

Сравнительный анализ стойкости защитных конструкций космических аппаратов на базе реакционноспособных материалов к ударному воздействию частиц космического мусора

© В.И. Колпаков, А.Ю. Любушкина, С.В. Ладов, С.В. Федоров

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация

Современные конструкции защиты космических аппаратов основаны на принципе ударной фрагментации частиц космической среды при взаимодействии с защитными экранами (бамперами). При этом одним из эффективных способов повышения стойкости такой защиты является изготовление защитных бамперов из реакционноспособных материалов (РМ). На основе численного моделирования с использованием программного комплекса ANSYS-AUTODYN в рамках решения двумерных осесимметричных задач механики сплошных сред проведено сравнение эффективности защитных свойств разнообразных двухслойных экранных конструкций с бамперами из РМ. В процессе моделирования установлено качественное превосходство гибридной структуры бампера, использующей РМ с различным составом металлического наполнителя и обеспечивающей интенсивное начальное дробление ударника. Для оптимальной конфигурации построены предельные баллистические кривые, показавшие, что предложенная конструкция существенно превосходит по защитной эффективности классический щит Уиппла с алюминиевым бампером, особенно в области высоких скоростей (свыше 6-7 км/с).

Ключевые слова: космический аппарат, космический мусор, метеороидная защита, реакционноспособные материалы, высокоскоростной удар, численное моделирование, предельная баллистическая кривая

Введение. Защита космических аппаратов (КА) от высокоскоростного ударного воздействия частиц орбитального мусора остается одной из ключевых задач обеспечения их долговременной и безопасной эксплуатации. Возможное решение данной проблемы — применение двухслойных экранных конструкций, называемых щитами Уиппла, которые состоят из внешнего тонкого экрана (бампера), расположенного на определенном расстоянии от основной задней стенки, представляющей собой герметичный корпус. Эффективность такой защиты основана на принципе ударной фрагментации космической среды при взаимодействии с защитными экранами, что позволяет распределить энергию фрагментированного потока частиц по значительной площади корпуса КА [1–9].

Однако, как показано ранее, в том числе в работе [10], передний экран, изготовленный, как правило, из алюминиевого сплава, после разрушения сам формирует поток вторичных осколков, что существенно снижает общую стойкость конструкции. Перспективное

направление для устранения данного недостатка — применение в качестве материала бампера реакционноспособных материалов [11]. Такие композиты, представляющие собой механические смеси фторопластовой матрицы с металлическим наполнителем, при ударном воздействии вступают в экзотермическую химическую реакцию. Выделяющаяся при этом энергия способствует дополнительному диспергированию, плавлению и испарению как материала ударника, так и продуктов разрушения самого бампера, что потенциально позволяет нейтрализовать их негативное воздействие.

Несмотря на отмеченные преимущества, требуются дальнейшие исследования вопросов, связанных с конструкцией бамперов из реакционноспособных материалов (РМ), в частности, такой малоизученный аспект, как влияние внутренней структуры (однородная или градиентная) бампера на общую эффективность диспергирования ударника. Кроме того, актуальной научной задачей является сравнительная оценка влияния материала наполнителя (например, алюминия по сравнению с более плотным вольфрамом) в составе РМ на защитные характеристики преграды в целом.

Цель работы — проведение сравнительного анализа эффективности защитных свойств бамперов из разнообразных реакционноспособных материалов разной структуры при высокоскоростном ударном воздействии.

При этом в качестве *основного метода исследования* процесса высокоскоростного ударного взаимодействия частиц космического мусора (КМ) использовано физико-математическое моделирование с применением численных методов механики сплошных сред, реализованных в программном комплексе ANSYS-AUTODYN [12].

Расчетная модель. При численном моделировании ударных и взрывных явлений необходимо учитывать и прочность, и сжимаемость твердой среды. При этом наиболее часто используются разнообразные модели упругопластической среды. Они базируются на фундаментальных законах сохранения массы, импульса и энергии, а также включают в себя кинематические и физические соотношения [13–18]. Задачи высокоскоростного соударения, как правило, рассматривают в адиабатическом приближении.

Для описания процессов интенсивного деформирования и дробления частиц КМ и элементов защитной конструкции использован метод SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics — сглаженных частиц) [19].

Расчетная схема. Рассматривалась двухслойная преграда, представляющая собой модифицированный щит Уиппла (рис. 1). При этом исследовались две принципиально разные конфигурации бампера T_1 .

Однородная структура (рис. 1, а) — бампер представлен в виде однородной упорядоченной структуры, состоящей из четырех рядов частиц диаметром $d = 0,3$ мм сферической и тороидальной формы.

Градиентная структура (рис. 1, б) — бампер имеет градиентную структуру, в которой ближний к ударнику ряд образован частицами сферической и тороидальной формы диаметром $d = 0,6$ мм, вдвое превышающем диаметр частиц в двух последующих рядах $d = 0,3$ мм. Суммарная толщина бампера в обеих конфигурациях одинакова.

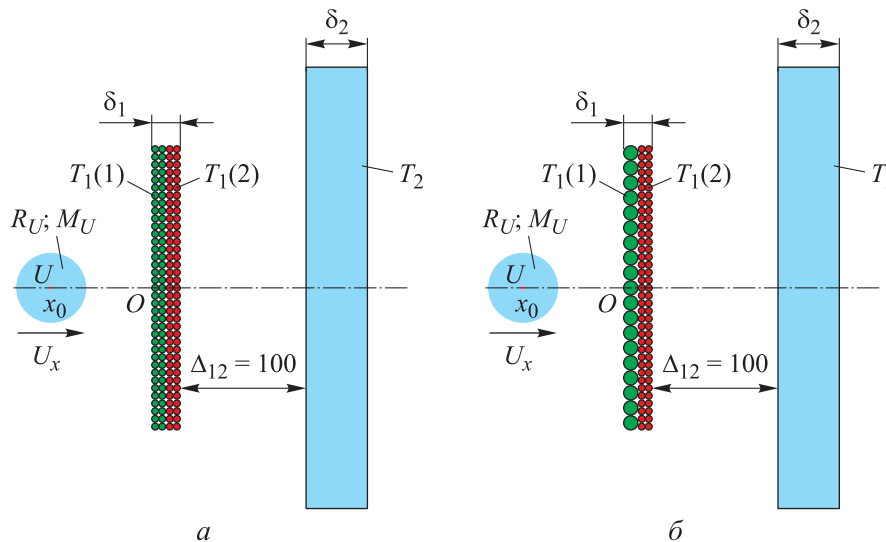


Рис. 1. Расчетные схемы ударного взаимодействия сферического ударника с двухслойной преградой, представлявшей собой бампер из РМ однородной (а) и градиентной структуры (б):

U — ударник в виде сферы из алюминиевого сплава Al 6061-T6; U_x — скорость ударника, $U_x = 3...14$ км/с; R_U, M_U — радиус и масса ударника; T_1 — бампер из РМ с наполнителем из алюминия или вольфрама; T_2 — задняя стенка преграды из Al 6061-T6; $\delta_1, \delta_2, \Delta_{12}$ — геометрические параметры преграды, $\delta_1 = 1,2$ мм, $\delta_2 = 3,2$ мм, $\Delta_{12} = 100$ мм

Физико-механические параметры взаимодействующих сред.

Материал ударника U и задней стенки T_2 описывался уравнением состояния в виде ударной адиабаты:

$$D_{\Phi} = C_1 + S_1 u,$$

где D_{Φ} — скорость распространения ударной волны (УВ) в ударно-сжатом веществе; u — массовая скорость за фронтом УВ.

Это позволяет вычислить давление в ударно-сжатом веществе посредством задания констант C_1 и S_1 [13].

Прочностные параметры описывались моделью Стейнберга — Гуинана (Steinberg — Guinan) [12, 18]. При этом в качестве критерия разрушения принят прочностной критерий предельных средних напряжений всестороннего растяжения. При динамических нагрузках — откольная прочность, для алюминиевых сплавов σ_p лежит в диапазоне от $-1,0$ до $-1,2$ ГПа [20, 21].

Поведение РМ описывалось полиномиальным уравнением состояния следующего вида [10, 22, 23]:

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

Здесь A_1, A_2, A_3, B_1, B_2 — коэффициенты, $A_1 = K_0, A_2 = A_3 = 0, B_0 = B_1 = (n_e - 1) K_0$ (K_0 — модуль объемного сжатия, $K_0 = 4,64 \dots 5,03$ ГПа, n_e — показатель изэнтропы, $n_e = 1,25 \dots 1,49$); $\mu = \rho/\rho_0 - 1$; e — удельная внутренняя энергия.

Основные механические и термодинамические характеристики металл — политетрафторэтилен стехиометрического состава, полученные в [11], представлены в табл. 1, где ρ_0 — начальная плотность; $p_{\max}$ — максимальное давление, реализуемое в момент химической реакции; e_0 — расчетная величина удельной внутренней энергии, выделяемой при соответствующей доле разложения композита, а именно при 25, 50, 75 и 100 %.

Таблица 1

Основные характеристики реакционноспособных материалов [10, 11, 22, 23]

Наполнитель	ρ_0 , г/см ³	K_0 , ГПа	$p_{\max}$, ГПа	n_e	e_0 , МДж/кг			
					25 %	50 %	75 %	100 %
Al	2,27	5,03	2,20	1,49	0,49	0,99	1,48	1,98
Be	2,17	4,68	2,61	1,54	0,56	1,11	1,67	2,23
Si	2,15	4,65	1,88	1,61	0,36	0,72	1,08	1,43
Zr	3,15	5,12	1,76	1,63	0,22	0,44	0,67	0,89
W	3,95	4,64	1,24	1,25	0,31	0,63	0,94	1,26

Максимальную величину удельной энергии химического превращения РМ можно оценить по формуле

$$e_0 = p_{\max} / ((n_e - 1)\rho_0),$$

где $p_{\max}$ — максимальное давление, реализуемое в РМ в процессе химической реакции, $p_{\max} = 1,24 \dots 2,20$ ГПа. Необходимо отметить, что максимальное числовое значение e_0 для РМ соизмеримо с аналогичным показателем взрывчатых веществ, например для тротила $e_0 = 5,4$ МДж/кг.

Моделирование фазового превращения РМ. Известно [11], что при высокоскоростном деформировании РМ реализуется химическое или фазовое превращение с большим выходом газообразных продуктов. Описание этого процесса осуществлялось в два этапа. При этом предполагалось, что химически активный материал реагирует мгновенно, а текущее время начала химической реакции (время химической активации) назначалось вручную.

Моделирование реакции. Для имитации реагирования компонентов РМ с разным временем химической активации назначались разные начальные значения удельной внутренней энергии химического превращения (см. табл. 1). Частицы $T_1(1)$, реагирующие на поздней стадии (после внедрения в ударник), имели начальное значение $e_{0(1)} = 0$, которое вручную переключалось на $e_{0(1)} = 1$ МДж/кг в момент времени, соответствующий фазе внедрения частиц бампера в ударник ($\sim 0,35$ мкс). Частицам бампера $T_1(2)$, реагирующим на ранней стадии (практически в момент соударения), числовые значения удельной внутренней энергии задавались равными $e_{0(1)} = 1$ МДж/кг в начальный момент времени.

Эффект сгорания. Для устранения негативного влияния продуктов разрушения бампера на заднюю стенку и имитации их полного сгорания в зазоре между бампером T_1 и задней стенкой T_2 (см. рис. 1), все частицы бампера удалялись из расчета в момент начала их подлета к стенке T_2 .

Начальные и граничные условия. В качестве начальных условий, помимо распределения удельной внутренней энергии химического превращения для бампера T_1 , задавалась начальная скорость ударника U_x в диапазоне 3...14 км/с. Кроме того, задняя стенка T_2 была закреплена с помощью условия заделки на крайней верхней поверхности.

Анализ результатов моделирования. Для визуальной оценки эффективности исследуемых конфигураций бампера был проведен анализ ключевых стадий ударного взаимодействия, а именно начального контакта и финального воздействия на заднюю стенку.

Начальная стадия — механизм ударного внедрения. При сравнении стадий ударного взаимодействия (рис. 2) выявлено принципиальное различие в механизмах начального разрушения ударника для двух исследуемых конфигураций бампера.

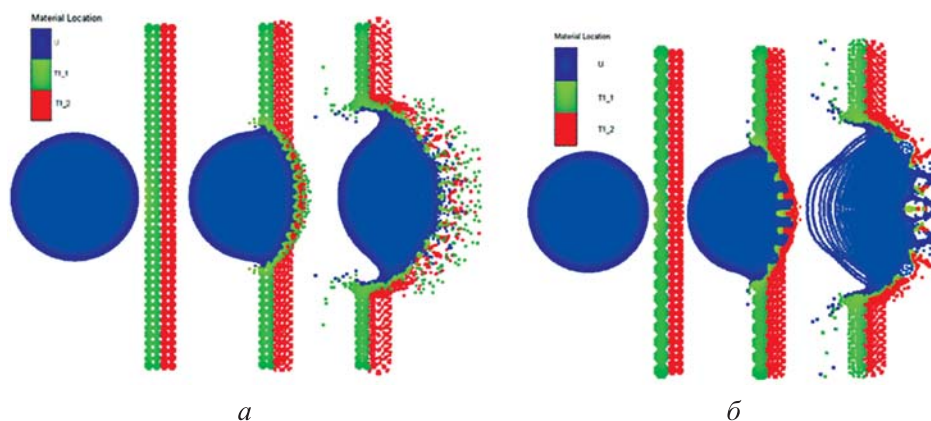


Рис. 2. Момент начальной стадии ударного внедрения частиц бампера в материал ударника:

a — однородная структура; *б* — градиентная структура

Взаимодействие ударника с *однородной структурой* (рис. 2, а), состоящей исключительно из частиц малого диаметра ($d = 0,3$ мм), приводит в основном к пластической деформации ударника без его эффективного объемного разрушения.

В случае *градиентной структуры* (рис. 2, б) четко наблюдается эффект интенсивного локального внедрения крупных частиц ($d = 0,6$ мм) внешнего ряда в тело ударника, которые создают зоны концентрации напряжений и инициируют крупнофрагментное дробление ударника уже на начальной стадии.

Диспергирование ударника и последующее взаимодействие потока частиц с задней стенкой, имитирующей корпус КА. Сравнение динамики ударного взаимодействия с рассматриваемой экранной защитой (рис. 3) позволяет выделить два ключевых преимущества градиентной структуры бампера.

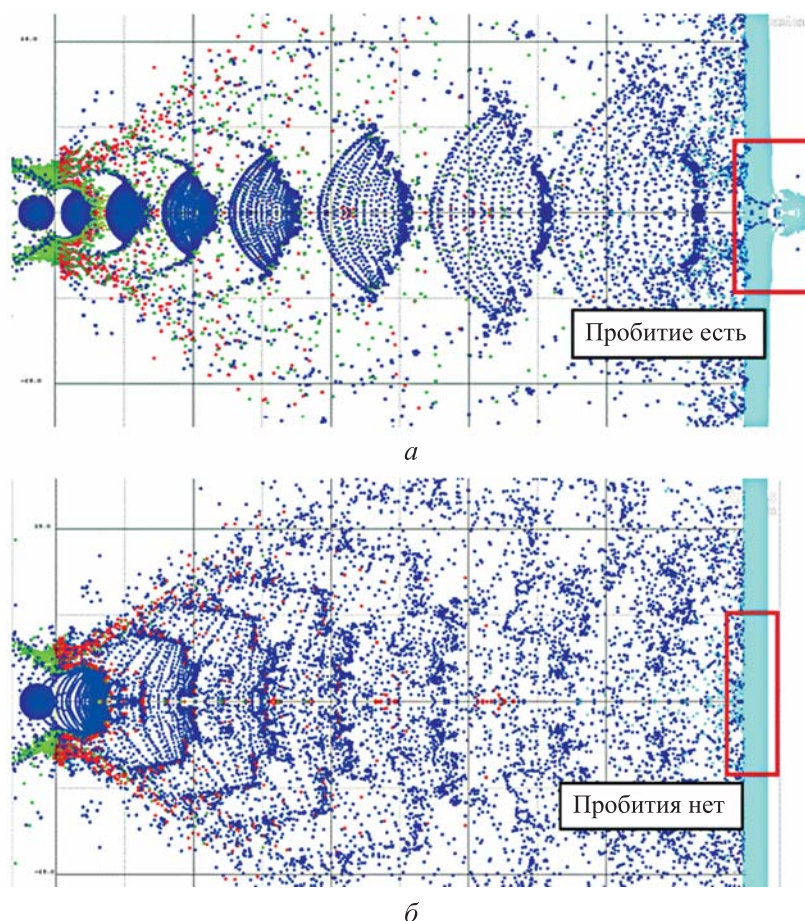


Рис. 3. Высокоскоростное взаимодействие сферической частицы диаметром 5 мм, движущейся со скоростью $U = 5$ км/с, с передней и задней стенками КА для двух конфигураций бампера:

а — однородная структура; б — градиентная структура

Характер диспергирования потока. Для градиентной структуры (рис. 3, б) характерно формирование облака фрагментов со значительно более высокой степенью диспергирования. Интенсивный боковой разлет, обусловленный внедрением тяжелых частиц РМ в тело ударника (см. рис. 2), приводит к многократному снижению пространственной плотности и кинетической энергии потока, воздействующего на единицу площади задней стенки T_2 .

Характер повреждения задней стенки. Анализ финального состояния преграды демонстрирует принципиальное различие в степени повреждения задней стенки T_2 (корпуса КА). В случае однородной структуры бампера (рис. 3, а) наблюдается сквозное пробитие задней стенки с выходом частиц ударника за ее пределы. В случае градиентной структуры бампера (рис. 3, б) повреждения задней стенки ограничиваются незначительной пластической деформацией зоны воздействия при полном отсутствии сквозного пробития и откольных разрушений.

Оценка эффективности защитных структур. Результаты численного моделирования демонстрируют качественное превосходство градиентной структуры бампера из реакционноспособного материала над однородной. Ключевое преимущество градиентной структуры заключается в интенсивном разрушении ударника на крупные фрагменты уже на начальной стадии соударения, что приводит к формированию сильно раздробленного и диспергированного облака осколков. Это позволяет градиентной структуре полностью предотвращать сквозное пробитие задней стенки в тех же условиях, в которых однородная структура приводит к ее пробитию, что подтверждает перспективность такой структуры для создания высокоэффективных защитных конструкций.

Анализ влияния материала наполнителя на защитную эффективность. После определения преимущества использования градиентной структуры бампера осуществлялась количественная оценка влияния материала наполнителя на защитные характеристики преграды в целом. При этом исследовались три конфигурации градиентного бампера, идентичных по геометрии, но различающихся составом наполнителя, а именно *конфигурация W+W* (частицы $T_1(1)$ и $T_1(2)$ с наполнителем из вольфрама); *конфигурация Al+Al* (частицы $T_1(1)$ и $T_1(2)$ с наполнителем из алюминия) и *конфигурация W+Al* (гибридная структура, в которой частицы $T_1(1)$ с наполнителем из вольфрама, а частицы $T_1(2)$ с наполнителем из алюминия).

Для оценки эффективности разных конфигураций использовался предельный баллистический порог d_{lim} , определяемый как наименьший

диаметр сферического ударника из алюминиевого сплава Al 6061-T6, при котором режим откола на тыльной стороне задней стенки сменяется ее сквозным пробитием. Расчеты выполнялись для сферического ударника на скорости соударения $U_x = 6$ км/с. Предельный баллистический порог d_{lim} для разных конфигураций наполнителя: W+W — 5,9; Al+Al — 6,4; W+Al — 6,6.

На основании полученных результатов для дальнейшего анализа была выбрана гибридная конфигурация бампера, где использованы элементы с наполнителем из вольфрама и алюминия (W+Al), обладающая наилучшими защитными свойствами. Для нее с целью построения предельных баллистических кривых проведено параметрическое исследование в диапазоне скоростей $U_x = 3 \dots 14$ км/с.

Построение предельных баллистических кривых, характеризующих пробитие двухслойной преграды сферическими ударниками. Итоговые баллистические кривые ($dU-U_x$) и ($MU-U_x$), характеризующие пробитие двухслойных преград сферическими ударниками из алюминиевого сплава Al 6061-T6 в диапазоне скоростей $U_x = 3 \dots 14$ км/с, представлены на рис. 4. На этом же рисунке для сравнения приведены кривые для монолитной преграды толщиной 4,4 мм (кривая 1) и двухслойного щита Уиппла той же массы с алюминиевым бампером (кривые 2, 3, 4) [7, 10], которые можно использовать в качестве опорных зависимостей. Кривые 5 и 6 получены расчетным путем в данной работе. Причем кривые 3, 5 соответствуют сквозному пробитию преграды, а кривые 4, 6 — ударному взаимодействию без сквозного пробития и без откола в задней стенке преграды. Область между кривыми 5 и 6 соответствует отколу в преграде без сквозного пробития. Отдельные расчеты в этой области обозначены ▲ (см. рис. 4, б).

Следует отметить, что ранее, в частности, в работе [7], в качестве границы выхода из строя защитных конструкций использовались кривые, разделяющие между собой рабочую область с областью, в которой потеряна герметичность конструкции — предельные баллистические кривые. В данной работе с этой же целью вместо баллистических кривых в зависимости от функционального назначения КА предложено использовать либо область, ограниченную двумя кривыми (см. рис. 4, кривые 5 и 6), разделяющими между собой соответственно область сквозного пробития преграды, область откола на тыльной стороне преграды (когда сквозного пробития не происходит и герметичность конструкции сохранена) и область безопасной работы, в которой отсутствуют откольные эффекты и не нарушена герметичность конструкции, либо одну из выше описанных кривых — 5 или 6. При этом кривая 5 существенно расширяет область безопасной работы КА, а кривая 6, наоборот, существенно сужает ее [10].

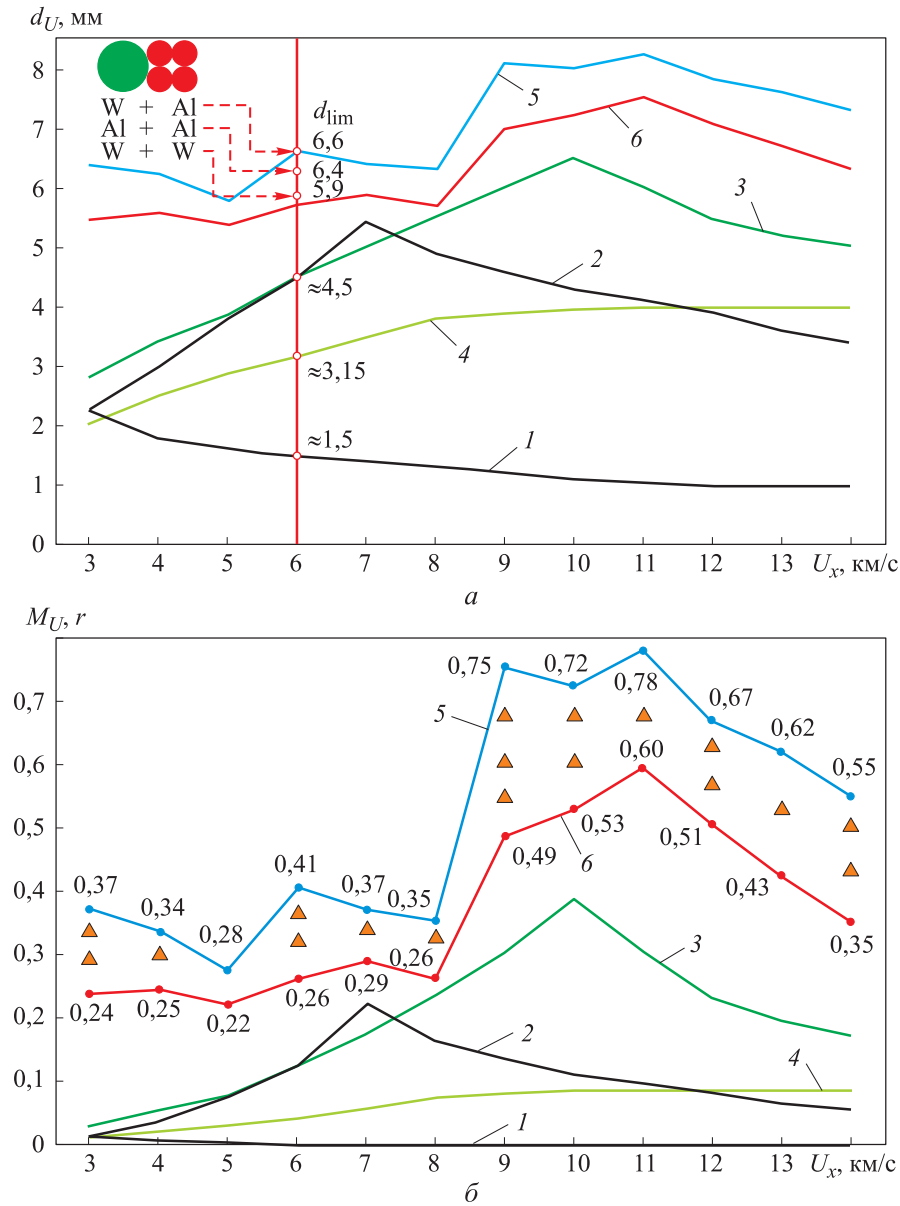


Рис. 4. Баллистические кривые d_U-U_x (а) и M_U-U_x (б), характеризующие защитные свойства щитов Уиппла (см. рис. 1), использующих бамперы из разных материалов (см. рис. 1), по отношению к воздействию алюминиевых сферических ударников (d_U, M_U) в диапазоне скоростей $U_x = 3 \dots 14$ км/с:

1, 2 — базовые кривые, соответствующие монолитной преграде толщиной 4,4 мм (1) и разнесенной преграде (1,2 мм + 100 мм + 3,2 мм) из Al 6061-T6 (2) [7]; 3, 4 — расчетные зависимости для разнесенной преграды с алюминиевым бампером (кривая 3 соответствует сквозному пробитию преграды, кривая 4 — ударному взаимодействию без сквозного пробития и без откола в задней стенке преграды) [10]; 5, 6 — аналогичные расчетные зависимости для разнесенной преграды со сгорающим бампером из реакционноспособного материала гибридной конфигурации бампера W+Al (кривая 5 соответствует сквозному пробитию преграды, кривая 6 — ударному взаимодействию без сквозного пробития и без откола в задней стенке преграды)

Заключение. Таким образом, на основе численного моделирования в рамках решения двумерных осесимметричных задач механики сплошных сред, выполненного с применением программного комплекса ANSYS-AUTODYN, представлена для сравнения эффективность защитных свойств двухслойных экранных конструкций космических аппаратов с бамперами из реакционноспособных материалов разной структуры и состава. В процессе моделирования установлено качественное превосходство градиентной структуры бампера над однородной. Показано, что градиентная конфигурация, использующая крупные частицы $T_1(1)$ во внешнем ряду (обращенном к ударнику), инициирует интенсивное дробление ударника на начальной стадии взаимодействия, что приводит к формированию высокодисперсного потока фрагментов и полностью предотвращает сквозное пробитие задней стенки в тех же условиях нагружения, при которых использование однородной структуры приводит к ее сквозному пробитию.

Проведенный сравнительный анализ влияния материала наполнителя частиц бампера выявил наилучшую эффективность гибридной конфигурации W+Al. Установлено, что ее предельный баллистический порог d_{lim} составляет 6,6 мм при скорости 6 км/с, что превышает показатели чисто вольфрамового аналога на 10,6 % и чисто алюминиевого аналога на 3,0 %. Синергетический эффект данной конфигурации заключается в сочетании мощного импульсного воздействия вольфрамовых частиц $T_1(1)$ и реакционной способности алюминиевых частиц $T_1(2)$. Для оптимальной гибридной конфигурации W+Al построены предельные баллистические кривые в диапазоне скоростей 3...14 км/с. Показано, что предложенная конструкция (кривые 5, 6) обладает наибольшей стойкостью, существенно превосходя по защитной эффективности как монолитный экран, так и классический щит Уиппла с алюминиевым бампером (кривые 1–4). Наибольший положительный эффект при этом наблюдается в области высоких скоростей — свыше 6...7 км/с. Таким образом, использование градиентных бамперов из реакционноспособного материала гибридного состава W+Al представляет собой перспективное направление для создания высокоэффективных защитных конструкций космических аппаратов, обеспечивающих значительное повышение стойкости к высокоскоростному ударному воздействию частиц космического мусора.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Вениаминов С.С., Червонов А.М. *Космический мусор — угроза человечеству*. Москва, ИКИ РАН, 2012, 192 с.
- [2] Шустов Б.М. О фундаментальных исследованиях по проблеме космического мусора. *Всероссийская научная конференция с международным участием «Космический мусор: фундаментальные и практические аспекты угрозы»*. Москва, ИКИ РАН, 2019, с. 7–14.

- [3] Назаренко А.И. *Моделирование космического мусора*. Москва, ИКИ РАН, 2013, 216 с.
- [4] Зеленцов В.В. Проблемы мелкого космического мусора. *Наука и образование: электронное научно-техническое издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2015, № 4, с. 89–104. DOI: 10.7463/0415.0764904
- [5] Зеленцов В.В. Защита космического аппарата от воздействия фрагментов мелкого космического мусора. *Наука и образование: электронное научно-техническое издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2015, № 6, с. 123–142. DOI: 10.7463/0615.0778339
- [6] Christiansen E.L. Meteoroid / Debris Shielding. *NASA TP-2003-210788*. Johnson Space Center, Houston, Texas (USA), 2003, 99 p.
- [7] Christiansen E.L. Handbook for Designing MMOD Protection. *NASA JSC-64399 (Version A)*. Johnson Space Center, Houston, Texas (USA), 2009, 135 p.
- [8] Christiansen E.L. Design and performances equations for advanced meteoroid and debris shield. *International Journal of Impact Engineering*, 1993, vol. 14, pp. 145–156.
- [9] Whipple F.L. Meteorites and space travel. *Astron J.*, 1947, vol. 52, pp. 132–137.
- [10] Колпаков В.И., Федоров С.В., Виноградова Е.П. Анализ стойкости защитных конструкций космических аппаратов к высокоскоростному воздействию частиц орбитального мусора. *Наука и образование: электронное научно-техническое издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2014, № 4. DOI: 10.18698/2308-6033-2024-3-2344
- [11] Малкин А.И., Занозин В.М., Кононенко М.М., Топоров Ю.П., Шумихин Т.А., Цивадзе А.Ю. Новая концепция защиты космических аппаратов от микрометеороидов и орбитального мусора. *Доклады Академии наук*, 2011, т. 436, № 4, с. 470–473.
- [12] *AUTODYN theory manual revision*. Century Dynamics Inc. California, USA, 2005, 235 p.
- [13] Орленко Л.П., ред. *Физика взрыва*. Изд. 3-е, испр. В 2-х т. Т. 2. Москва, Физматлит, 2004, 656 с.
- [14] Фомин В.М., ред. *Высокоскоростное взаимодействие тел*. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 1999, 600 с.
- [15] Герасимов А.В., ред. *Высокоскоростной удар. Моделирование и эксперимент*. Томск, Изд-во НТЛ, 2016, 568 с.
- [16] Walters W.P., Zukas J.A. *Fundamentals of Shaped Charges*. New York, John Wiley & Sons Inc., 1989, 389 p.
- [17] Бабкин А.В., Колпаков В.И., Охитин В.Н., Селиванов В.В. *Численные методы в задачах физики быстротекающих процессов*. 3-е изд. испр. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021, 370 с.
- [18] Жерноклетов М.В., ред. *Методы исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках: Монография*. Саров, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2005, 428 с.
- [19] Паршиков А.Н. Применение решения задачи Римана в методе частиц. *Журнал вычислительной математики и математической физики*, 1999, т. 39, № 7, с. 1216–1225.
- [20] Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортов В.Е. *Ударно-волновые явления в конденсированных средах*. Москва, «Янус-К», 1996, 408 с.
- [21] Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортов В.Е. *Экспериментальные профили ударных волн в конденсированных веществах*. Москва, Физматлит, 2008, 248 с.
- [22] Колпаков В.И., Васильева Т.В. *Моделирование ударного взаимодействия высокоскоростных частиц с элементами конструкции экранной защиты*

космического аппарата. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017, 48 с.

- [23] Колпаков В.И., Федоров С.В., Ладов С.В. Численный анализ взаимодействия алюминиевых частиц космического мусора с двухслойными защитными экранами. *X Всероссийская конференция «Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике: тезисы докладов»*. Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева. Новосибирск, СО РАН, 2025, 202 с.

Статья поступила в редакцию 02.02.2026

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Колпаков В.И., Любушкина А.Ю., Ладов С.В., Федоров С.В. Сравнительный анализ стойкости защитных конструкций космических аппаратов на базе реакционноспособных материалов к ударному воздействию частиц космического мусора. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2026, вып. 3. EDN PSDELZ

Колпаков Владимир Иванович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана; автор более 200 научных работ в области физики взрыва и технологии ракетно-космического машиностроения. e-mail: kolpakovv@bmstu.ru

Любушкина Анастасия Юрьевна — студентка кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана.
e-mail: lyubkyshkina2002@mail.ru

Ладов Сергей Вячеславович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана, член-корр. РАН, доцент; автор более 300 научных работ в области физики взрыва и высокоскоростного удара.
e-mail: ladovsv@bmstu.ru

Фёдоров Сергей Владимирович — старший преподаватель кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана; автор более 300 научных работ в области физики взрыва и высокоскоростного удара.
e-mail: fedorovsv@bmstu.ru

Comparative Analysis of the Resistance of Spacecraft Protective Structures Based on Reactive Materials to the Impact of Space Debris Particles

© V.I. Kolpakov, A.Yu. Lyubkyskhina, S.V. Ladov, S.V. Fedorov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

Modern spacecraft protection designs are based on the principle of impact fragmentation of space environment particles interacting with protective shields (bumpers). One of the effective ways to increase the durability of such protection is to manufacture protective bumpers from reactive materials (RM). This article, based on numerical modeling using the ANSYS-AUTODYN software package for solving two-dimensional axisymmetric problems of continuum mechanics, presents a comparison of the protective properties of various two-layer shield structures with RM bumpers. The modeling process established the qualitative superiority of a hybrid bumper structure using RM with different metallic filler compositions and ensuring intensive initial fragmentation of the impactor. Limit ballistic curves were constructed for the optimal configuration, demonstrating that the proposed design significantly outperforms the classic Whipple shield with an aluminum bumper in terms of protective effectiveness, especially at high speeds (over 6-7 km/s).

Keywords: spacecraft, space debris, meteoroid shielding, reactive materials, high-speed impact, numerical modeling, ballistic limit curve

REFERENCES

- [1] Veniaminov S.S., Chervonov A.M. *Kosmicheskii musor — ugroza chelovechestvu* [Space Debris — a Threat to Humanity]. Moscow, IKI RAN, 2012, 192 p.
- [2] Shustov B.M. O fundamentalnykh issledovaniyakh po probleme kosmicheskogo musora [On Fundamental Research on the Space Debris Problem]. In: *Vse-rossiyskaya nauchnaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem "Kosmicheskii musor: fundamentalnye i prakticheskie aspekty ugrozy"* [All-Russian Scientific Conference with International Participation "Space Debris: Fundamental and Practical Aspects of the Threat"]. Moscow, IKI RAN, 2019, pp. 7–14.
- [3] Nazarenko A.I. *Modelirovanie kosmicheskogo musora* [Modeling of Space Debris]. Moscow, IKI RAN, 2013, 216 p.
- [4] Zelentsov V.V. Problemy melkogo kosmicheskogo musora [Problems of Small Space Debris]. *Nauka i obrazovanie: elektronnoe nauchno-tekhnicheskoe izdanie — Science and Education: Electronic Scientific-Technical Journal, MGTU im. N.E. Bauman*, 2015, no. 4, pp. 89–104.
<https://doi.org/10.7463/0415.0764904>
- [5] Zelentsov V.V. Zashchita kosmicheskogo apparata ot vozdeystviya fragmentov melkogo kosmicheskogo musora [Spacecraft Protection against Small Space Debris Impacts]. *Nauka i obrazovanie: elektronnoe nauchno-tekhnicheskoe izdanie — Science and Education: Electronic Scientific-Technical Journal, MGTU im. N.E. Bauman*, 2015, no. 6, pp. 123–142.
<https://doi.org/10.7463/0615.0778339>
- [6] Christiansen E.L. Meteoroid / Debris Shielding. *NASA TP-2003-210788*. Johnson Space Center, Houston, Texas, USA, 2003, 99 p.
- [7] Christiansen E.L. Handbook for Designing MMOD Protection. *NASA JSC-64399 (Version A)*. Johnson Space Center, Houston, Texas, USA, 2009, 135 p.

- [8] Christiansen E.L. Design and Performance Equations for Advanced Meteoroid and Debris Shield. *International Journal of Impact Engineering*, 1993, vol. 14, pp. 145–156.
- [9] Whipple F.L. Meteorites and Space Travel. *Astron. J.*, 1947, vol. 52, pp. 132–137.
- [10] Kolpakov V.I., Fedorov S.V., Vinogradova E.P. Analiz stoykosti zashchitnykh konstruktivnykh kosmicheskikh apparatov k vysokoskorostnomu vozdeystviyu chas-tits orbitalnogo musora [Analysis of the Resistance of Spacecraft Protective Structures to High-Velocity Orbital Debris]. *Nauka i obrazovanie: elektronnoe nauchno-tehnicheskoe izdanie — Science and Education: Electronic Scientific-Technical Journal, MGTU im. N.E. Bauman*, 2014, no. 4. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2024-3-2344>
- [11] Malkin A.I., Zanozin V.M., Kononenko M.M., Toporov Yu.P., Shumikhina T.A., Tsivadze A.Yu. Novaya kontseptsiya zashchity kosmicheskikh apparatov ot mikrometeoroidov i orbital'nogo musora [New Concept of Spacecraft Protection against Micrometeoroids and Orbital Debris]. *Doklady Akademii Nauk — Reports of the Russian Academy of Sciences*, 2011, vol. 436, no. 4, pp. 470–473.
- [12] Century Dynamics Inc. *AUTODYN Theory Manual Revision*. California, USA, 2005, 235 p.
- [13] Orlenko L.P., red. Fizika vzryva [Physics of Explosions]. 3rd ed., Moscow, Fizmatlit, 2004, 656 p.
- [14] Fomin V.M., red. *Vysokoskorostnoe vzaimodeystvie tel* [High-Speed Interaction of Bodies]. Novosibirsk, SO RAN, 1999, 600 p.
- [15] Gerasimov A.V., red. *Vysokoskorostnoy udar: modelirovanie i eksperiment* [High-Velocity Impact: Modeling and Experiment]. Tomsk, NTL Publ., 2016, 568 p.
- [16] Walters W.P., Zukas J.A. *Fundamentals of Shaped Charges*. New York, John Wiley & Sons Inc., 1989, 389 p.
- [17] Babkin A.V., Kolpakov V.I., Okhitin V.N., Selivanov V.V. *Chislennyye metody v zadachakh fiziki bystroprotekaushchikh protsessov* [Numerical Methods in Fast Dynamic Processes]. 3rd ed. Moscow, BaumanPress, 2021, 370 p.
- [18] Zhernokletov M.V., red. *Metody issledovaniya svoystv materialov pri intensivnykh dinamicheskikh nagruzkakh* [Methods for Studying Material Properties under Intense Dynamic Loads]. Sarov, RFNC–VNIIEF, 2005, 428 p.
- [19] Parshikov A.N. Primenenie resheniya zadachi Rimana v metode chastits [Application of Riemann Problem Solution in Particle Method]. *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki — Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 1999, vol. 39, no. 7, pp. 1216–1225.
- [20] Kanel G.I., Razorenov S.V., Utkin A.V., Fortov V.E. *Udarno-volnovye yavleniya v kondensirovannykh sredakh* [Shock-Wave Phenomena in Condensed Media]. Moscow, Yanus-K, 1996, 408 p.
- [21] Kanel G.I., Razorenov S.V., Utkin A.V., Fortov V.E. *Eksperimentalnye profili udarnykh voln v kondensirovannykh veshchestvakh* [Experimental Profiles of Shock Waves in Condensed Media]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008, 248 p.
- [22] Kolpakov V.I., Vasilieva T.V. *Modelirovanie udarnogo vzaimodeystviya vysokoskorostnykh chastits s elementami konstruktivnoy ekrannoy zashchity kosmicheskogo apparata* [Modeling Impact Interaction of High-Speed Particles with Protective Screens of Spacecraft]. Moscow, BaumanPress, 2017, 46 p.
- [23] Kolpakov V.I., Fedorov S.V., Ladov S.V. Chislennyy analiz vzaimodeystviya alyuminiyevykh chastits kosmicheskogo musora s dvukhsloynnymi zashchitnymi ekranami [Numerical Analysis of Aluminum Space Debris Particles Interaction with Double-Layer Protective Screens]. In: *X Vserossiyskaya konferentsiya “Lavrentievskie chteniya po matematike, mekhanike i fizike”* [10th All-Russian Conference “Lavrentiev Readings on Mathematics, Mechanics, and Physics”], Novosibirsk, IGD SB RAN, 2025, pp. 202.

Kolpakov V.I., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Technologies of Rocket and Space Engineering, Bauman Moscow State Technical University; author of more than 200 works in the explosion physics, rocket and space engineering technologies.
e-mail: kolpakovv@bmstu.ru

Lyubkyshkina A.Yu., Student of the Department of Rocket and Space Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University.
e-mail: lyubkyshkina2002@mail.ru.

Ladov S.V., Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Department of High-Accuracy Aircraft, Bauman Moscow State Technical University, Corresponding Member of the Russian Academy of Rocket and Missile Sciences, Associate Professor; author of more than 300 scientific papers in the field of explosion physics and high-speed impact.
e-mail: ladovsv@bmstu.ru

Fedorov S.V., Senior Lecturer, Department of High-Accuracy Aircraft, Bauman Moscow State Technical University; author of more than 300 works in explosion physics and high-speed impact. e-mail: fedorovsv@bmstu.ru