

ПРОЧНОСТЬ И ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

УДК 623.451

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМА РАЗРУШЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В РЕЗУЛЬТАТЕ ИНЕРЦИАЛЬНОГО ВЗРЫВА ИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ УЗЛОВ ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ

Марахтанов М.К.*, **Велданов В.А.****, **Духопельников Д.В.*****,
Карнейчик А.С.****, **Крутов И.С.*******, **Макаров А.А.*******

*Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана,
МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2-я Бауманская ул., 5, Москва, 105005, Россия*

* e-mail: mkm@power.bmstu.ru

** e-mail: vevladi@mail.ru

*** e-mail: duh@power.bmstu.ru

**** e-mail: karas-dimitrov@mail.ru

***** e-mail: is.krutov@mail.ru

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

Известны случаи столкновения двух искусственных спутников Земли, когда скорость встречи космических аппаратов (КА) на пересекающихся орбитах достигала 10,5 км/с, т.е. в несколько раз больше той, которая требуется для взрыва кристаллической решетки металла, составляющего корпус КА. Исследуются параметры инерциального взрыва металлических узлов, который может возникнуть в месте контакта столкнувшихся КА. Приводятся экспериментальные и расчетные данные о скорости столкновения, обеспечивающей подобный взрыв, а также о скорости движения и температуре парообразных продуктов взрыва, достигающей 22000 К. Показано, что время, необходимое для возбуждения реакции перехода металла из твердого состояния в светящуюся атомно-паровую смесь (если переход инициирован механическим ударом), не превышает двух микросекунд. Определена относительная масса взорванного металла. Эксперименты проведены на свинцовых образцах.

Ключевые слова: столкновение космических аппаратов, инерциальный взрыв металла, температура продуктов взрыва, продолжительность перехода металла в пар.

Введение

10 февраля 2009 года, в момент столкновения двух искусственных спутников Земли («Космос-2251» и «Иридиум-33»), двигавшихся со скоростью

~7,5 км/с каждый, траектории движения аппаратов сходились почти под прямым углом, и относительная скорость встречи (или скорость удара) достигала почти 10,5 км/с [1]. Данная скорость в несколь-

ко раз больше той, которая требуется для взрыва кристаллической решетки металла, составляющего корпус космического аппарата. Кинетическая энергия продуктов инерциального взрыва экспериментально измерена [2–4], но температура их парообразной среды нуждается хотя бы в качественной оценке, проделанной в настоящей работе. Несмотря на то, что основным конструкционным материалом авиакосмических аппаратов служит алюминий и его сплавы, в этой работе исследован взрыв свинца.

При соударении свинцового ударника с преградой отмечено появление электронного импульса [5], предшествующее взрыву металла. Свинец выбран потому, что по сравнению с другими металлами продукты взрыва свинца образуют четкие границы, скорость движения которых позволяет установить температуру составляющего их пара. Кроме того, при встрече свинцового ударника со свинцовой преградой взрываются оба объекта, в то время как у других металлов обычно взрывается лишь ударник. Поэтому в опытах со свинцом можно оценить массу части преграды, испарившейся от взрыва.

Металл пребывает в твердом состоянии, пока энергия металлической связи ϵ достаточна для сохранения его кристаллической решетки [6]. Значение ϵ определяют как энергию, необходимую для последовательных нагрева (от $T = 0$ К), плавления и испарения металлического образца. Если эту связь нарушить, металл перестанет быть конденсированной средой и испарится. Пример мгновенного нарушения связи и перехода металла из твердого состояния в пар (газ) дает нам сама природа, когда железный или никелевый метеорит взрывается при ударе о Землю [7] или поток метеороидов воздействует на корпус КА [8].

Известно, что в лабораторных условиях для взрыва свинца путем испарения в ударной волне внутри тонкой свинцовой преграды требуется скорость соударения выше 2 км/с [8]. Целью настоящей работы является экспериментальное подтверждение факта нарушения металлической связи свинца вследствие механического удара при сравнительно небольшой скорости $v = 1128 \pm 14$ м/с встречи ударника с массивной свинцовой преградой. Инерциальный взрыв свинца наступает при расчетной скорости встречи с твердой преградой, равной 700 м/с, в то время как для остальных металлов величина скорости лежит в диапазоне 717–4300 м/с [3].

Схема эксперимента

Схема эксперимента приведена на рис. 1, а. Показанный здесь свинцовый цилиндрический ударник 1 диаметром 14,5 мм, длиной 15,2 мм и массой 0,027 кг получает кинетическую энергию в пороховом ускорителе. Покинув ускоритель, ударник приближается к преграде 2 со скоростью $v = 1128 \pm 14$ м/с (рис. 1, а). Скорость вычислялась по перемещению изображения ударника 2 на ряде последовательных кадров, снятых видеокамерой при частоте съемки 25 000 кадр/с и времени экспозиции одного кадра 1/156000 с. Свинцовая преграда 3 представляла собой параллелепипед размерами 67×82×15,5 мм и массой 0,91 кг. Масса мишени 2, сохранившейся после удара, равна 0,68 кг (рис. 1, б). Для получения четких видеокадров преграда и трасса ударника освещались прожектором мощностью 6 кВт.

Температура продуктов распада свинца оценивалась по скорости их потока, фронт которого двигался навстречу ускорителю и фиксировался видео-

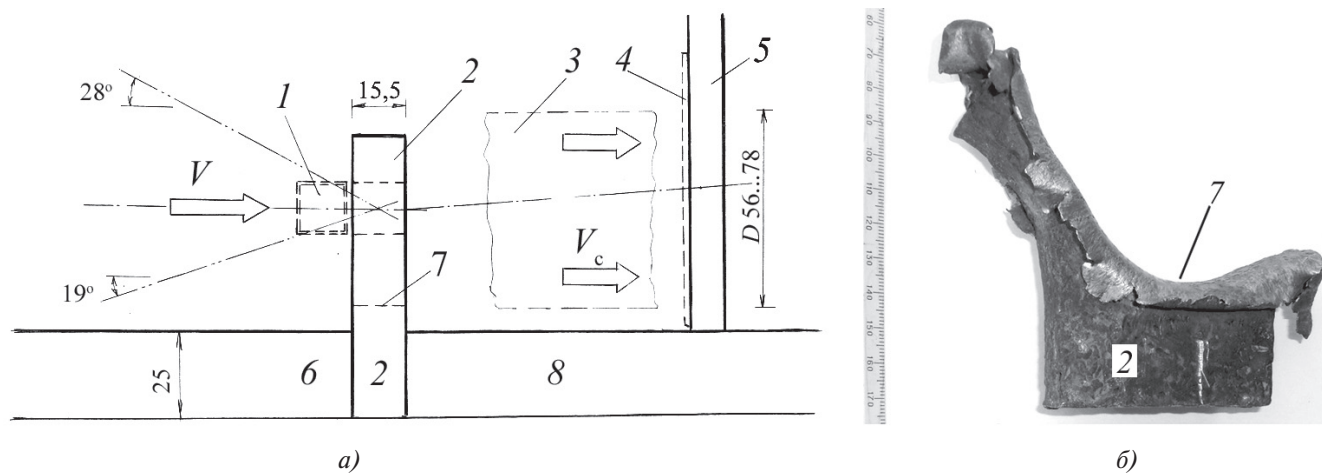


Рис. 1. Схема эксперимента (а) и разрушенная преграда (б): 1 — свинцовый ударник диаметром 14,5 мм и длиной 15,2 мм; 2 — свинцовая преграда размерами 67×82×15,5 мм; 3 — колонна атомно-паровой смеси за преградой; 4 — конденсат свинца; 5 — стальной отбойник; 6, 8 — опорная стальная плита толщиной 25 мм; 7 — нижняя граница испарившейся части преграды; 19° и 28° — боковые границы продуктов распада свинца перед преградой

камерой. Толщина преграды была выбрана достаточной (15,5 мм), чтобы свести к минимуму воздействие ударных волн на фазовый переход свинца, как это происходило в 3-мм свинцовой пластине при скорости удара около 2000 м/с [9]. Вокруг преграды были установлены экраны из плотной бумаги. По состоянию и количеству конденсата свинца, осевшего на них, оценивали долю атомно-паровой фазы в распавшемся металле. Распад свинцовых ударника и преграды носил характер взрыва как по кратковременности, так и по воздействию на окружающее оборудование.

Обсуждение результатов эксперимента

На рис. 2 показаны два последовательных видеокадра. В кадре № 20 ударник 2 подходит к преграде, а в следующем кадре уже видна яркая вспышка продуктов распада свинца. Время, прошедшее между съемкой этих изображений, составляет $T = 1/25000 = 4 \cdot 10^{-5}$ с. В начале периода T ударник 2 преодолел расстояние z_1 со скоростью v и вошел в контакт с поверхностью 4 преграды 3 (рис. 2, б).

В момент контакта передняя часть ударника превратилась в атомно-паровую смесь, давшую яркое излучение 6. Многочисленные опыты показывают, что излучение появляется в форме узкого кольца по периметру контакта ударника с преградой. К концу периода T это кольцо расширяется и в виде светящегося фронта 5 отходит от поверхности 4 на расстояние z_2 со средней скоростью v_f .

На рис. 3 видно, что поток атомно-паровой смеси свинца формируется и перед преградой, и за ней. В обоих случаях хорошо различимы темная и светящаяся составляющие свинцового потока (рис. 2 и 3). Разница цвета (яркости) составляющих говорит о том, что парообразные продукты распада свинца имеют две тепловые фракции: высокотемпературную 6 и низкотемпературную 7 (рис. 2, з). Аналогичная температурная гамма возникает при ударе свинцовой пули по алюминиевой плите (см. рис. 3.9 в [10]).

Наблюдаемый поток атомно-паровой смеси имеет форму усеченного конуса с малым основанием, примыкающим к преграде. Образующие кону-

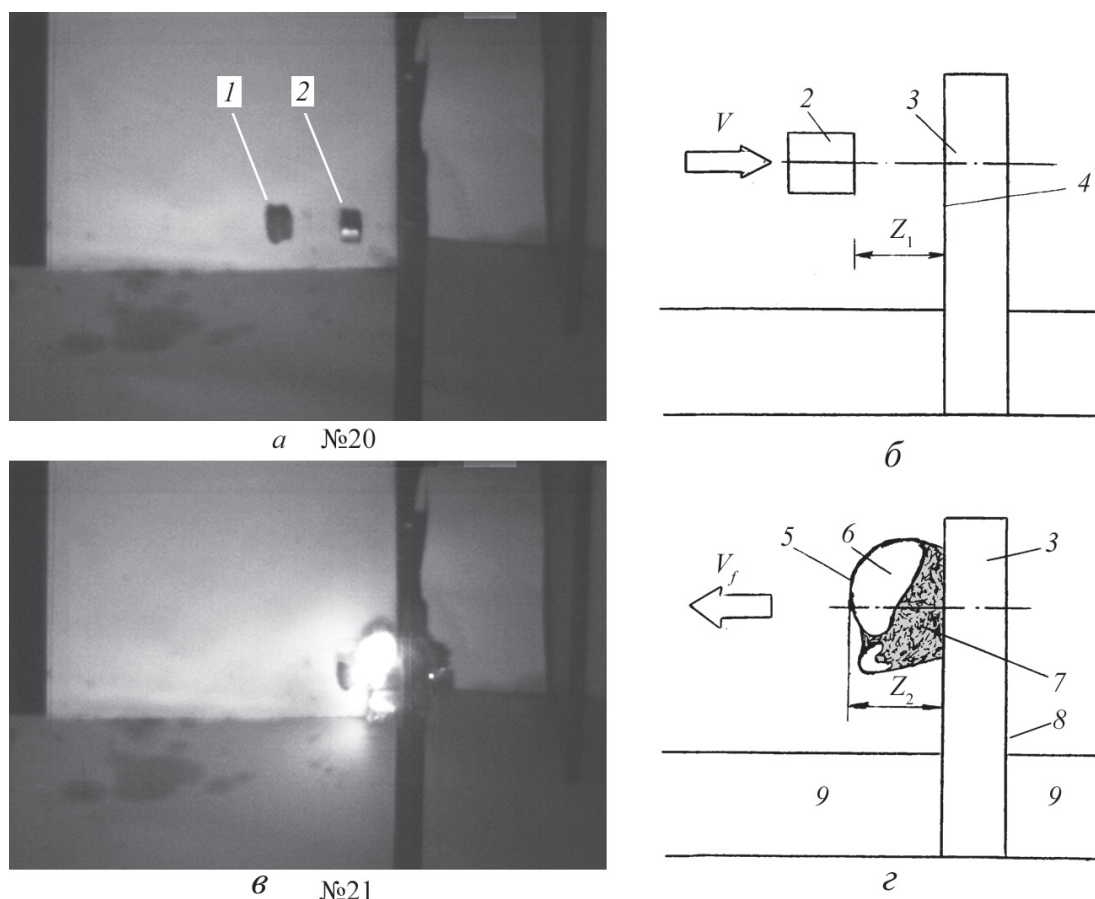


Рис. 2. Видеокадры (а, в), схемы движений ударника (б) и фронта свечения взрывной волны (з): 1 — пыж; 2 — ударник; 3 — свинцовая преграда; 4 — фронтальная поверхность преграды; 5 — граница фронта свечения; 6 — свечение атомно-паровой смеси свинца; 7 — несветящиеся продукты взрыва свинца; 8 — тыльная поверхность преграды; 9 — опорная стальная плита; $z_1 = 21,7$ мм — расстояние от ударника до преграды; $z_2 = 22,6$ мм — расстояние от преграды до границы фронта взрывной волны; $v = 1128 \pm 14$ м/с; v_f — скорость движения фронта свечения

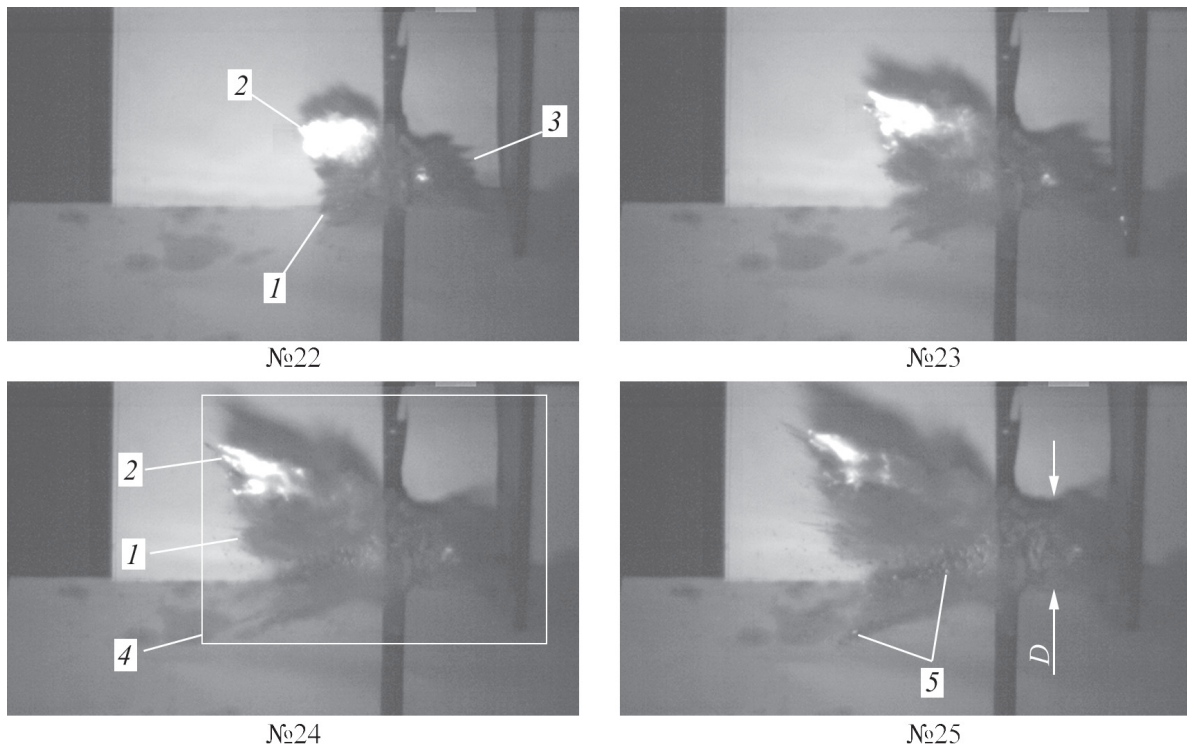


Рис. 3. Видеокадры движения атомно-паровой смеси свинца; номера кадров следуют с интервалом времени $T = 0,00004$ с: 1 — фронт низкотемпературного потока; 2 — фронт высокотемпературного потока; 3 — фронт запреградного потока; 4 — условная граница продуктов распада ударника и преграды; 5 — мелкие осколки свинцовой преграды; D — поперечник колонны атомно-паровых продуктов распада свинца

са составляют в среднем угол $\frac{1}{2}(28 + 19) = 23,5^\circ$. Диаметр меньшего основания конуса примерно равен 50 мм (см. рис. 1,а). Большее основание конуса удаляется от преграды на каждом кадре видеофильма (его площадь $S(z)$ указана в таблице для видеокадра с соответствующим номером).

В таблице представлены параметры, характеризующие движение фронта свечения 5 атомно-паровой смеси (см. рис. 2). В их число входят: расстояние z между фронтом 5 и преградой 4, время t экспозиции очередного кадра, считая от момента съемки кадра № 21, и скорость v_f , с которой фронт

5 перемещается в период между съемкой двух соседних кадров. В таблицу включена площадь $S(z)$ максимального поперечного сечения атомно-парового потока, соответствующая расстоянию z .

На основании данных таблицы построены графики изменения скорости $v_f(z)$ и сечения потока $S(z)$ в зависимости от расстояния z фронта свечения (рис. 4,а), а также от времени t съемки соответствующего кадра (рис. 4,б). Графики показывают, что площадь сечения потока 2 постепенно возрастает, тогда как его скорость $v_f(z)$ соответственно падет (кривая 1). Следовательно, торможение по-

Скорость перемещения v_f фронта светящегося потока атомно-паровых продуктов свинца и площадь поперечного сечения атомно-парового потока

№ видеокадра	Расстояние z до фронта свечения, мм	Скорость фронта свечения v_f , м/с	Время t от момента съемки кадра № 21, мкс	Площадь $S(z)$ сечения потока, см ²
21	22,6		0	~20
22	67,7	1128,2	40	~59
23	103,8	902,4	80	~107
24	129,9	654,3	120	~158
25	144,4	361	160	~177
26	158,8	361	200	
27	175,9	428,7	240	
28	192,2	406,3	280	

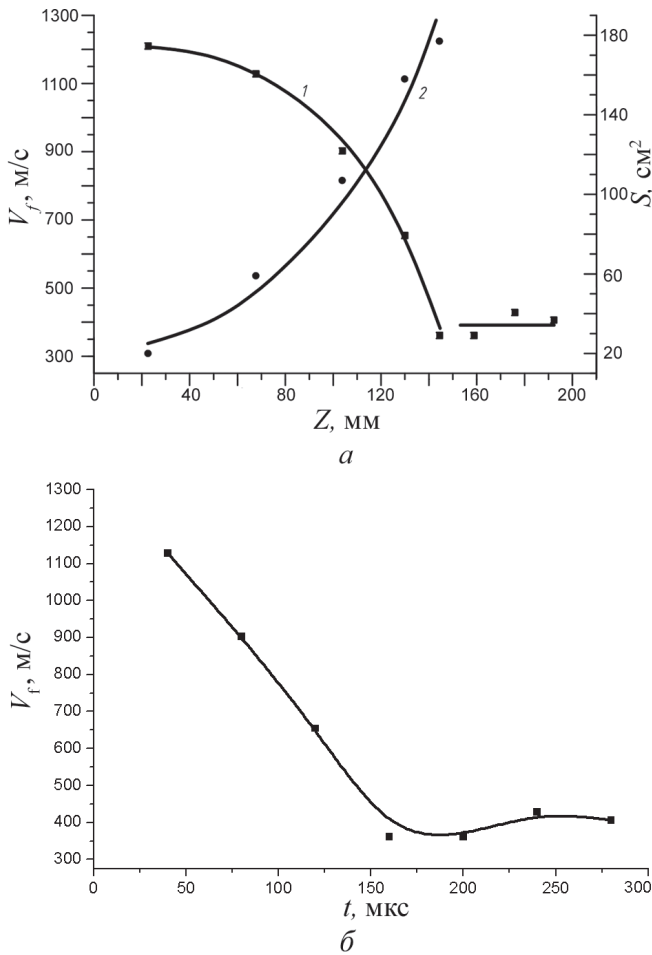


Рис. 4. Изменение скорости перемещения v_f фронта атомно-паровых продуктов распада свинца, а также площади $S(z)$ поперечного сечения их потока (а) в зависимости от расстояния z до фронтальной поверхности преграды (см. рис. 2,з) и в зависимости от времени t , прошедшего после съемки кадра № 21 (б): 1 — скорость $v_f(z)$; 2 — площадь $S(z)$

тока сопряжено с постепенным увеличением сечения $S(z)$ по мере отхода фронта свечения от преграды. При использованных здесь приближениях график $S(z)$ дает лишь качественную оценку его связи с графиком $v_f(z)$. Условная граница 4 продуктов распада ударника и преграды расширяется со временем (см. рис. 3).

Ограниченная частота видеосъемки, равная $f = 25\,000$ кадр/с, не позволяет зафиксировать события, происходящие в интервале времени, меньшем, чем $T = 1/f = 0,00004$ с. К ним относится, например, период τ от момента встречи ударника с преградой до момента зарождения свечения на месте встречи. Поскольку в границах периода τ возникает реакция перехода свинца из твердого состояния в атомно-паровую смесь, то информация о её продолжительности представляет практический интерес. Для оценки периода τ воспользуемся уравнением

$$\tau = T - \left(\frac{z_1}{v} + \frac{z_2}{v_f} \right) = 0,00004 - \left(\frac{0,0217}{1128} + \frac{0,0226}{1210} \right) = 2,085 \cdot 10^{-6} \text{ с} \approx 2 \text{ мкс.} \quad (1)$$

Здесь скорость v_f определена с помощью графиков, показанных на рис. 4. Интерполируя график $v_f = f(z)$ в точку $z \approx 0$, получим $v_{fa} \approx 1210$ м/с (рис. 4,а). Пролетав ту же операцию с графиком $v_f = f(t)$ для точки $t \approx 20$ мкс, получим $v_{fb} \approx 1210$ м/с (рис. 4,б). Среднее значение скорости v_f составит $0,5(v_{fa} + v_{fb}) = 1210$ м/с.

Таким образом, время, необходимое для возбуждения реакции перехода свинца из твердого состояния в светящуюся атомно-паровую смесь (если переход инициирован механическим ударом), не превышает 2 мкс. Отметим, что, несмотря на различие причин, ведущих к аналогичному изменению состояния металла, время, определенное уравнением (1), близко к значению $\tau \approx 1$ мкс, измеренному в работе [11] для электрического взрыва металла.

На рис. 5 показана картина скачков уплотнения 4, возникших на линии пересечения 3 атомно-парового потока свинца с поверхностью светового экрана 1. Видеокадр № 28 снят через $t_{28} = 299$ мкс после того, как ударник 1 коснулся преграды 2 (см. рис. 1,а). За время t_{28} мишень окончательно разрушилась и приняла вид, показанный на рис. 1,б.

Такие показатели потока, как скачки уплотнения 4 (рис. 5), а также рост площади сечения $S(z)$ потока при уменьшении его скорости (см. кривая 2 на рис. 4) говорят о том, что вещество, составляющее поток, находится в газообразном состоянии и движется со скоростью звука. В таком случае скорость потока газа на месте его рождения (в сечении $z \approx 0$) можно принять равной скорости звука, $a = v_f \approx 1210$ м/с. Скорость звука и температура T_0 атомно-паровых продуктов здесь связаны уравнением

$$a = v_f = \sqrt{\frac{\gamma k T_0}{m_p A}} = \sqrt{\frac{1,67 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} T_0}{1,67 \cdot 10^{-27} A}} \approx 117,5 \sqrt{\frac{T_0}{A}} = 8,17 \sqrt{T_0}, \quad (2)$$

где γ — отношение теплоемкостей газа при постоянном давлении и при постоянном объеме ($\gamma = 1,67$ для одноатомной молекулы паров свинца); $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана;

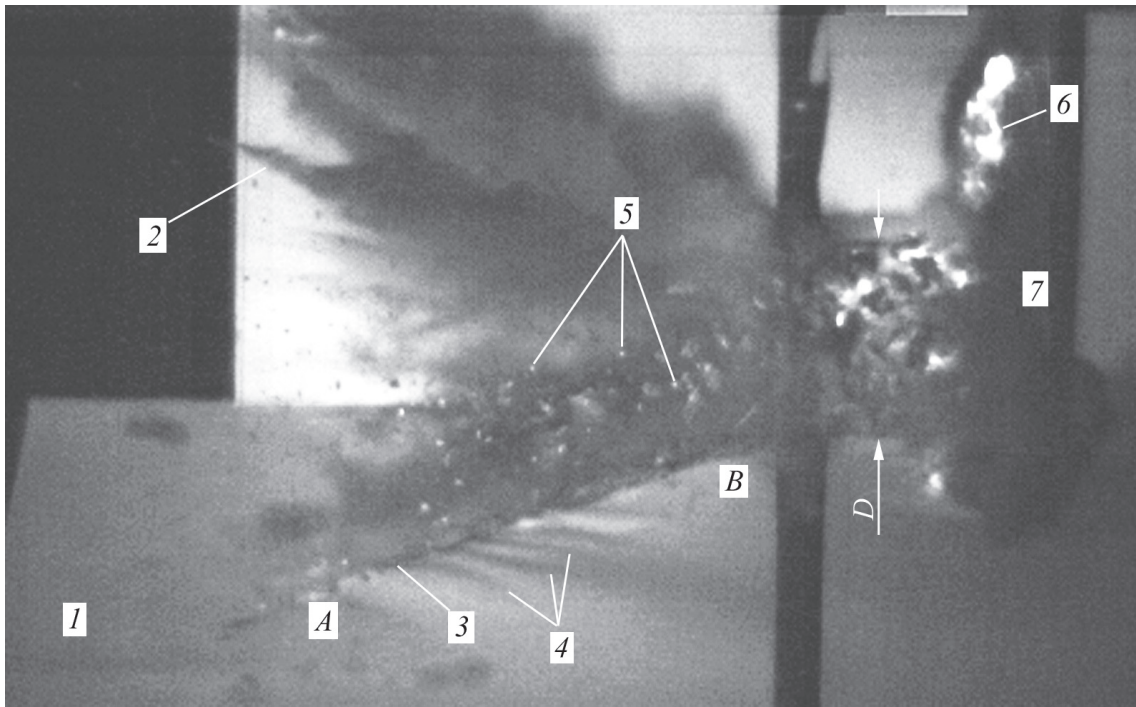


Рис. 5. Видеокادر № 28: 1 — светоотражающий экран; 2 — фронт «холодного» несветящегося потока; 3 — линия *AB* пересечения атомно-парового потока с экраном; 4 — теневое изображение скачков уплотнения; 5 — осколки свинца; 6 — свечение «горячего» свинцового потока на отбойнике; 7 — стальной отбойник; $D \approx 78$ мм — диаметр колонны атомно-паровых продуктов распада свинца за мишенью (справа от мишени)

$m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг — масса протона; $A = 207$ а.е.м. — атомная масса свинца.

Следуя уравнению (2), температуру атомно-паровых продуктов распада свинца оценим как

$$T_0 \approx A \left(\frac{a}{117,5} \right)^2 \approx 207 \left(\frac{1210}{117,5} \right)^2 \approx 21952 \approx 22000 \text{ К.} \quad (3)$$

Кинетическая энергия отдельных частиц, составляющих пар с подобной температурой, эквивалентна значению

$$e\varphi = \frac{k}{e} T_0 = \frac{1,38 \cdot 10^{-23}}{1,6 \cdot 10^{-19}} 21952 = 1,89 \text{ эВ/атом,} \quad (4)$$

которое меньше энергии металлической связи свинца $\epsilon_{Pb} = 2,04$ эВ/атом всего лишь на

$$\Delta\epsilon = \frac{\epsilon_{Pb} - e\varphi}{\epsilon_{Pb}} 100 = \frac{2,04 - 1,89}{2,04} 100 = 7,3\%.$$

Практическое равенство $\epsilon_{Pb} \approx e\varphi$ указывает на высокую вероятность того, что причиной испарения твердого свинца является ударная нагрузка, достигнутая в настоящем опыте [2].

Из графиков на рис. 4 видно, что скорость v_f фронта атомно-парового потока свинца уменьша-

ется во времени со средним значением отрицательного ускорения

$$a = \frac{\Delta v_f}{\Delta t} \approx \frac{v_{f25} - v_{f22}}{t_{25} - t_{22}} = \frac{361 - 1128}{(160 - 40) 10^{-6}} \approx -6,4 \cdot 10^6 \text{ м/с}^2. \quad (5)$$

Уравнение справедливо на участке длиной $L = 144,4 - 22,6 = 121,8$ мм (см. рис. 4, *a* и таблицу). В него входят: v_{f25} и v_{f22} — скорость фронта потока перед моментом экспозиции кадров № 25 и № 22 соответственно, а также t_{25} и t_{22} — время съемки соответствующих кадров, мкс.

В видеокadre кадре № 28 на рис. 5 хорошо различимы скачки уплотнения 4, сформированные в промежутке времени между съемкой кадров № 25 и № 26. Среднее значение угла $\alpha \approx 25^\circ$ между изображением каждого из скачков 4 и линией *AB* позволяет оценить число Маха в атомно-паровом потоке:

$$M = \frac{1}{\sin \alpha} = \frac{1}{\sin 25} = 2,36.$$

Полученному числу M соответствует скорость потока свинцового пара (2) в воздухе при нормальных условиях

$$v_{fM} = Ma_{Pb} = 2,36 \cdot 8,17 \sqrt{300} = 334 \text{ м/с.} \quad (6)$$

Здесь принято, что температура атомно-паровых продуктов распада свинца по линии AB составляет $T_0 = 300 \text{ К}$. Вычисленная таким образом (6) скорость v_{fM} близка к значениям $v_f(z) = 361 \dots 406 \text{ м/с}$, экспериментально измеренным на отрезке $z = 144,4 \dots 192,2 \text{ мм}$ (см. рис. 4,а).

В результате инерциального взрыва свинец преграды превратился в пар и твердые осколки размером $0,5\text{—}3 \text{ мм}$ (рис. 5). Масса продуктов взрыва преграды составила $\Delta m = 0,91 \div 0,68 = 0,23 \text{ кг}$, что в $d = 0,23 / 0,027 = 8,5$ раз больше массы свинцового ударника $m = 0,027 \text{ кг}$, см. выше. Доля паровой фазы в продуктах взрыва преграды составляет около 60%, остальная часть приходится на долю твердых осколков.

Выводы

В результате ударного взаимодействия свинцовых ударника и преграды возникает атомно-паровая смесь, обладающая свойствами газа. Время, необходимое для зарождения смеси, — порядка одной мкс. Твердые осколки свинца появляются на месте соударения через $100\text{—}140 \text{ мкс}$ после касания ударником преграды (см. кадр № 24 на рис. 3).

Экспериментально установлено, что твердый свинец переходит в состояние атомно-паровой смеси при скорости встречи с твердой преградой, равной $1128 \pm 14 \text{ м/с}$. Благодаря тепловой энергии, выделяющейся на месте удара, температура смеси повышается до 22000 К или $1,89 \text{ эВ/атом}$, что соответствует энергии металлической связи свинца, $\epsilon_{Pb} = 2,04 \text{ эВ/атом}$. Практическое совпадение значений двух видов энергии позволяет считать удар причиной нарушения металлической связи, ведущей к прямому переходу свинца из твердого состояния в пар.

В воздухе при нормальных условиях возникший атомно-паровой поток удаляется от преграды со сверхзвуковой скоростью, соответствующей $M \approx 2,4$. Этот поток имеет две тепловые составляющие (высоко- и низкотемпературную), которые движутся с близкими скоростями.

Разрушения от инерциального взрыва охватывают небольшую часть массы неподвижной свинцовой преграды, значение которой составляет около 8,5 массы ударника.

Библиографический список

1. Столкновение искусственных спутников «Космос-2251» и «Иридиум-33». URL: <http://calendarik.com/event/v-2009-godu-na-orbite-zemli-proizoshlo-pervoe-v-istorii-kosmonavtiki-stolknovenie-iskusstvenny%20/>
2. *Марахтанов М.К.* Металл как источник энергии // Известия РАН. Энергетика. 2009. № 1. С. 79-91.
3. *Марахтанов М.К., Марахтанов А.М.* Квантовая макроэлектроника. События макромира, объясняемые законами квантовой механики. Опыт и теория. — М.: КРАСАНД, 2014. — 776 с.
4. *Марахтанов М.К., Велданов В.А., Духопельников Д.В., Карнейчик А.С., Максимов М.А.* Результаты взаимодействия металлических снарядов со стальной мишенью // Вопросы оборонной техники. Сер. 16. 2013. № 3-4. С. 25-34.
5. *Марахтанов М.К., Велданов В.А., Духопельников Д.В., Тарасов М.А.* Экспериментальное исследование электронного импульса в свинцовой пуле при ударе о твердую преграду // Вооружение. Политика. Конверсия. 2012. № 1. С. 21-24.
6. *Киттель Ч.* Введение в физику твёрдого тела. — М.: Наука, 1978. — 791 с.
7. *Войцеховский А.И., Ромейко В.А.* Тунгусский метеорит. 100 лет великой загадке. — М.: Вече, 2008. — 432 с.
8. *Надирадзе А.Б., Смирнов В.А.* Моделирование методом Монте-Карло воздействия метеороидов и техногенных частиц на элементы космических аппаратов // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21. №3. С. 80-91.
9. *Mabire C., Hérelil P.L.* Shock induced melting of lead (experimental study) // Shock Compression of Condensed Matter — 2001, American Institute of Physics. 2002, pp. 229-232.
10. *Зукас Дж.А., Николас Т., Свифт Х.Ф., Грещук Л.Б., Курран Д.Р.* Динамика удара / Пер. с англ. — М.: Мир, 1985. — 296 с.
11. *Рухадзе А.А. и Шпигель И.С.* Электрический взрыв проводников / Пер. с англ. Е.Т. Антропова, В.Н. Колесникова, Е.Е. Ловецкого. — М.: Мир, 1965. — 360 с.

MODELING A SPACECRAFT FRACTURE MECHANISM OCCURRING AS A RESULT OF ITS METAL COMPONENTS INERTIAL EXPLOSION AT COLLISION

Marakhtanov M.K.*, **Veldanov V.A.****, **Dukhopel'nikov D.V.*****, **Karneichik A.S.******,
Krutov I.S.*****, **Makarov A.A.*******

*Bauman Moscow State Technical University,
MSTU, 5, 2-nd Baumanskaya, Moscow, 105005, Russia*

* e-mail: mkm@power.bmstu.ru

** e-mail: vevladi@mail.ru

*** e-mail: duh@power.bmstu.ru

**** e-mail: karas-dimitrov@mail.ru

***** e-mail: is.krutov@mail.ru

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

Abstract

The accidents of two Earth satellites collision when impact velocity of the spacecraft abeam reached 10.5 km/s. This velocity is several times than that required for a crystal lattice inertial explosion of the metal, constituting the spacecraft body. Inertial explosion parameters of metal components, which can occur at the contact point of the collided spacecraft, are studied. The paper demonstrates experimental and computed data on the collision velocity, causing such an explosion, as well as motion speed and explosion vaporous products temperature, reaching 22 000 K. It shows that the time necessary for metal transition from the solid state to luminous atomic-vaporous mixture reaction excitation does not exceed 2 μ s, if this transition was caused by mechanical shock. Mass ratio of the exploded metal was determined. All experiments were conducted using lead samples.

Metal preserves its solid state until the metallic binding energy ϵ is enough to preserve its crystal lattice. This energy equals to the sum of a metal heat content from the temperature $T = 0$ K plus evaporation heat up to the sample sublimation. Acquiring the energy of ϵ the metal ceases to be a condensed media and passes to high temperature vapor condition. Such transition occurs while siderite or nickel meteorite collision with Earth, or spacecraft.

The experiment procedure was as follows. The lead ram tester of a cylindrical form weighted 0.027 kg, had the diameter of 14.5 mm and length of 15.2 mm. Its velocity was $v = 1128 + 14$ m/s. The lead target was of a parallelepiped shape of $67 \times 82 \times 15.5$ mm and weighted 0.91 kg. The target mass remained after the lead ram tester stroke was 0.68 kg. The rest lead target mass (as well as the ram tester) evaporated.

During the experiment, the velocity of moving elements was determined by images movement on video frames, recorded by Phantom V 16 model 10 video camera. The exposure time per one frame was $1 / 156000$ s⁻¹, and the shooting speed was 25 000 frames per second.

The shock waves pattern in inertial explosion vaporous products of the two lead structures was obtained. The Mach number measured in the open air equals 2.36.

Keywords: collision of spacecraft, metal inertial explosion, explosion products temperature, metal-to-vapor transition time.

References

1. *Stolknovenie iskusstvennykh sputnikov "Kosmos-2251" i "Iridium-33"*, available at: <http://calendarik.com/event/v-2009-godu-na-orbite-zemli-proizoshlo-pervoe-v-istorii-kosmonavtiki-stolknovenie-iskusstvenny%20/>
2. Marakhtanov M.K. *Izvestiya RAN. Energetika*, 2009, no. 1, pp. 79–91.
3. Marakhtanov M.K., Marakhtanov A.M. *Kvantovaya makroelektronika. Sobytiya makromira, ob "yasnyaemye zakonami kvantovoi mekhaniki. Opyt i teoriya* (Quantum Microelectronics. Events of the macrocosm, explained by the laws of quantum mechanics. Experience and theory), Moscow, KRASAND, 2014, 776 p.
4. Marakhtanov M.K., Veldanov V.A., Dukhopel'nikov D.V., Karneichik A.S., Maksimov M.A. *Voprosy oboronnoi tekhniki. Seriya 16*, 2013, no. 3-4, pp. 25-34.
5. Marakhtanov M.K., Veldanov V.A., Dukhopel'nikov D.V., Tarasov M.A. *Vooruzhenie. Politika. Konversiya*, 2012, no. 1, pp. 21-24.
6. Kittel' Ch. *Vvedenie v fiziku tverdogo tela* (Introduction to solid-state physics), Moscow, Nauka, 1978, 791 p.

7. Voitsekhovskii A.I., Romeiko V.A. *Tungusskii meteorit. 100 let velikoi zagadke* (The Tunguska meteorite. 100 years of the Great Puzzle), Moscow, Veche, 2008, 432 p.
8. Nadiradze A.B., Smirnov V.A. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2014, vol. 21, no. 3, pp. 80–91.
9. Mabire C., Héreil P.L. Shock induced melting of lead (experimental study). *Shock Compression of Condensed Matter – 2001*, American Institute of Physics, 2002, pp. 229-232.
10. Zukas Jonas A., Nicholas Theodore, Swift Hallock F., Greszczuk Longin B., Curran Donald R. *Impact Dynamics*. New York: A Wiley-Interscience Publication John Wiley & Sons, 1982, 452 p.
11. Rukhadze A.A., Shpigel' I.S. *Elektricheskii vzryv provodnikov* (Electric explosion of conductors), Moscow, Mir, 1965, 360 p.