

Исследование взаимодействия частиц космического мусора с элементами конструкции космического аппарата

Екименко А.А., Михайлов Д.Ю.*

*Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,
ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198, Россия*

**e-mail: mdyu@mail.ru*

Статья поступила 02.07.2021

Аннотация

В статье приведены результаты исследования воздействия частиц на конструкцию космического аппарата. Рассмотрен процесс образования кратеров, эквивалентных напряжений при скоростях 1, 1.5 и 2 км/с. Представлены графики полных напряжений по толщине преграды и изменение глубины кратеров по времени.

Ключевые слова: космический мусор, высокоскоростное воздействие, кратер, космический аппарат.

Введение

В процессе функционирования космические аппараты (КА) постоянно подвергаются воздействию внешних факторов, приводящих к деградации конструкции и внешних элементов. Такое воздействие в результате приводит к изменению оптических свойств материалов, изменению физико-механических свойств конструкционных материалов, образованию кратеров и сквозному пробою стенок, в следствии чего происходит нарушение работы как отдельных бортовых систем, так и КА в целом, что представляет собой весьма актуальную задачу.

Одним из воздействующим фактором на КА является поток космических пылевых частиц и загрязнение космического пространства частицами космического мусора, имеющие различные скорости. Диапазон размеров космического мусора и пылевых частиц варьируется от нескольких микрометров до десятки метров. Твердые частицы с размерами менее 1 мм рассматриваются как постоянный воздействующий фактор, характеризующийся плотностью их потока. Также не менее важным параметром космического мусора является форма частиц [1-7].

Постановка задачи численного эксперимента

В работе в качестве объекта исследования как элемента КА рассматривается результат взаимодействия двухслойного покрытия при ударе с частицей космического мусора, размеры которой на много меньше толщины покрытия. Покрытие в виде двух пластин из композитного защитного экрана и алюминиевой пластины, представлены на рисунке 1.

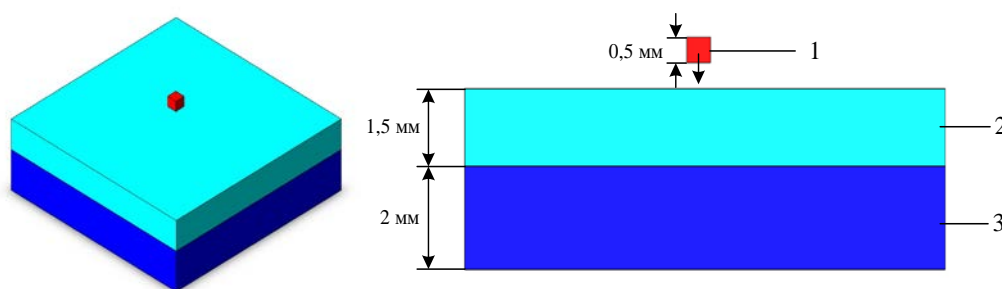


Рис. 1. Схема численного эксперимента:

1 – частица (сталь 09Г2С); 2 – защитный экран (эпоксидный слой);

3 – конструкция КА (алюминий АМг4).

Для выполнения такого рода численных экспериментов применяется различное специализированное программное обеспечение, которое позволяет решать уравнения

сплошной среды с учетом интенсивного динамического воздействия. Степень достоверности получаемых результатов во многом зависит от типа математических моделей быстроменяющихся параметров деформируемого тела. Основными факторами, которые необходимо учесть в процессе ударного взаимодействия, являются: зависимость радиуса поверхности текучести от скорости деформации, нагрев материала и снижение механических характеристик в области удара [8,9].

Для описания движения сплошной среды использовался метод Лагранжа. Его суть заключается в том, что узлы конечно-элементной сетки жестко связаны ребрами и в совокупности образуют ее ячейки. При этом сетка деформируется и перемещается вместе со сплошной средой. Основным преимуществом данного подхода является возможность достаточно легко отслеживать границы раздела материалов.

Для описания разрушения материала использовали модель Джонсона–Кука [5, 9-11], согласно которой предел текучести определяется формулой (1):

$$\sigma_Y = \left(A + B \varepsilon_p^n \right) \left(1 + c \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p^n}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left(1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right), \quad (1)$$

где ε_p - эффективная пластическая деформация, T_m - температура плавления, T_r - температура окружающей среды, $A, B, c, n, m, \varepsilon_0$ - параметры модели.

Согласно модели Джонсона–Кука разрушение конечного элемента материала происходит с применением модели, когда параметр поврежденности D становится равным единице (2):

$$D = \frac{1}{\varepsilon_f} \sum_i \Delta \varepsilon_p^i, \quad (2)$$

где $\Delta \varepsilon_p^i$ – приращение эффективной пластической деформации в конечном элементе на i -м шаге интегрирования по времени. Величина ε_f вычисляется по формуле (3):

$$\varepsilon_f = \left(D_1 + D_2 \exp \left(D_3 \frac{p}{\sigma_{ef}} \right) \right) \left(1 + D_4 \ln \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_0} \right) \left(1 + D_5 \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right), \quad (3)$$

где D_1, \dots, D_5 — параметры материала, σ_{ef} - эффективное напряжение, p – давление в рассматриваемом конечном элементе.

Значения параметров D_1, \dots, D_5 , для различных марок материалов существенно различаются и зависят от условий конкретного эксперимента. В данной работе значения параметров D соответствуют стали и алюминию [11–20].

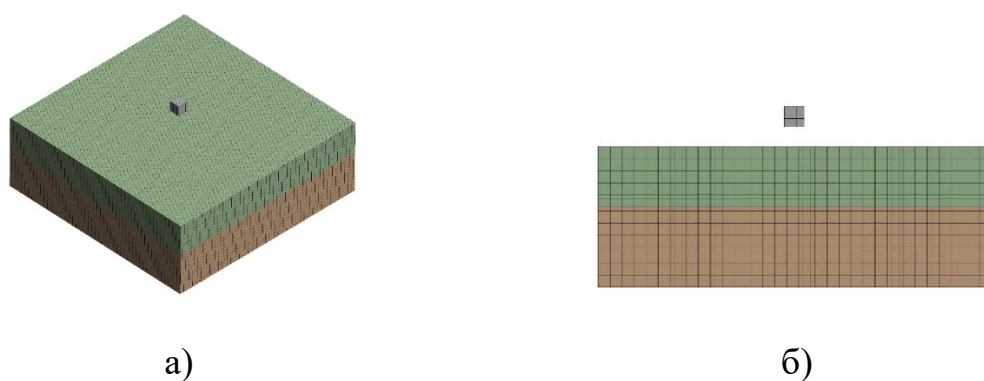


Рис.2. Расчетная сеточная модель преграды и частицы в начальный момент времени (количество элементов $3,5 \times 10^5$).

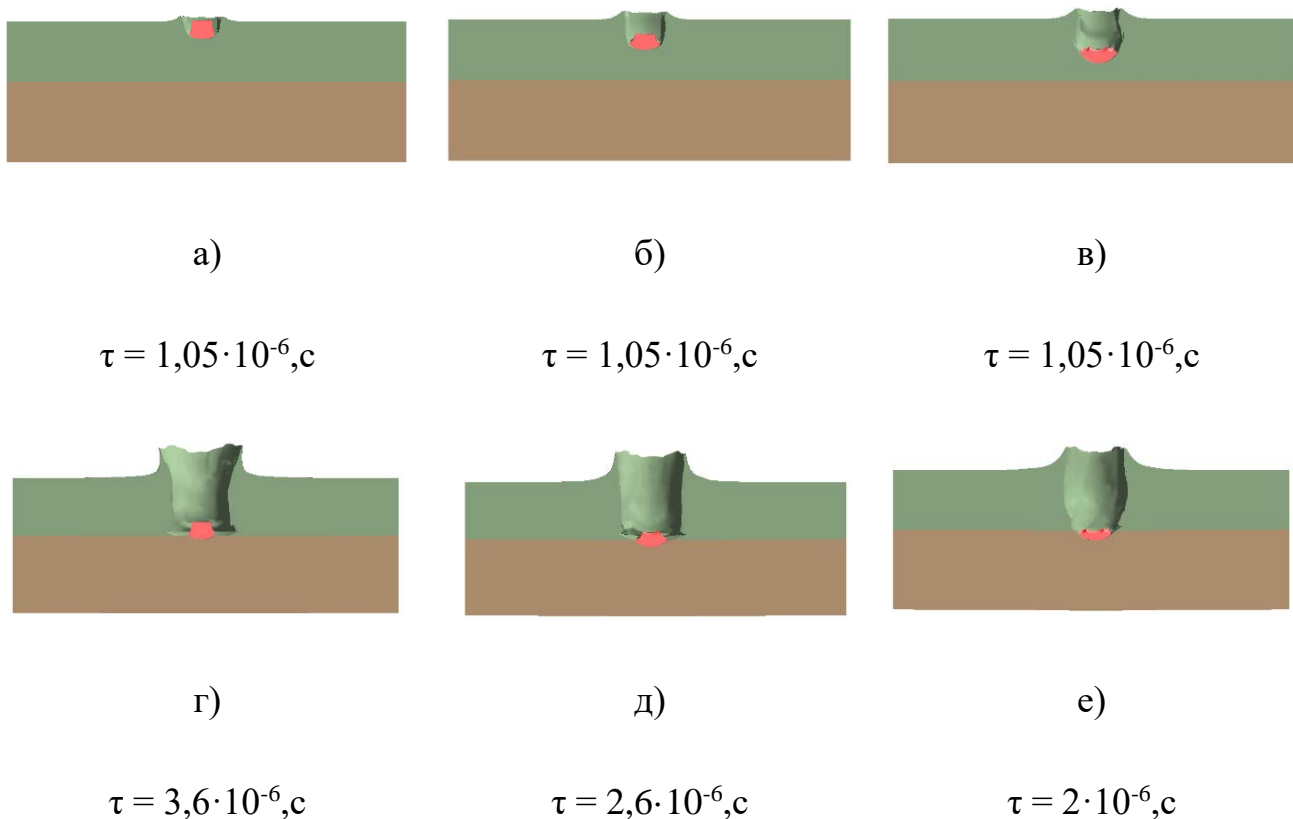
а) ортогональная проекция, б) фронтальная проекция

В работе проводилось моделирование высокоскоростного удара малоразмерной частицы по преграде на скоростях 1, 1.5 и 2 км/с. Расчетная сетка преграды и частицы представлена на рисунке 2. Масса частицы в начальный момент времени $m_{t0} = 1$ мг.

Частица, ударяющаяся на таких скоростях в полимерное покрытие, вызывает значительные деформации данного слоя.

Обсуждение результатов численных исследований

Результаты численного моделирования представлены на рисунке 3. Показаны результаты эволюции и образование кратеров в различные моменты времени. В результате соударения частицы с более мягкой преградой происходит унос вещества полимерного покрытия. При этом на алюминиевой преграде происходит образование кратера с увеличением диаметра при скоростях частицы 1.5 км/с и 2 км/с.



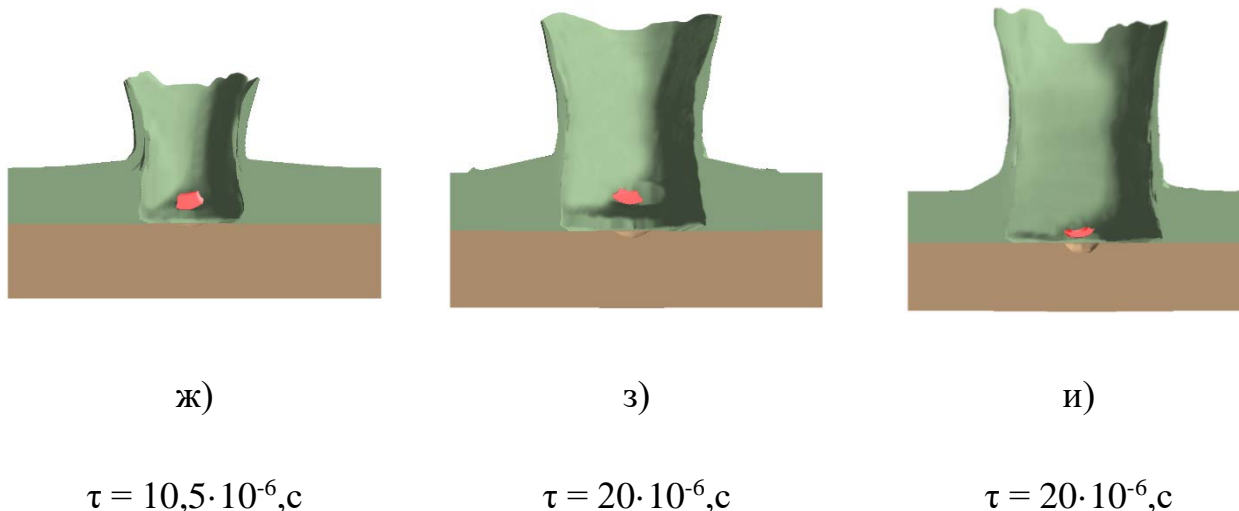


Рис. 3. Визуализация результатов образования кратера в преграде в зависимости от времени.

а,г,ж) $V=1$ км/с; б,д,з) $V=1.5$ км/с; в,е,и) $V=2$ км/с

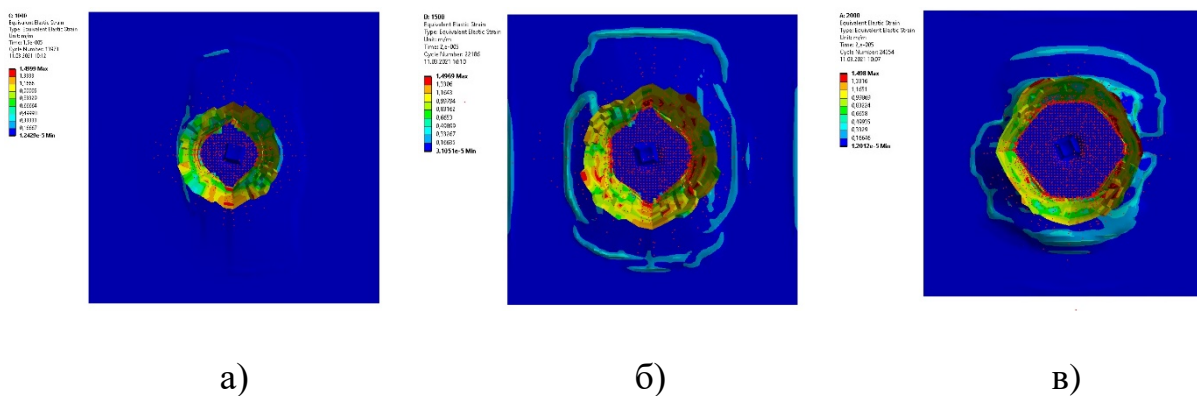


Рис.4. Визуализация результатов образования кратеров в преграде образованные ударом микрочастицы со скоростями.

а) 1 км/с; б) 1.5 км/с; в) 2 км/с

Как видно из рисунка 4 эпоксидное покрытие гасит некоторую часть кинетической энергии движущейся частицы за счет упруго пластической деформации. С ростом скорости движения частицы происходит увеличение величины

радиуса отслоения материала, также его значительный унос. Другую часть кинетической энергии воспринимает алюминиевая преграда, которая при ударе так же подвергается деформации, в следствии чего происходит нарастание напряжений с образованием кратера.

Увеличение эквивалентных напряжений в зоне контакта преграды характерно при воздействии от 1.5 км/с и выше. При скорости удара 2 км/с зона повышенных напряжений на алюминиевой преграде максимальна (рисунок 5). Скорость нарастания глубины кратера пропорционально зависит скорости удара частицы (рисунок б).

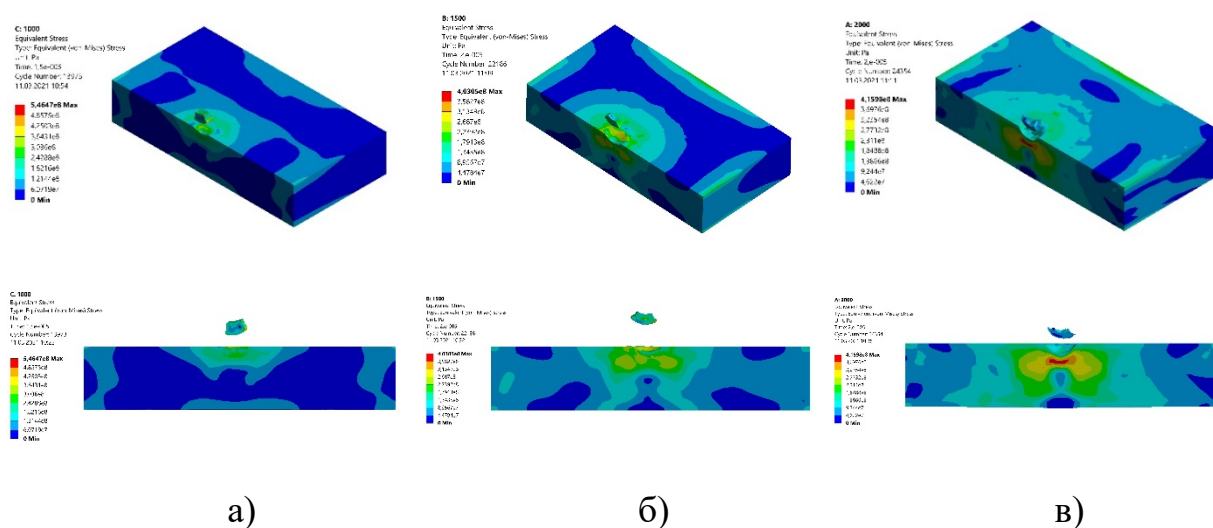


Рис. 5. Распределение эквивалентных напряжений преграды при ударе частицы при различных скоростях.

а) 1 км/с; б) 1.5 км/с; в) 2 км/с

Так же видно, что за счет части непогашенной кинетической энергии происходит отскок частицы от алюминиевой плиты. В этот момент времени происходит падение

напряжений в алюминиевой преграде. На рисунке 6 показана линейаризация полных напряжений по толщине алюминиевой преграды вдоль оси удара. На рисунке 6, а видно, что в момент удара максимальные напряжения находятся на поверхности преграды, и значительно превышают предел текучести алюминия $\sigma_{02}=190$ МПа. После того как частица отскочила, максимум напряжений перераспределяется по глубине преграды (рисунок 5, 6, б). Уровень максимальных напряжений также значительно падает.

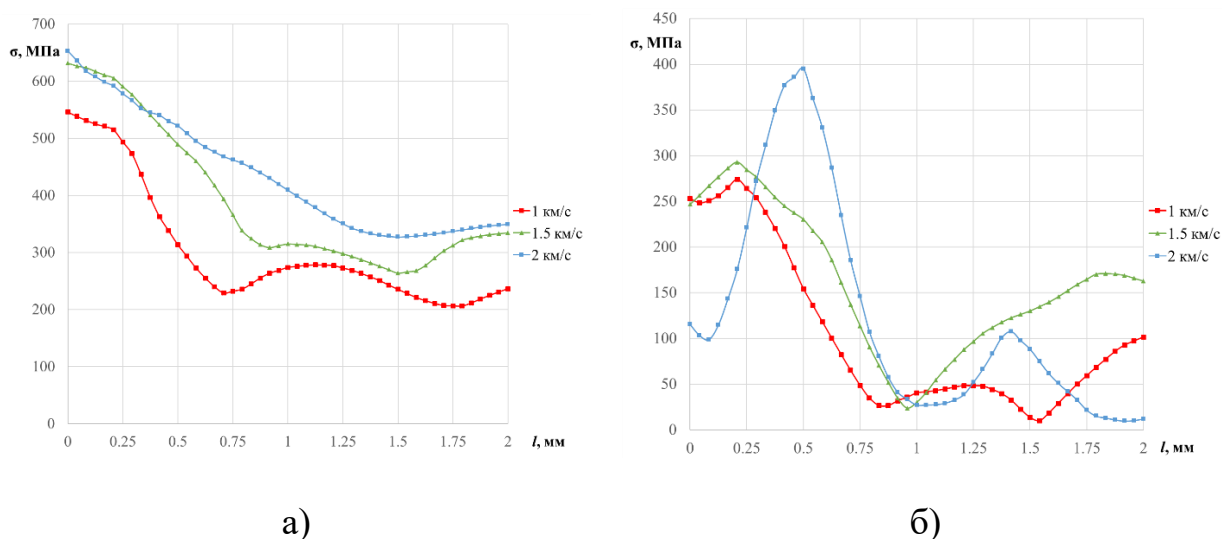


Рис. 6. Линейаризация полных напряжений по толщине алюминиевой преграды вдоль оси удара частицы при скоростях 1, 1.5 и 2 км/с: а) полные напряжения в момент удара частицы по алюминиевой преграде, б) полные напряжения после отскока частицы от алюминиевой преграды

В результате воздействия частицы на алюминиевую преграду происходит деформация и унос массы самой частицы. На скоростях от 1 км/с до 1.5 км/с происходят достаточно деформации частицы, однако значительное уменьшение массы происходит только на скорости 2 км/с.

Результаты расчетов изменения массы частицы ($m_{ч}$), глубины кратера ($h_{к}$) и диаметра отслоения полимерного материала от преграды (d_0) в зависимости скорости воздействия на преграду представлены на рисунках 7 и в таблице 1.

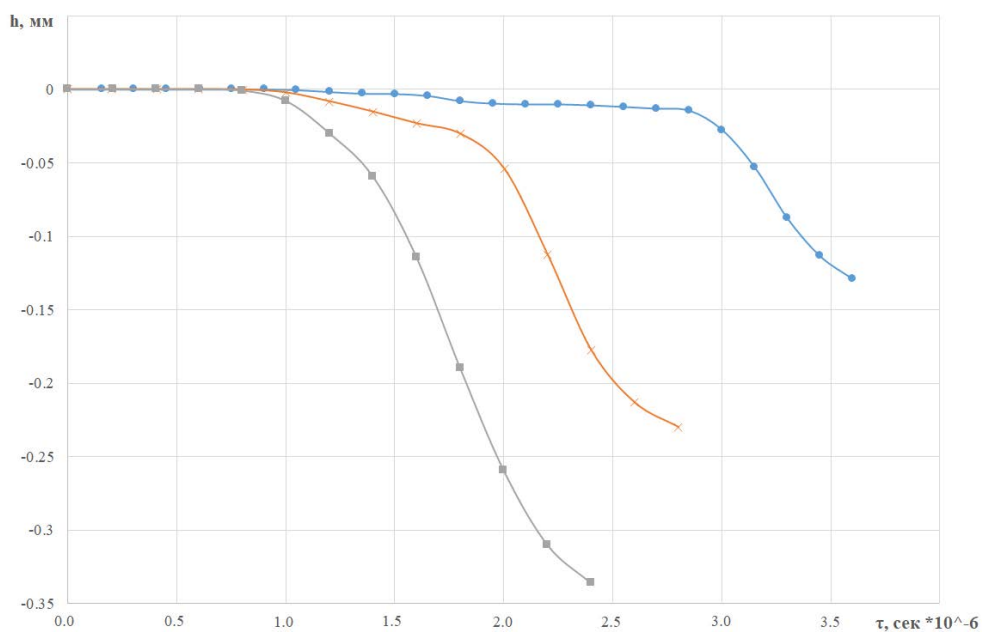


Рис. 7. Изменение глубины (h) кратера в функции от времени (τ)

Таблица 1

Результаты экспериментов с изменением массы частицы

№	V , км/с	d_0 , мм	$h_{к}$, мм	$m_{ч}$, мг
1.	1	2.5	0.13	0.992
2.	1.5	3.9	0.23	0.987
3.	2	5.3	0.34	0.596

Заключение

По результатам проведенных численных экспериментов проведен анализ ударных воздействий стальной частицы на алюминиевую преграду с покрытием из полимера. С учетом проведения комплексного исследования, охватывающего физико-механические, математические особенности моделирования высокоскоростного удара получили большой объем информации о взаимодействии частицы с преградой на разных скоростях движения.

Полимерное покрытие разрушается во всех исследованных вариантах, воспринимая часть кинетической энергии частицы. С увеличением скорости движение возрастает величина уноса материала и диаметр отслоения покрытия от алюминиевой преграды.

После разрушения полимерного покрытия происходит удар частицы по алюминиевой преграде. С увеличением скорости происходит также нарастание глубины кратера и напряжений в алюминиевой преграде. Скорость нарастания глубины кратера так же пропорциональна скорости движения частицы.

Во всех вариантах численного эксперимента стальная частица испытывает значительные деформации, однако значительный унос массы происходит только на скорости движения 2 км/с.

Полученные в работе результаты образований кратеров и напряжений в преграде при различных скоростях частиц размерами менее 1 мм позволяют создать задел для дальнейших экспериментальных исследований по учету воздействия частиц на элементы конструкции КА.

Библиографический список

1. Иващенко В.И., Евдокимов А.Н., Кириллов А.Г., Койнаш Б.Г. Экспериментальное моделирование воздействия высокоскоростных мелкодисперсионных компонент космического мусора на элементы систем космических аппаратов. – СПб: Б.и., 1996. № 94. – 23 с.
2. Панасюк М.И., Новиков Л.С. Модель космоса. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. – М.: КДУ, 2007. Т. 2. – 1144 с.
3. Новиков Л.С. Высокоскоростные соударения в космосе. - М.: Изд-во УНЦ ДО, 2003. - 72 с.
4. Семкин Н.Д., Телегин А.М., Калаев М.П. Космическое пространство и его влияние на элементы конструкций космических аппаратов. – Самара: СГАУ им. С.П. Королева, 2013. – 46 с.
5. Афанасьев В.А., Чудецкий Г.М. Концепция применения искусственных облачных образований в космических исследованиях // Труды МАИ. 2012. № 58. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=33033>
6. Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортов В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. – М.: Изд-во Янус-К, 1996. – 408 с.
7. Усовик И.В., Дарнопых В.В., Малышев В.В. Методика оценки эволюции техногенного засорения низкихоколоземных орбит с учётом взаимных столкновений и активного удаления космического мусора // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т. 22. № 3. С. 54 - 62.

8. Морозов Е.М., Муйземнек А.Ю., Шадский А.С. ANSYS в руках инженера: Механика разрушения. - М.: ЛЕНАНД, 2010. – 456 с.
9. Экштайн В. Компьютерное моделирование взаимодействия частиц с поверхностью твердого тела: Пер. с англ. – М.: Мир, 1995. – 321 с.
10. Ушаков Д.М. Введение в математические основы САПР. - М.: ДМК Пресс, 2011. – 208 с.
11. Фомин В.Н., Гулидов А.И., Сапожников Г.А. и др. Высокоскоростное взаимодействие тел. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. – 600 с.
12. Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures // Proc. of 7th Symposium on Ballistics, Hague, Netherlands, 1983, pp. 541 - 547.
13. Ozel T., Karpat Y. Identification of constitutive material model parameters for high-strain rate metal cutting conditions using evolutionary computational algorithms // Materials and Manufacturing Processes, 2007, vol. 22, pp. 659 - 667.
DOI: [10.1080/10426910701323631](https://doi.org/10.1080/10426910701323631)
14. Loikkanen M.J., Buyuk M., Kan C., Meng N. A computational and experimental analysis of ballistic impact to sheet metal aircraft structures // Proc. of 5th European LS-DYNA Users Conference, Birmingham, UK, 2005. CD-ROM format. – Article 3c-79.
15. Никитин П.В., Тушавина О.В. Анализ уравнения баланса энергии в зоне взаимодействия высокоскоростной частицы с твёрдой поверхностью // Труды МАИ. 2016. № 89. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=72580>

16. Gryttena F., Børvik T., Hopperstada O.S., Langseth M. Quasi-static perforation of thin aluminum plates // International Journal of Impact Engineering, 2009, vol. 36, pp. 486 - 497. DOI: [10.1016/j.ijimpeng.2008.01.015](https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2008.01.015)
17. Салосина М.О. Тепловой режим солнечного зонда с учетом ударного воздействия высокоскоростных частиц пыли // Труды МАИ. 2016. № 86. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=67808>
18. Templeton D.W., Gorsich T.J., Holmquist T.J. Computational study of a functionally graded ceramicmetallicarmor // Proc. of 23rd International Symposium on Ballistics, 2007, pp. 1165 - 1163.
19. Баранов Н.А., Таипова Д.Р. Устройство для измерения параметров космических частиц и оценки их влияния на материалы спутникостроения // Труды МАИ. 2019. № 105. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=104270>
20. Небрас Ш. Метод создания бронекабин грузовых автомобилей на стадии проектирования с требуемыми параметрами по защите от стрелкового оружия: Дисс.. к.т.н. – М.: МГТУ им Н.Э. Баумана, 2018. – 151 с.

Investigation of the interaction of space debris particles with structural elements of a spacecraft

Ekimenko A.A., Mikhailov D.Yu.*

*Military space Academy named after A.F. Mozhaisky,
13, Zdanovskaya str., Saint Petersburg, 197198, Russia*

**e-mail: mdyu@mail.ru*

Abstract

During operation, spacecraft are constantly exposed to external factors that lead to degradation of the structure and external elements. As a result, such an impact leads to changes in the optical properties of materials, changes in the physical and mechanical properties of structural materials, the formation of craters and through breakdown of the walls, as a result of which the operation of both individual onboard systems and the spacecraft as a whole is disrupted, which is a very urgent task.

One of the influencing factors on the spacecraft is the flow of cosmic dust particles and the pollution of outer space by space debris particles, which have different velocities. The size range of space debris and dust particles varies from a few micrometers to tens of meters. Solid particles with a size of less than 1 mm are considered as a constant influencing factor, characterized by the density of their flow. Also, an equally important parameter of space debris is the shape of the particles.

The article presents the results of a study of the impact of particles on the design of the spacecraft. The process of crater formation with equivalent stresses at velocities of 1, 1.5, and 2 km/s is considered. Graphs of the total stresses over the thickness of the barrier and the change in the depth of the craters over time are presented.

In this paper, as an object of research as an element of the spacecraft, the result of the interaction of a two-layer coating on impact with a particle of space debris, the size of which is much smaller than the thickness of the coating, is considered. The coating in the form of two plates made of a composite protective shield and an aluminum plate, are shown in Figure 1.

The results of the numerical simulation are shown in Figure 3. The results of the evolution and the formation of craters at different points in time are shown. As a result of the collision of the particle with a softer barrier, the polymer coating substance is carried away. At the same time, a crater is formed on the aluminum barrier with an increase in diameter at particle velocities of 1.5 km/s and 2 km/s.

Based on the results of numerical experiments, the impact effects of a steel particle on an aluminum barrier with a polymer coating are analyzed. Taking into account a comprehensive study covering the physical and mechanical, mathematical features of modeling a high-speed impact, a large amount of information about the interaction of a particle with an obstacle at different speeds of movement was obtained.

The polymer coating is destroyed in all the studied variants, taking part of the kinetic energy of the particle. With an increase in the speed of movement, the amount of material entrainment and the diameter of the coating detachment from the aluminum barrier increases.

After the destruction of the polymer coating, the particle hits the aluminum barrier. As the speed increases, the crater depth and stresses in the aluminum barrier also increase. The rate of increase in the depth of the crater is also proportional to the speed of movement of the particle.

In all variants of the numerical experiment, the steel particle undergoes significant deformations, but significant mass entrainment occurs only at a speed of 2 km/s.

The results of crater formation and stress in the barrier at different particle velocities of less than 1 mm in size allow us to create a foundation for further experimental studies to take into account the impact of particles on the spacecraft design elements.

Keywords: space debris, high-speed impact, crater, spacecraft.

References

1. Ivashchenko V.I. Evdokimov A.N., Kirillov A.G., Koinash B.G. *Eksperimental'noe modelirovanie vozdeistviya vysokoskorostnykh melkodispersionnykh komponent kosmicheskogo musora na elementy sistem kosmicheskikh apparatov* (Experimental modeling of the impact of high-speed fine-dispersion components of space debris on the elements of spacecraft systems), Saint Petersburg, B.i., 1996, no. 94, 23 p.
2. Panasyuk M.I., Novikov L.S. *Model' kosmosa. Vozdeistvie kosmicheskoi sredy na materialy i oborudovanie kosmicheskikh apparatov* (Model of space. The impact of the space environment on the materials and equipment of spacecraft), Moscow, KDU, 2007, vol. 2, 1144 p.
3. Novikov L.S. *Vysokoskorostnye soudareniya v kosmose* (High-speed collisions in space.), Moscow, Izd-vo UNTs DO, 2003, 72 p.
4. Semkin N.D., Telegin A.M., Kalaev M.P. *Kosmicheskoe prostranstvo i ego vliyanie na elementy konstruktsii kosmicheskikh apparatov* (Outer space and its influence on the elements of spacecraft structures), Samara, SGAU im. S.P. Koroleva, 2013, 46 p.

5. Afanas'ev V.A., Chudetskii G.M. *Trudy MAI*, 2012, no. 58. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=33033>
6. 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, Izd-vo Yanus-K, 1996, 408 p.
7. Usovik I.V., Darnopykh V.V., Malyshev V.V. *Aerospace MAI Journal*, 2015, vol. 22, no. 3, pp. 54 - 62.
8. Morozov E.M., Muizemnek A.Yu., Shadskii A.S. *ANSYS v rukakh inzhenera: Mekhanika razrusheniya* (ANSYS in the hands of an engineer: The mechanics of destruction), Moscow, LENAND, 2010, 456 p.
9. Ekshtain V. *Komp'yuternoe modelirovanie vzaimodeistviya chastits s poverkhnost'yu tverdogo tela* (Computer Simulation of Ion - Solid Interactions), Moscow, Mir, 1995, 321 p.
10. Ushakov D.M. *Vvedenie v matematicheskie osnovy SAPR* (Introduction to the mathematical foundations of CAD), Moscow, DMK Press, 2011, 208 p.
11. Fomin V.N., Gulidov A.I., Sapozhnikov G.A. et al. *Vysokoskorostnoe vzaimodeistvie tel* (High-speed interaction of bodies), Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 1999, 600 p.
12. Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures, *Proc. of 7th Symposium on Ballistics*, Hague, Netherlands, 1983, pp. 541 - 547.
13. Ozel T., Karpat Y. Identification of constitutive material model parameters for high-strain rate metal cutting conditions using evolutionary computational algorithms, *Materials*

- and Manufacturing Processes*, 2007, vol. 22, pp. 659 - 667.
DOI:[10.1080/10426910701323631](https://doi.org/10.1080/10426910701323631)
14. Loikkanen M.J., Buyuk M., Kan C., Meng N. A computational and experimental analysis of ballistic impact to sheet metal aircraft structures, *Proc. of 5th European LS-DYNA Users Conference*, Birmingham, UK, 2005. CD-ROM format. – Article 3c-79.
15. Nikitin P.V., Tushavina O.V. *Trudy MAI*, 2016, no. 89. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=72580>
16. Gryttena F., Børvik T., Hopperstada O.S., Langsetha M. Quasi-static perforation of thin aluminum plates, *International Journal of Impact Engineering*, 2009, vol. 36, pp. 486 - 497.
DOI:[10.1016/j.ijimpeng.2008.01.015](https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2008.01.015)
17. Salosina M.O. *Trudy MAI*, 2016, no. 86. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=67808>
18. Templeton D.W., Gorsich T.J., Holmquist T.J. Computational study of a functionally graded ceramicmetallicarmor, *Proc. of 23rd International Symposium on Ballistics*, 2007, pp. 1165 - 1163.
19. Baranov N.A., Taipova D.R. *Trudy MAI*, 2019, no. 105. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=104270>
20. Nebras Sh. *Metod sozdaniya bronekabin gruzovykh avtomobilei na stadii proektirovaniya s trebuemyimi parametrami po zashchite ot strelkovogo oruzhiya* (The method of creating armored cabins for trucks at the design stage with the required parameters for protection against small arms), Doctor's thesis, Moscow, MGTU im N.E. Bauman, 2018, 151 p.