаты расчетов с уравнением состояния (3) практически не отличались от результатов, показанных на рис. 5, поэтому здесь не представлены.

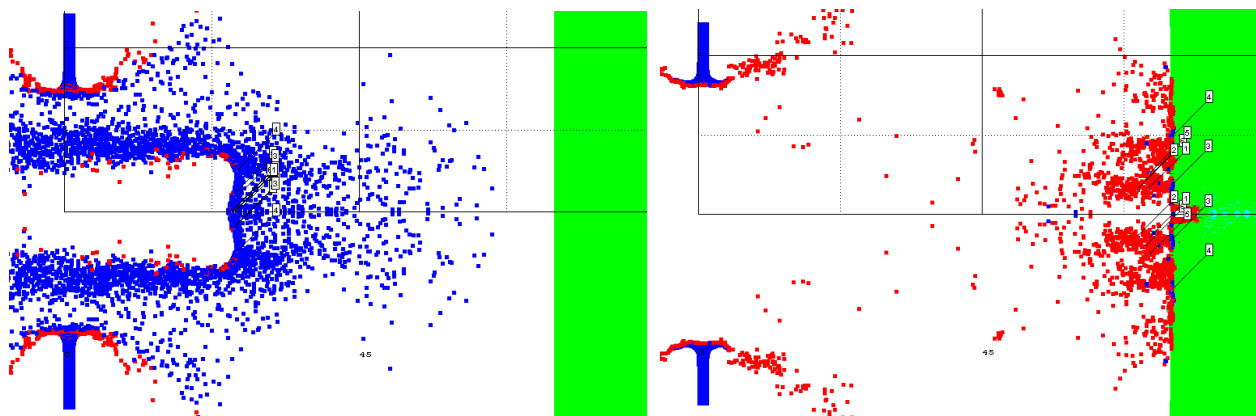


Рис. 5

На основании выполненного исследования можно сделать следующие выводы. Использование химически активных веществ в качестве экранной защиты космических аппаратов, по нашему мнению, можно считать перспективным направлением. Это утверждение основано на выявленной физике процесса, которая заключается в следующем. Внедрение высокоскоростных частиц в активные элементы защиты приводит к быстрому фазовому превращению, в результате которого повышается давление в зоне контакта до величин 1.2...2.6 ГПа. Это, в свою очередь, увеличивает разрушающее воздействие на внедряющуюся частицу (см. рис. 3), способствуя ее быстрому разрушению и более интенсивному радиальному разбросу. Однако использование этого способа защиты в реальных конструкциях требует более глубокого исследования для более широкого диапазона микрочастиц (в $U_0 = 2...9$ км/с, $m = 0.2...1$ г) и параметров ХАВ.

Список литературы

1. Новая концепция защиты космических аппаратов от микрометеороидов и орбитального мусора / А.И.Малкин [и др.] // ДАН. 2011. Т. 436, № 4. С. 470–473.
2. Численные методы в задачах физики взрыва и удара: Учебник для втузов. / А.В. Бабкин [и др.]. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. Т.3. 516с.
3. Селиванов В.В. Механика разрушения деформируемого тела: Учебник для втузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 420с.