

06.4;03.5

Влияние фазовых превращений на взаимодействие алюминиевых сплавов при скоростях более 9 km/s

© Б.В. Румянцев¹, И.В. Гук², А.И. Козачук¹, А.И. Михайлин², С.И. Павлов¹, М.В. Сильников²¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия² ЗАО „НПО „Спецматериалы“, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: brum@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 4 февраля 2020 г.

В окончательной редакции 4 февраля 2020 г.

Принято к публикации 10 февраля 2020 г.

Исследуется внедрение алюминиевой струи со скоростью 8–11 km/s в преграду из алюминиевых сплавов. Анализ кинетики и параметров проникания, поверхности каверны после внедрения позволяет утверждать, что при скоростях более 9 km/s гидродинамический характер внедрения нарушается из-за плавления взаимодействующих металлов. Результаты исследования предназначены для разработки экранной защиты космических аппаратов от наиболее опасных фрагментов космического мусора.

Ключевые слова: высокоскоростной удар, плавление, испарение, техногенный мусор.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.09.49368.18229

Классическая форма изменения баллистического предела, определенная при взаимодействии компактного ударника и экрана из алюминиевых сплавов, оставляет открытым вопрос о влиянии фазовых превращений на эффективность экранной защиты космических аппаратов [1,2]. В настоящей работе рассматривается действие удлиненного алюминиевого ударника по нормали к защите из алюминиевых сплавов при скоростях 8–11 km/s. Такие условия являются наиболее жесткими для экранной защиты космических аппаратов.

В качестве аналога удлиненного ударника в лабораторных условиях принята кумулятивная струя (КС), сформированная при схлопывании металлического конуса под действием продуктов детонации взрывчатых веществ [3,4].

На рис. 1 приведена схема эксперимента по формированию КС при схлопывании конуса 1 из сплава АМГ3 диаметром 20 mm в основании под действием продуктов детонации заряда взрывчатого вещества массой 40 g. После прохождения фокусного расстояния 60 mm КС внедрялась в преграду 2 из пластин алюминиевого сплава АМГ6. Эксперименты проводились в вакуумной взрывной камере при давлении воздуха менее 2 kPa. По замыканию контактных датчиков 3 регистрировались времена t проникания КС на глубину L в преграду (символы на диаграмме $L(t)$, рис. 1 и 2). По остаточной каверне в преграде измерялись объем v_{cav} и конечная глубина внедрения L_e . Сплошные кривые на рис. 1 и 2 отражают результаты расчета в гидродинамическом приближении [5,6]: траекторий формирования и проникания КС в преграду. Поскольку КС, получаемая при схлопывании воронки, имела градиент по скорости, приведено семейство траекторий движения частей струи от начальной скорости V_{j0} и ниже через равные промежутки значения скорости (прямые тонкие линии). Штриховой

кривой представлены результаты численного моделирования с использованием осесимметричного эйлера подхода [7] формирования и внедрения струй из воронок с углами 45 и 20°. На рис. 1, 2 приведено сравнение расчетов и траекторий внедрения алюминиевых струй, сформированных схлопыванием воронок с углами при вершине A , равными 60, 45, 30 и 20°, в преграду из дюраля АМГ6.

В таблице приведены данные внедрения алюминиевой струи в преграду из АМГ6.

Согласно модельным уравнениям состояния при высоких давлениях одномерного ударного сжатия [9,10], плавление алюминия при ударном сжатии начинается при давлении 130 GPa и свыше 180 GPa алюминий на ударной адиабате находится в жидком состоянии. При адиабатической разгрузке из состояний на ударной адиабате больше 220 GPa часть алюминия находится в парообразном состоянии.

Из сопоставления данных таблицы и рис. 2 видно, что отрезок струи со скоростью более 9 km/s формирует каверну глубиной до 35 mm и в зоне внедрения часть алюминия находится в „ожигенном“ состоянии. Экспериментальные результаты определения $L(t)$ совпадают с численным моделированием и расчетами в гидродинамическом приближении при скоростях элементов струи более 9 km/s. После 3–4 μ s внедрение элементов струи с меньшими скоростями демонстрирует дестабилизацию проникания КС от внутреннего возмущения [11] с задержкой по времени (стрелка на рис. 2) и дальнейшим кардинальным отклонением от результатов гидродинамических расчетов. Внедрение струй, образованных из конусов с углами 45 и 60°, со скоростями меньше 9 km/s хорошо моделируется.

Для получения дополнительной информации о состоянии взаимодействующих материалов в работе ис-

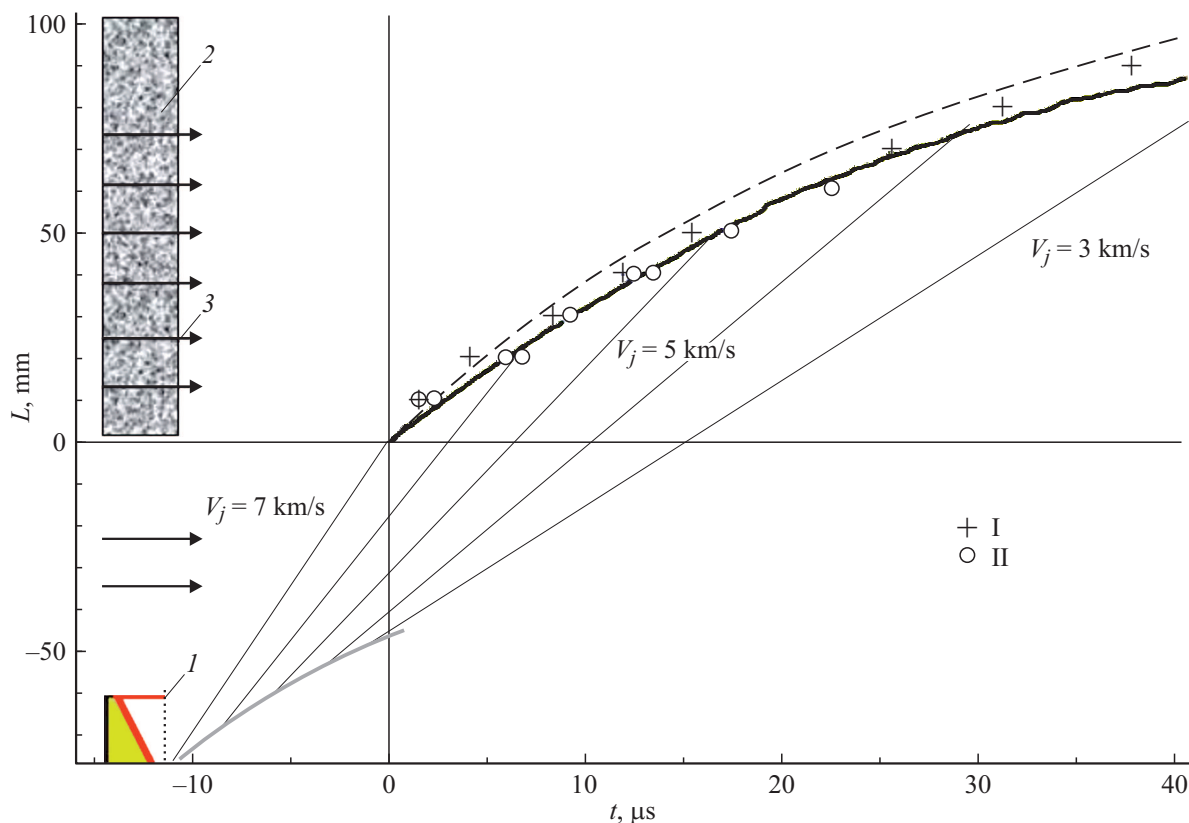


Рис. 1. Схема эксперимента. 1 — алюминиевая воронка, 2 — блок листов дюрала АМГ6, 3 — контактные датчики. Символы — времена t замыкания датчиков, расположенных на глубине L в преграде для струй из воронок с углами 45° (I) и 60° (II).

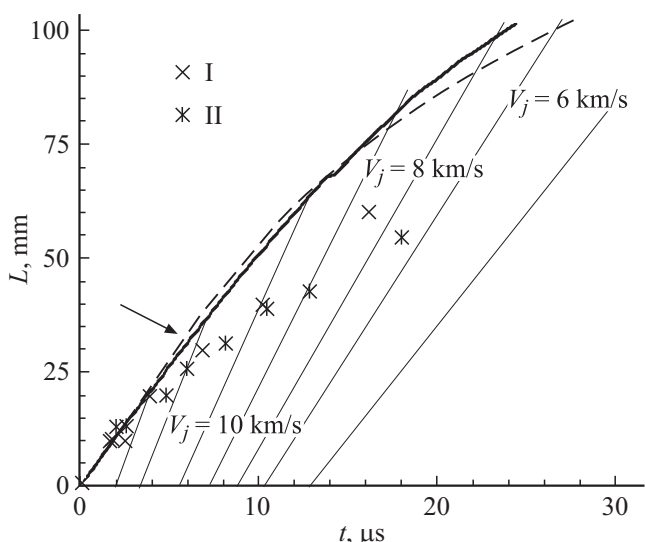


Рис. 2. Расчетные траектории и времена внедрения для струй, полученных при схлопывании воронок с углами 20° (I) и 30° (II) в области преграды. Остальные обозначения те же, что на рис. 1.

Данные внедрения алюминиевой струи в преграду из АМГ6

| $A, ^\circ$ | $V_{j0},$ km/s | $L_e,$ cm | $v_{cav},$ cm^3 | $P_{0j}^*,$ GPa |
|-------------|-------------------|--------------|-----------------------------|--------------------|
| 20 | 11.3 | 11.5 | 13.7 | 183 |
| 30 | 10.0 | 10 | 9.0 | 157 |
| 45 | 8.7 | 11 | 9.1 | 124 |
| 60 | 7.6 | 9.5 | 8 | 102 |

* P_{0j} — начальное давление внедрения, расчет по [8].

моделирования распределения давления в области внедрения. Анализировались SEM-изображения, полученные на растровом электронном микроскопе JSM 7001F (JEOL) на уровне штриховой линии рис. 3, *a*. Рис. 3, *b* отражает состояние поверхности после внедрения КС, образовавшейся при схлопывании воронки с углом 45°. Видны затвердевшие подтеки размером более 100 μm и отдельные капли алюминия размером 5–10 μm . При увеличении проявляется структура поверхностного слоя каверны с трещинами. Состояние поверхности каверны после внедрения алюминиевой струи со скоростью более 10 km/s существенно меняется. При микронном разрешении проявляются многочисленные наносферы размером 20–100 nm (рис. 3, *c*). Наносферы образуют кластеры размером 0.2–0.5 μm с порами в центре из-за

следовалась поверхность каверны в начальной области внедрения. На рис. 3, *a* приведены фотография поверхности каверны и для наглядности результат численного

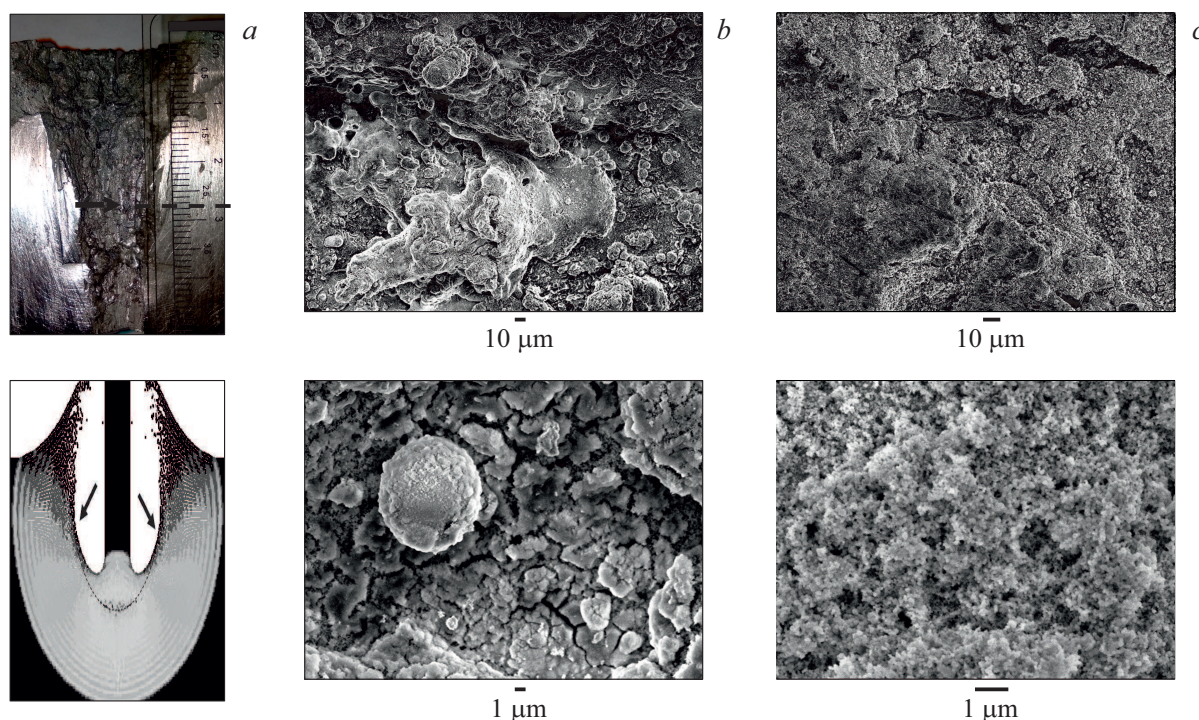


Рис. 3. SEM-изображения каверны в АМГб после действия алюминиевой струи. *a* — общий вид каверны и области внедрения, штриховая линия — глубина регистрации поверхности каверны ~ 1 см, стрелки указывают поверхность генерации наносфер; *b* — поверхность каверны, образованной струей из воронки с углом 45° ; *c* — поверхность каверны, образованной струей из воронки с углом 20° .

неплотной упаковки. Поверхностный слой имеет вид пористой массы. Распределение наносфер по размерам аналогично имеющему место для порошков, получаемых при электрическом взрывании проводников [12].

В рассматриваемом процессе наносферы появляются при разгрузке свободной поверхности в области внедрения (стрелки на рис. 3, *a*) растекающегося отрезка струи, сжатого отраженной от границы раздела с преградой ударной волной. Существенно, что кинетическая энергия, вносимая потоком со скоростью более 9 km/s , в несколько раз превышает удельную теплоту испарения алюминия. С учетом перехода в отраженную ударную волну и доли тепловой энергии в ней энергии для преобразования значительной части потока в наносферы достаточно. Из рис. 3, *c* видно, что разгрузка струи в зоне внедрения при скоростях более 9 km/s идет с образованием пористой массы наносфер. Радиальное взаимодействие расширяющегося материала с вновь поступающим потоком струи является причиной внутренней дестабилизации высокоскоростного внедрения. Преодоление схлопывающегося материала приводит к временной приостановке на $\sim 1 \mu\text{s}$ внедрения на глубине $30\text{--}35 \text{ mm}$ (стрелка на рис. 2), после чего остаток удлиненного ударника интенсивно расходует на стенках каверны в преграде. Недостаток экспериментальных результатов и неопределенность в описании процессов расширения материала струи в области разгрузки не

позволяют определить время задержки радиального воздействия [11].

Совокупность данных (состояние „замороженной“ поверхности каверны, изменения в траектории внедрения, тождественность наблюдаемых особенностей внедрения фазовому состоянию) позволяет предположить влияние плавления алюминия на дестабилизацию внедрения струи при скоростях более 9 km/s .

Исследованный диапазон скоростей алюминиевых струй и их действие по преграде из алюминиевых сплавов служат исходной базой для оценки последствий воздействия техногенного мусора на космические объекты. Естественная дестабилизация внедрения удлиненного ударника при достижении параметров фазовых превращений в алюминии увеличивает эффективность экранной защиты и должна учитываться при оценке рисков поражения.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 18-08-00487/18.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] IADC-04-03 v. 7. Protection manual. 2014. 288 p.
- [2] *Christiansen E.L.* Meteoroid/debris shielding. TP-2003-210788. Houston: NASA Johnson Space Center, 2003. P. 114.
- [3] *Rumiantsev B.V., Mikhaylin A.I.* // Acta Astron. 2017. V. 135. P. 15–20. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2016.11.002>
- [4] *Козачук А.И., Михайлин А.И., Павлов С.И., Румянцев Б.В., Сильников М.В.* // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. В. 5. С. 13–16. DOI: 10.21883/JTF.2019.05.47389.17578
- [5] Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. Изд. 3-е, перераб. М.: Физматлит, 2002. Т. 2. 832 с.
- [6] *Rumiantsev B.V., Guk I.V., Kozachuk A.I., Mikhailin A.I., Pavlov S.I., Sil'nikov M.V.* // Acta Astron. 2019. V. 163. Part A. P. 73–78. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.03.065>
- [7] *Katayama M., Takeba A., Toda S., Kibe S.* Numerical simulation of jet formation by shaped charge and its penetration into bumpered target // Proc. of the 2nd Eur. Conf. on space debris. 1997. V. 393. P. 411–416.
- [8] <http://www.ihed.ras.ru/rusbank/> [Электронный ресурс].
- [9] *Минаков Д.В.* Расчет термодинамических свойств плотной плазмы металлов методом функционала плотности и квантовой молекулярной динамики. Канд. дис. М.: Объединенный институт высоких температур РАН, 2015. 127 с.
- [10] *Khishchenko K.V.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2008. V. 98. P. 032023.
- [11] *Румянцев Б.В.* // ЖТФ. 2019. Т. 89. В. 5. С. 685–691. DOI: 10.21883/JTF.2019.05.47469.337-18
- [12] *Назаренко О.Б.* Электровзрывные порошки: получение, свойства, применение / Под ред. А.П. Ильина. Томск: Изд-во ТПУ, 2005. 148 с.