

Уплотнение формируемых кумулятивными зарядами высокоскоростных металлических элементов посредством магнитно-импульсного воздействия

© С.В. Федоров, И.А. Болотина, В.И. Горелов, Ю.А. Струков

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

Для испытаний объектов ракетно-космической техники на стойкость к ударному воздействию метеороидов и осколков космического мусора можно использовать формируемые взрывом высокоскоростные металлические элементы. Накопление микроповреждений в результате интенсивного пластического деформирования приводит к снижению средней плотности высокоскоростных элементов, формирующихся при взрывном обжиге профилированных металлических облицовок. Для уплотнения таких элементов при испытаниях с их помощью стойкости противометеоритной защиты предлагается использовать воздействие на элементы магнитного поля, создаваемого на траектории движения перед взаимодействием с мишенью. На основе численного моделирования в рамках одномерной осесимметричной задачи механики и электродинамики сплошных сред исследованы физические процессы, происходящие в пористом проводящем упругопластическом цилиндре, помещенном в магнитное поле. С использованием данной модели определены параметры магнитно-импульсного воздействия, необходимые для уплотнения стальных и алюминиевых элементов.

Ключевые слова: космический мусор, противометеоритная защита, кумулятивный заряд, высокоскоростной элемент, пористый материал, уплотнение, магнитное поле, магнитно-импульсное воздействие, численное моделирование

Введение. Столкновения космических аппаратов (КА) с твердыми телами естественного и искусственного происхождения относятся к числу важнейших факторов, способных привести к повреждению и разрушению техники [1–3]. На начальных этапах освоения космоса рассматривалась возможность столкновения КА только с телами, входящими в состав метеорной материи. Однако уже к концу 1970-х годов стало очевидно, что в результате широкомасштабной космической деятельности [4–7] околоземное космическое пространство оказалось засоренным большим количеством объектов искусственного происхождения, не выполняющих каких-либо полезных функций (детали и фрагменты последних ступеней ракет-носителей, аварийных и отработавших свой срок КА) [8, 9]. Результаты исследований, проведенных в России, США, Франции, Германии и Японии, указывают на прогрессивный характер процесса засорения околоземного космического пространства.

По разным оценкам, на низких околоземных орбитах вплоть до высот 1,5–2,0 тыс. км к настоящему времени скопилось до 5000 т

техногенных объектов, причем общее количество фрагментов, имеющих поперечник более 1 см (фрагменты именно такого и большего размера представляют серьезнейшую опасность), не поддается точному подсчету и, вполне возможно, существенно превышает 100 тыс. [1]. Из них обнаружена и отслеживается наземными радиолокационными и оптическими средствами лишь малая доля (несколько процентов). В августе 2014 г. в Российском каталоге фрагментов космического мусора насчитывалось 15,8 тыс. объектов, а всего на околоземных орбитах находилось более 17,1 тыс. объектов, включая спутники. Около 6 % отслеживаемых объектов — действующие, около 22 % объектов прекратили функционирование, 17 % представляют собой отработанные верхние ступени и разгонные блоки ракет-носителей и около 55 % — отходы, технологические элементы, сопутствующие запускам, и обломки разрушившихся КА. Можно уменьшить ущерб от столкновений КА с фрагментами космического мусора и метеорной материи размером менее 1 см, усилив защиту наиболее важных узлов и конструктивных элементов [10–12].

Для моделирования метеоритного воздействия на защитные конструкции КА на этапе их отработки и испытаний необходимо получать высокоскоростные компактные металлические элементы (с учетом состава космического мусора противоударная стойкость защитных экранов определяется в основном по отношению к стальным и алюминиевым ударникам) [13–15]. Пути решения данной проблемы могут быть связаны с использованием различных метательных устройств — легкогазовых баллистических установок, электромагнитных ускорителей, взрывных устройств [16–18]. При выборе типа разгонного устройства помимо обеспечиваемых им параметров ударников большое значение также имеют его габаритные размеры («громоздкость»), сложность и трудоемкость проведения экспериментов с использованием устройств данного типа. В этом отношении преимуществом обладают взрывные метательные устройства, которые получили широкое распространение вследствие их высокой эффективности при относительной простоте, небольших габаритах и адаптируемости к лабораторным условиям, малой стоимости, способности легко изменять размеры ускоряемых тел. Конструкции взрывных метательных устройств, осуществляющих разгон материалов за счет энергии взрыва заряда химического взрывчатого вещества, в свою очередь, отличаются достаточно широким многообразием [18, 19]. Однако главенствующее положение среди них по достигаемым параметрам высокоскоростных ударников (их массе и скорости) занимают осесимметричные кумулятивные заряды, имеющие на одном из торцов выемку специальной формы, покрытую соответствующей ей профилированной металлической облицовкой [20–23]. К числу подобных кумулятивных зарядов относится заряд с облицовкой комбинированной формы полусфера-цилиндр (ПЦ-облицовкой) [24, 25]. Согласно данным, приведенным в [26], применение ПЦ-облицовки

позволило отработать систему геометрически подобных кумулятивных зарядов, устойчиво формирующих компактные стальные элементы массой от 17 до 100 г со скоростью около 6 км/с.

Взрывное формирование высокоскоростного компактного элемента с использованием ПЦ-облицовки на основании результатов численного моделирования [25] в рамках двумерной осесимметричной задачи механики сплошных сред проиллюстрировано на рис. 1 (диаметр кумулятивного заряда составлял 100 мм). Видно, что особенностью процесса формирования компактного элемента из ПЦ-облицовки является его двустадийный характер. На первой стадии при схлопывании полусферической части облицовки формируется струйное течение, от которого на второй стадии схлопывающейся цилиндрической частью отсекается головной участок, продолжающий после этого свое дальнейшее движение как высокоскоростное компактное тело. Осевая скорость v_z на отсеченном участке постоянна и составляет чуть более 6 км/с. Движущаяся вслед за сформировавшимся элементом тонкая струя материала облицовки (см. рис. 1), по данным рентгенографирования [15, 26], разрушается на мелкие частицы вследствие существующего в ней градиента осевой скорости v_z и постепенно рассеивается в радиальном направлении.

Поскольку формирование высокоскоростных компактных элементов при использовании кумулятивных зарядов происходит в результате интенсивного пластического деформирования материала облицовки, в формирующемся элементе могут возникать и накапливаться многочисленные микрповреждения (микротрещины, микропоры и т. п.), в связи с чем уменьшается его средняя плотность по сравнению с плотностью исходного материала облицовки. При взрывном обжатии ПЦ-облицовки наиболее критичным в этом отношении является момент отсечки головного участка струйного течения схлопывающейся цилиндрической частью облицовки (см. рис. 1). Ударное воздействие на отсекаемый участок приводит к распространению по нему волны сжатия с последующей разгрузкой со свободной поверхности, в ходе которой в материале формирующегося высокоскоростного элемента возникает напряженное состояние всестороннего растяжения, создавая весомые предпосылки для «разрыхления» материала.

Согласно оценкам [15], плотность стальных элементов, формируемых в экспериментах кумулятивным зарядом с ПЦ-облицовкой и имеющих скорость 5,8 км/с, была ниже плотности материала облицовки ($7,8 \text{ г/см}^3$) и составляла $4,1 \dots 6,1 \text{ г/см}^3$. При этом известно, что характер повреждения мишени при высокоскоростном воздействии в существенной степени зависит от плотности материала ударника [27, 28].

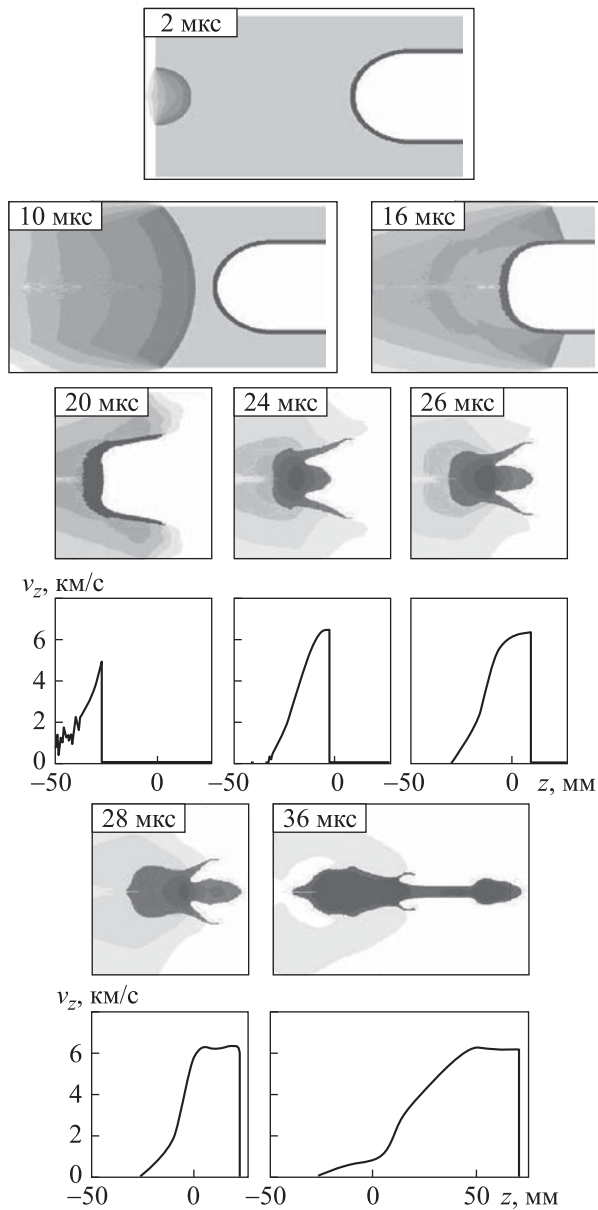


Рис. 1. Формирование высокоскоростного компактного элемента при взрыве кумулятивного заряда с облицовкой комбинированной формы полусфера-цилиндр

Цель настоящей работы — исследование возможности уплотнения сформированных взрывом пористых элементов (ПЭ) на этапе их движения до взаимодействия с мишенью для создания условий моделирования метеоритного воздействия, адекватных реальным условиям столкновения космического аппарата с «монолитным» металлическим осколком на орбите.

Принцип магнитно-импульсного уплотнения. На первый взгляд, трудности, возникающие при решении сформулированной задачи, могут показаться непреодолимыми — необходимо воздействовать на элемент, движущийся со скоростью несколько километров в секунду, причем это не должно привести к разрушению элемента, уменьшению его скорости или изменению траектории движения, но в то же время должно быть достаточным для его «поджатия». Возможный путь решения этой задачи, дающий основания рассчитывать на успех, может быть связан с использованием электромагнитного воздействия на движущийся ПЭ. Основанием для рассмотрения подобного способа служат результаты исследований по управлению кумулятивным эффектом взрыва посредством электромагнитных воздействий [29–33].

Физическая идея «электромагнитного» уплотнения движущегося ПЭ заключается в следующем (рис. 2): на пути движения полностью сформировавшегося элемента перед его взаимодействием с мишенью с помощью расположенного соосно с кумулятивным зарядом соленоида создается продольное магнитное поле. При входе ПЭ в область с полем (пролете через полость соленоида) в его материале (при наличии у него электропроводности) индуцируются вихревые электрические токи [34]. Взаимодействие этих токов с магнитным полем приводит к появлению в материале ПЭ объемных электромагнитных сил, стремящихся сжать элемент. На этой стадии при достаточной интенсивности сжимающих электромагнитных сил может произойти «поджатие» элемента с уплотнением его материала.

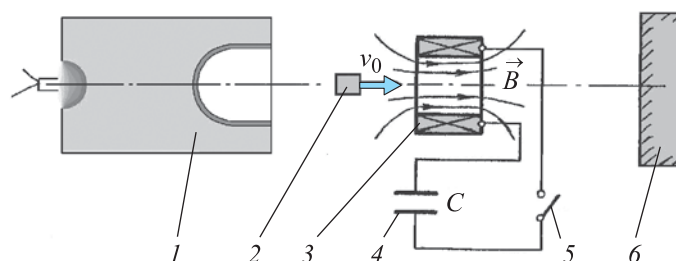


Рис. 2. Схема магнитно-импульсного уплотнения сформированного взрывом металлического элемента:

- 1 — кумулятивный заряд; 2 — высокоскоростной элемент; 3 — соленоид;
4 — конденсаторная батарея; 5 — коммутатор; 6 — мишень

По мере движения элемента в магнитном поле вследствие конечной электропроводности его материала (наличия электросопротивления) будет происходить постепенное затухание индукционных токов с диффузией поля вглубь элемента. Этот процесс ведет к ослаблению сжимающего силового действия поля на элемент. При выходе элемента из области с созданным магнитным полем начинается обратная диффузия проникшего в элемент поля с уменьшением его интенсивности, что также сопровождается циркуляцией в материале

элемента индукционных токов и действием электромагнитных сил, изменяющихся на этом этапе со сжимающих на растягивающие.

Очевидно, при выборе параметров рассмотренного электромагнитного воздействия на ПЭ важно обеспечить, чтобы темп изменения внешнего поля при движении элемента через область воздействия был существенно выше темпа диффузии поля в материал элемента. Характер изменения поля, воздействующего на элемент, зависит от скорости элемента и протяженности области на пути его движения с созданным магнитным полем (при условии, что поле постоянно во времени или изменяется незначительно за время пребывания в нем элемента). Таким образом, управление процессом «электромагнитного» уплотнения ПЭ может осуществляться посредством соответствующего выбора интенсивности создаваемого на пути его движения магнитного поля и протяженности области с созданным полем (длины соленоида), определяющей продолжительность воздействия.

Физико-математическая постановка задачи. Исследование процессов, происходящих в ПЭ при воздействии на него импульсного магнитного поля, базировалось на физико-математической модели, сформулированной в рамках одномерной осесимметричной задачи механики и электродинамики сплошных сред. В разработанной модели рассматривается цилиндрический стержень из проводящего пористого материала, помещенный в изменяющееся по определённому закону внешнее продольное (ориентированное вдоль оси стержня) магнитное поле $B_e(t)$ (рис. 3, а).

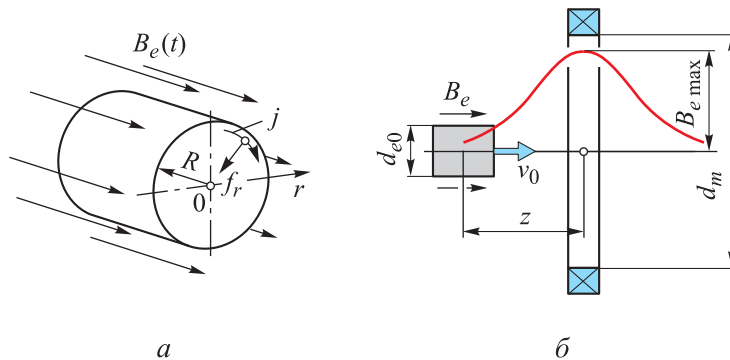


Рис. 3. Расчетная схема воздействия магнитного поля на проводящий пористый цилиндр

Уравнение радиального движения частиц стержня под действием электромагнитных сил с объемной плотностью $f_r = jB$ запишется в виде

$$\rho \frac{du}{dt} = \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + jB, \quad (1)$$

где ρ — плотность пористого материала; u — скорость радиального движения; σ_r, σ_θ — радиальная и тангенциальная компоненты тензора напряжений; j — плотность азимутальных индукционных токов, $j = -(\partial B / \partial r) / \mu_0$ ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная); B — индукция магнитного поля в материале стержня.

Изменение плотности пористого материала будет происходить в соответствии с уравнением неразрывности

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho (\dot{\epsilon}_r + \dot{\epsilon}_\theta), \quad (2)$$

где $\dot{\epsilon}_r, \dot{\epsilon}_\theta$ — радиальная и тангенциальная компоненты тензора скоростей деформации, связанные кинематическими соотношениями $\dot{\epsilon}_r = \partial u / \partial r$; $\dot{\epsilon}_\theta = u / r$ со скоростью радиального движения u .

Эволюция магнитного поля в материале стержня будет описываться уравнением индукции [34]

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{B}{\rho} \right) = \frac{\eta}{\mu_0 \rho r} \frac{\partial B}{\partial r} + \frac{1}{\mu_0 \rho} \frac{\partial}{\partial r} \left(\eta \frac{\partial B}{\partial r} \right), \quad (3)$$

где η — удельное сопротивление пористого материала.

С использованием (2) уравнение (3) может быть приведено к виду

$$\frac{dB}{dt} = -(\dot{\epsilon}_r + \dot{\epsilon}_\theta) B + \frac{\eta}{\mu_0 r} \frac{\partial B}{\partial r} + \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial}{\partial r} \left(\eta \frac{\partial B}{\partial r} \right),$$

более удобному для проведения численных расчетов.

Циркулирующие в стержне индукционные токи вызывают его джоулев нагрев [35] с повышением температуры T пористого материала, происходящим согласно соотношению

$$\rho c_s \frac{dT}{dt} = j^2 \eta,$$

где c_s — удельная теплоемкость сплошного материала.

Для описания механического поведения материала стержня принимается модель сжимаемой упругопластической среды. Компоненты девиатора напряжений s_r, s_θ, s_z при деформировании такой среды могут быть рассчитаны в предположении ее упругого поведения с последующей их корректировкой на основании условия текучести $s_r^2 + s_\theta^2 + s_z^2 \leq (2/3) \sigma_Y^2$ (σ_Y — предел текучести пористого материала [36]).

Наличие микропустот в материале стержня характеризуется коэффициентом поврежденности α , определяемым как $\alpha = \rho_s / \rho$ (ρ_s — плотность сплошного (неповрежденного) материала). В предположении сферической формы микропор их рост и сжатие в пористой среде с действующим в ней давлением p могут быть описаны кинетическим уравнением [37]

$$\frac{d\alpha}{dt} = -\frac{(\alpha_0 - 1)^{2/3}}{\beta} \alpha (\alpha - 1)^{1/3} \Delta p \operatorname{sign}(p)$$

при $\Delta p > 0$, где величина Δp определяется как

$$\Delta p = |p| - \frac{2}{3} \frac{\sigma_{Ys}}{\alpha} \ln\left(\frac{\alpha}{\alpha - 1}\right);$$

α_0 — исходная поврежденность; β — константа материала; σ_{Ys} — предел текучести материала матрицы.

При $\Delta p \leq 0$ поврежденность материала не изменяется.

Предел текучести пористого материала σ_Y определяется соотношением $\sigma_Y = \sigma_{Ys} / \alpha$ [37]. В модели учитывалось термическое разупрочнение материала матрицы с линейным снижением его предела текучести σ_{Ys} от значения $\sigma_{Ys,n}$ при нормальной температуре до нулевого значения при нагреве материала до температуры плавления. Удельное сопротивление пористого материала η выражалось через удельное сопротивление материала матрицы η_s как $\eta = \alpha \eta_s$. Увеличение удельного сопротивления металла с повышением его температуры предполагалось происходящим по закону [35]

$$\eta_s = \eta_{s,n} (1 + \gamma(T - T_n)),$$

где $\eta_{s,n}$ — удельное сопротивление при нормальной температуре T_n ; γ — температурный коэффициент сопротивления.

Давление p в пористой среде, с использованием которого определялись входящие в уравнение движения частиц стержня (1) компоненты тензора напряжений $\sigma_r = s_r - p$ и $\sigma_\theta = s_\theta - p$, рассчитывалось по уравнению состояния для сплошной компоненты, бравшемуся в виде ударной адиабаты в форме Тета [18]:

$$p = A \left((\rho_s / \rho_{s0})^n - 1 \right) / \alpha,$$

где A, n — эмпирические константы материала; ρ_{s0} — плотность материала матрицы при нормальных условиях.

Зависимостью давления от внутренней энергии материала пренебрегали, так как ее изменение в рассматриваемых условиях нагружения стержня предполагалось относительно небольшим (исключающим фазовые превращения материала).

Граничные условия в рассматриваемой модели являются следующими. На оси стержня ($r = 0$) полагаются отсутствующими радиальная скорость движения его частиц и азимутальные индукционные токи, т. е. $u(0, t) = 0$; $(\partial B / \partial r)|_{r=0} = 0$. Поверхность стержня ($r = R$, где R — текущий радиус стержня, см. рис. 3, а) считалась свободной от действия внешних поверхностных сил: $\sigma_r(R, t) = 0$. Магнитное поле на поверхности стержня задавалось изменяющимся по определенному закону: $B(R, t) = B_e(t)$. В предположении малого искажения внешнего поля индуцирующимися в материале ПЭ вихревыми токами [26] при заданном распределении продольной компоненты поля $B_e(z)$ вдоль направления полета и постоянной скорости элемента v_0 (рис. 3, б) этот закон может быть представлен так:

$$B_e(t) = B_e(z(t)) = B_e(z_0 + v_0 t), \quad (4)$$

где z_0 — координата элемента, характеризующая его положение перед создающей магнитное поле системой в начальный момент времени (полагаем, что в случае нестационарности созданного перед элементом поля темп его изменения достаточно мал, так что интенсивность поля не успевает существенно измениться за время пребывания в нем элемента).

Отметим, что в рамках сформулированной модели описывается эволюция параметров фактически в отдельных поперечных сечениях ПЭ в системе отсчета, связанной с данным сечением. Поэтому в законе изменения магнитного поля на поверхности ПЭ (4) координату z элемента следует понимать как координату какого-либо его поперечного сечения (кривые изменения магнитного поля на границе различных сечений одни и те же, они лишь сдвинуты по времени).

Для решения сформулированной задачи был применен численный конечно-разностный метод, базирующийся на методе Уилкинса [36].

Для иллюстрации принципиальной возможности магнитно-импульсного уплотнения высокоскоростного ПЭ было рассмотрено движение элемента вдоль оси простейшей магнитной системы (см. рис. 3, б) — токового витка (соленоида с длиной, существенно меньшей его радиуса). В соответствии с распределением магнитного поля на оси токового витка [35] временная зависимость (4) поля, воздействующего на движущийся элемент, примет вид (при отсчете координаты z , характеризующей положение отдельных поперечных сечений элемента, от центра витка, рис. 3, б)

$$B_e(t) = B_{e\max} \frac{(d_m/2)^3}{\left((d_m/2)^2 + (z_0 + v_0 t)^2\right)^{3/2}}, \quad (5)$$

где $B_{e\max}$ — индукция магнитного поля в центре витка (максимум интенсивности воздействующего поля); d_m — диаметр витка.

Начальная координата выделенного сечения элемента в (5) принималась $z_0 = -2d_m$ (интенсивность поля в данной точке составляет менее 1,5 % интенсивности поля в центре витка). Согласно (5), при одной и той же интенсивности поля в центре витка увеличение его диаметра приводит к расширению области с созданным магнитным полем и обеспечивает, соответственно, более плавный характер изменения поля, воздействующего на элемент.

Анализ уплотнения стальных и алюминиевых элементов. Основное внимание в расчетах было уделено «компактированию» стальных ПЭ. По сравнению с формируемыми взрывом элементами из других металлов, также используемыми в испытаниях на противометеоритную стойкость (например, алюминиевыми или медными), стальные вследствие их более высокой прочности и удельного сопротивления сложнее уплотнить посредством магнитно-импульсного воздействия. Поэтому демонстрация достижения положительного эффекта на алюминиевых или медных ПЭ еще не гарантирует успеха в отношении магнитно-импульсного «компактирования» стальных ПЭ. Между тем, с учетом состава космического мусора (в котором наблюдается возрастание доли стальных фрагментов), испытания противометеоритной защиты КА на стойкость к воздействию стальных высокоскоростных элементов приобретают все большую актуальность.

Исходные параметры стального элемента задавались близкими к полученным в экспериментах [15]: скорость $v_0 = 5$ км/с, начальный диаметр $d_{e0} = 10$ мм, поврежденность материала в исходном состоянии предполагалась равномерно распределенной по радиусу ПЭ и характеризовалась относительной плотностью $\rho_0/\rho_{s0} = 0,7$ (начальная плотность ПЭ $\rho_0 = 0,7\rho_{s0} = 5,46$ г/см³, где $\rho_{s0} = 7,8$ г/см³ — плотность стали). Предел текучести стальной матрицы при нормальной температуре брался равным $\sigma_{Ys,n} = 500$ МПа. Поскольку при взрывном формировании высокоскоростных металлических элементов происходит существенный разогрев их материала в результате интенсивного пластического деформирования, с учетом данных из работы [18] начальная температура материала ПЭ принималась равной $T_0 = 500$ °С (при равномерном ее распределении по радиусу элемента).

В расчетах предполагалось, что воздействующее на движущийся ПЭ магнитное поле создавалось токовым витком (см. рис. 3, б) с диаметром $d_m = 50$ мм (достаточным для свободного пролета элемента даже с учетом возможного отклонения его траектории от оси симметрии системы кумулятивный заряд—соленоид).

Было установлено, что при рассматриваемых параметрах стального ПЭ эффект магнитно-импульсного уплотнения элемента начинает проявляться при индукции поля в центре витка свыше 40 Тл. Изменение с течением времени внешнего поля B_e , поля B_c на оси ПЭ, температуры нагрева T_e поверхности ПЭ, радиального напряжения $\sigma_{r,c}$ на оси ПЭ и относительной средней плотности ρ_{av}/ρ_{s0} материала элемента при значениях $B_{e\max} = 40$ Тл и $B_{e\max} = 50$ Тл проиллюстрировано на рис. 4. Средняя плотность ПЭ ρ_{av} определялась через его текущий диаметр d_e как $\rho_{av} = \rho_0 d_{e0}^2 / d_e^2$. Моменту пролета элемента (его выделенного сечения) через плоскость витка на рис. 4 соответствует время $t = 20$ мкс. На рисунке видно, что высокое удельное сопротивление материала нагретой стальной матрицы приводит к существенной диффузии внешнего поля вглубь ПЭ. Максимум интенсивности поля на оси ПЭ, достигаемый с задержкой чуть более 5 мкс относительно момента пересечения плоскости витка, составляет 50...60 % от максимальной интенсивности внешнего поля. Увеличение средней плотности материала ПЭ происходит также в течение промежутка времени около 5 мкс, соответствующего максимуму внешнего поля. После этого плотность практически не изменяется и составляет примерно $0,74\rho_{s0}$ при $B_{e\max} = 40$ Тл и $0,84\rho_{s0}$ при $B_{e\max} = 50$ Тл.

На примере изменения радиальных напряжений на оси ПЭ при $B_{e\max} = 50$ Тл (см. рис. 4) видно, что сжимающие напряжения при движении ПЭ в магнитном поле сначала нарастают плавно. При достижении ими значения в несколько сотен мегапаскалей (близкого к пределу текучести материала ПЭ) происходит сжатие микропор и возрастает плотность ПЭ. На заключительной стадии роста плотности ПЭ при $B_{e\max} = 50$ Тл наблюдается резкий всплеск сжимающих радиальных напряжений на оси с их увеличением свыше 2 ГПа. Этот всплеск связан с полной «выборкой» пористости в приосевой области. Продолжающееся радиальное сходящееся движение материала приводит при этом к сжатию уже сплошных его слоев, жесткость которых существенно возрастает по сравнению с жесткостью пористого материала.

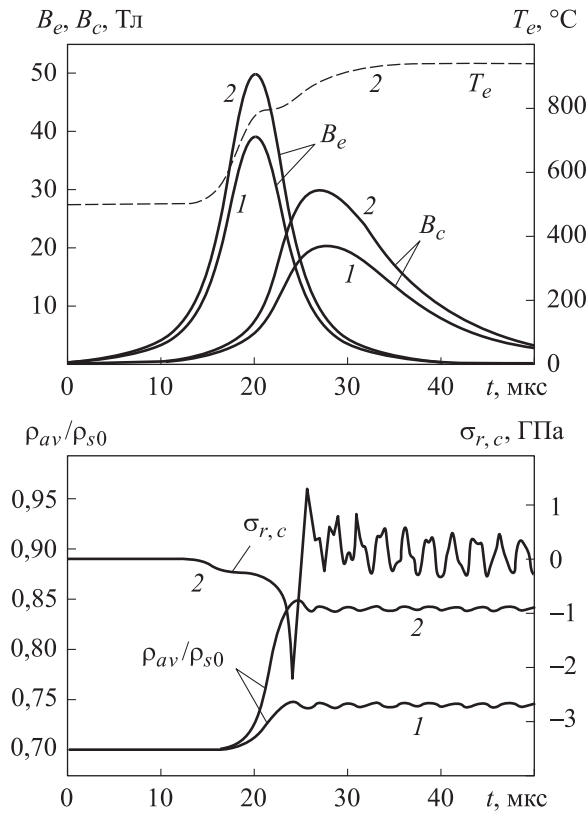


Рис. 4. Изменение параметров состояния стального пористого элемента в процессе магнитно-импульсного уплотнения при диаметре токового витка $d_m = 50$ мм:

1 — $B_{e\max} = 40$ Тл; 2 — $B_{e\max} = 50$ Тл

Формирующаяся в приосевой области волна сжатия при отражении от свободной поверхности элемента трансформируется в волну растяжения материала. В результате после выхода элемента из области воздействия в нем продолжают происходить упругие колебания с чередованием фаз действия сжимающих и растягивающих напряжений. Период этих колебаний составляет около 2,5 мкс, что примерно соответствует удвоенному времени пробега упругой волны по радиусу сечения. В том случае, если интенсивность магнитно-импульсного воздействия не приводит к полному «залечиванию» пористости в глубине материала ПЭ, эффект резкого роста сжимающих напряжений не проявляется. Упругие колебания в ПЭ после окончания воздействия при этом также происходят, но с меньшей амплитудой.

Циркулирующие в материале ПЭ индукционные токи приводят к довольно существенному его разогреву (недостаточному, однако, для начала фазовых превращений). Повышение температуры поверхности ПЭ при $B_{e\max} = 50$ Тл за счет выделения джоулевой теплоты

составляет свыше 400 °С (см. рис. 4). При этом на температурной кривой условно можно выделить две стадии джоулева нагрева, разделенные небольшим горизонтальным участком, приходящимся на время максимума внешнего поля. Этот горизонтальный участок (отсутствие нагрева) соответствует моменту смены направления протекания индукционных токов на поверхности элемента (с переходом их плотности через нулевое значение). До данного момента происходит диффузия поля вглубь ПЭ, а после него поле диффундирует наружу.

Эволюция распределений по радиусу ПЭ индукции магнитного поля, радиального напряжения, температуры и относительной плотности материала при магнитно-импульсном уплотнении с максимумом поля $B_{e\max} = 50$ Тл проиллюстрирована на рис. 5. Как следует из распределений ρ/ρ_{s0} , сначала несколько быстрее уплотняются слои материала, удаленные от оси элемента (распределение ρ/ρ_{s0} при $t = 20$ мкс). Деформируясь, они демпфируют нагрузку на внутренние слои, и радиальные напряжения в окрестности оси в этот момент немного ниже, чем на некотором удалении от нее (распределение σ_r при $t = 20$ мкс). Впоследствии в связи с быстрой диффузией магнитного поля вглубь материала (распределение B при $t = 23$ мкс) сжатие локализуется в приосевой области, где и происходит в основном увеличение плотности ПЭ. При приближении величины ρ/ρ_{s0} вблизи оси к единичному значению (распределение ρ/ρ_{s0} при $t = 23$ мкс) наблюдается отмечавшийся выше эффект увеличения сжимающих напряжений (распределение σ_r при $t = 23$ мкс). Накопленная уже почти сплошным материалом центрального «ядра» потенциальная энергия объемного сжатия «отбрасывает» материал ПЭ от оси, и радиальные напряжения в нем становятся растягивающими (распределение σ_r при $t = 26$ мкс). В ходе возникающего после этого процесса радиальных колебаний ПЭ распределение его плотности остается практически неизменным (распределения ρ/ρ_{s0} при $t \geq 26$ мкс).

Следует отметить, что начальная стадия упругих колебаний ПЭ происходит в условиях небольшого преобладания растягивающих напряжений (это видно по характеру изменения величины $\sigma_{r,c}$ в интервале времени от 25 до 35 мкс на рис. 4). Данное обстоятельство связано с протеканием процесса обратной диффузии магнитного поля из материала ПЭ при его выходе из области воздействия. Однако величина электромагнитных усилий на данной стадии процесса невелика, и достигнутый на предшествующих стадиях уровень уплотнения ПЭ сохраняется.

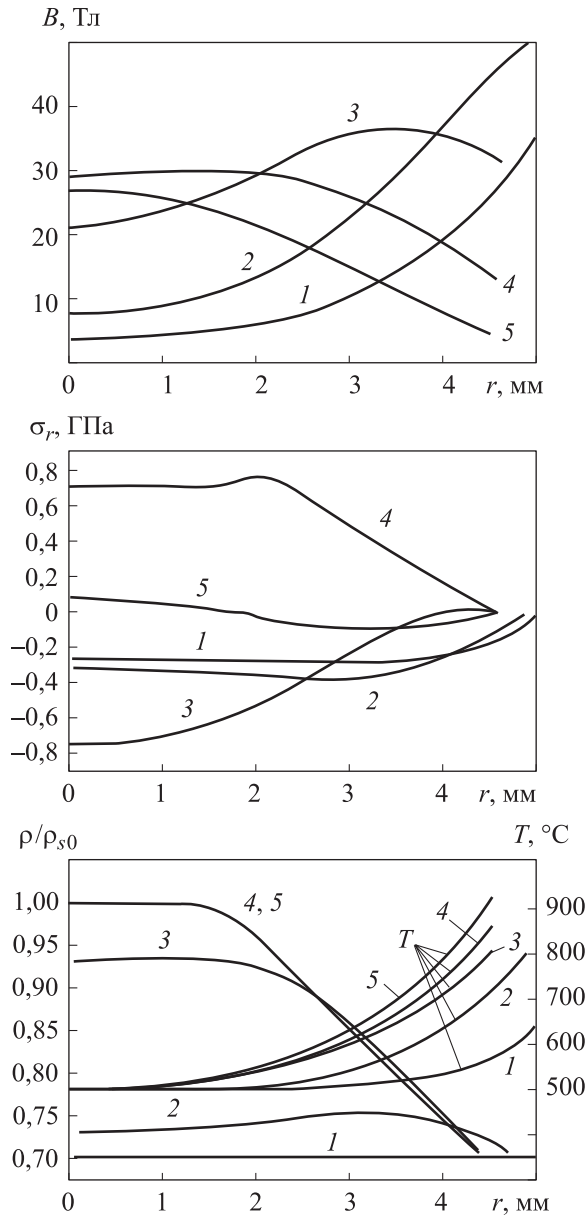


Рис. 5. Эволюция радиальных распределений параметров в стальном пористом элементе при магнитно-импульсном уплотнении:
 1 — $t = 17,5$ мкс; 2 — $t = 20$ мкс; 3 — $t = 23$ мкс; 4 — $t = 26$ мкс; 5 — $t = 30$ мкс

Эволюция радиального распределения температуры в элементе (см. рис. 5) указывает, что, несмотря на глубокую диффузию магнитного поля вглубь стальной матрицы, выделение джоулевой теплоты локализовано в основном в ее наружном слое. К моменту окончания воздействия толщина наружного прогретого слоя составляет примерно половину радиуса элемента. Прирост температуры в этом слое

изменяется от нескольких десятков градусов на его внутренней границе до нескольких сотен градусов на поверхности элемента. Индукционного нагрева центрального уплотнившегося «ядра», где $\rho/\rho_{s0} = 1$, практически не происходит.

В рамках рассматриваемой модели влияние повышения температуры пористого материала на эффективность его магнитно-импульсного уплотнения носит неоднозначный характер. С одной стороны, с повышением температуры происходит термическое разупрочнение материала матрицы, что облегчает захлопывание пор, с другой — сопровождающее нагрев увеличение удельного сопротивления матрицы ускоряет диффузию магнитного поля вглубь материала с ослаблением его силового действия. Как показали расчеты, проведенные при различных начальных температурах стального ПЭ, влияние обоих эффектов в значительной степени компенсируется, и достигаемая степень уплотнения ПЭ от его начальной температуры практически не зависит (в диапазоне от 0 до 1000 °С).

Попытка достичь более высокой степени уплотнения (свыше $0,9\rho_{s0}$) рассматриваемого ПЭ, увеличивая интенсивность внешнего поля (при неизменном диаметре токового витка $d_m = 50$ мм), к успеху не привела. При $B_{e\max} = 57$ Тл было обнаружено, что хотя на первоначальном этапе «магнитного обжатия» средняя плотность ПЭ и возрастает примерно до значения $0,93\rho_{s0}$, затем она быстро снижается до уровня $0,87\rho_{s0}$ (рис. 6). В результате анализа процессов, происходящих в ПЭ в данном случае, было установлено, что материал элемента на некоторой стадии воздействия начинает разрушаться. Исходной причиной разрушения является уже отмечавшийся эффект резкого «всплеска» сжимающих напряжений в центральной части ПЭ, происходящий при полном закрытии микропор.

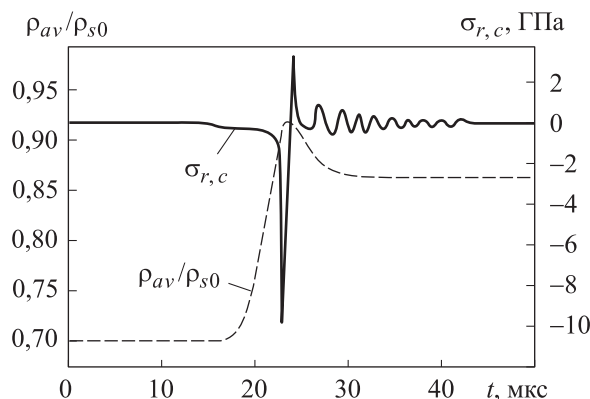


Рис. 6. Изменение относительной средней плотности и радиального напряжения на оси стального пористого элемента при его разрушении в процессе магнитно-импульсного воздействия

При $B_{e\max} = 57$ Тл максимальное значение сжимающих радиальных напряжений на оси ПЭ достигает 10 ГПа (см. рис. 6). На следующей после такого мощного сжатия фазе растяжения материал ПЭ не выдерживает нагрузки и начинает терять сплошность вблизи свободной поверхности (зарождение откола).

Повышение степени уплотнения ПЭ без его разрушения оказывается возможным, если одновременно с увеличением интенсивности магнитно-импульсного воздействия несколько «растянуть» его во времени. В рассматриваемом случае магнитной системы в форме токового витка продолжительность воздействия определяется диаметром витка. Увеличивая диаметр витка до $d_m = 80$ мм, при индукции магнитного поля в его центре $B_{e\max} = 60$ Тл удается достичь средней плотности стального ПЭ ($d_{e0} = 10$ мм, $v_0 = 5$ км/с) после окончания воздействия на уровне $0,94\rho_{s0}$. Более «плавный» характер «магнитного обжатия», несмотря на его возросшую интенсивность, снижает «выплеск» сжимающих напряжений в ПЭ в момент полного закрытия микропор и обеспечивает его сохранность. При этом в результате воздействия полностью уплотняется ($\rho/\rho_{s0} = 1$) центральная часть элемента с радиальным размером, составляющим около 80% радиуса ПЭ.

Зависимость достигаемой средней плотности стальных ПЭ ($\rho_0 = 0,7\rho_{s0}$, $v_0 = 5$ км/с) от диаметра токового витка при неизменном значении индукции поля в его центре $B_{e\max} = 50$ Тл представлена на рис. 7. Видно, что при заданной интенсивности воздействия существует его оптимальная продолжительность (определяемая размером витка), при которой обеспечивается достижение наибольшей плотности.

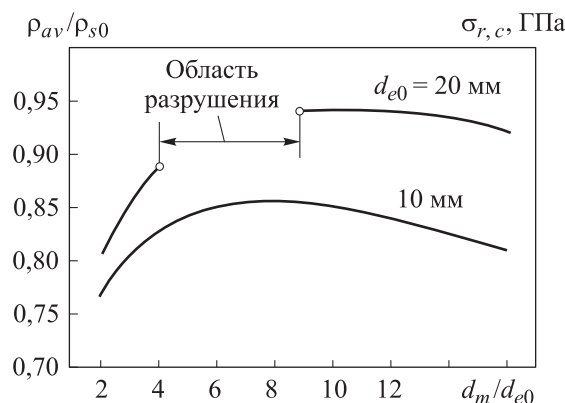


Рис. 7. Влияние диаметра токового витка на степень уплотнения стальных пористых элементов различного размера при $B_{e\max} = 50$ Тл

Сначала с возрастанием диаметра витка увеличивается и степень уплотнения. Это связано с тем, что закрытие микропор в прочном пористом материале происходит под действием приложенного давления не мгновенно. Нужно, чтобы сжимающие напряжения необходимого уровня действовали в течение некоторого промежутка времени, который растет с увеличением продолжительности воздействия. Однако при этом одновременно ослабляется «сжимающее действие» магнитного поля за счет увеличения глубины его проникновения в материал ПЭ. Поэтому, начиная с некоторого значения, дальнейший рост размеров токового витка приводит к снижению степени уплотнения.

При магнитно-импульсном уплотнении ПЭ проявляется масштабный эффект (см. рис. 7). С увеличением диаметра ПЭ эффективность электромагнитного воздействия на него возрастает из-за замедления диффузии магнитного поля: время диффузии поля для цилиндрического проводника растет пропорционально квадрату его поперечного размера [35]. Следует также отметить, что повышение эффективности силового действия магнитного поля на ПЭ большего диаметра делает возможным его разрушение при меньших интенсивностях воздействия. Для ПЭ диаметром $d_{e0} = 10$ мм при $B_{e\max} = 50$ Тл разрушения не наблюдается при любой продолжительности воздействия. В случае $d_{e0} = 20$ мм при данном значении $B_{e\max}$ в диапазоне диаметров токового витка $4 < d_m/d_{e0} < 9$ реализуются режимы с разрушением элемента (см. рис. 7).

Эффективность магнитно-импульсного уплотнения алюминиевых ПЭ существенно выше, чем стальных (вследствие более высокой электропроводности и меньшей прочности алюминия). Графики изменения магнитного поля и относительной средней плотности материала при электромагнитном воздействии с параметрами $d_m = 50$ мм, $B_{e\max} = 25$ Тл на алюминиевый ПЭ ($\rho_0 = 0,7\rho_{s0}$, $\rho_{s0} = 2,7$ г/см³, $T_0 = 300$ °С, $\sigma_{ys,n} = 150$ МПа), имеющий те же начальный диаметр и скорость, что и рассматривавшийся базовый стальной ПЭ ($d_{e0} = 10$ мм, $v_0 = 5$ км/с), приведены на рис. 8.

Из сравнения графиков на рис. 8 и 4 следует, что проникновение магнитного поля в алюминиевый ПЭ при одной и той же продолжительности воздействия (диаметре токового витка) происходит в существенно меньшей степени, чем в стальной. Благоприятные для реализации магнитно-импульсного уплотнения свойства алюминиевого ПЭ позволяют повысить его среднюю плотность до уровня $0,94\rho_{s0}$ при максимальной интенсивности воздействующего поля 25 Тл. При этом максимальное повышение температуры материала вследствие Джоулева нагрева (на поверхности элемента) лежит в пределах 200 °С.

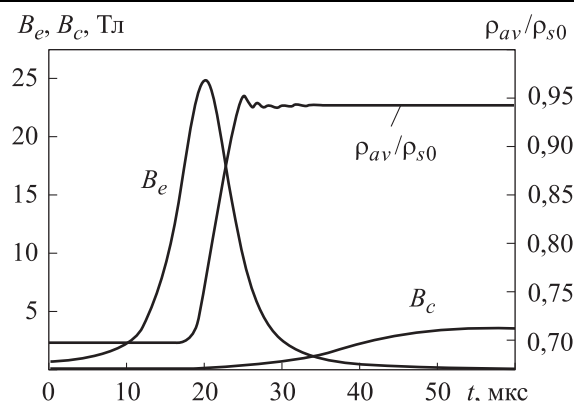


Рис. 8. Изменение магнитного поля и относительной средней плотности материала при магнитно-импульсном уплотнении алюминиевого пористого элемента

Заключение. Проведенные расчеты показали принципиальную возможность реализации магнитно-импульсного уплотнения сформированных взрывом металлических элементов (в том числе и обладающих относительно невысокой электропроводностью стальных) на стадии их движения перед взаимодействием с мишенью. Очевидно, в реальных условиях магнитная система, воздействующая на элемент, должна представлять собой не токовый виток (рассматривавшийся в расчетах лишь с целью выявления принципиальных физических закономерностей процесса), а удлиненный соленоид минимально возможного диаметра, необходимого для свободного пролета элемента. Выбор длины соленоида при этом определяется оптимальной продолжительностью воздействия. По сравнению с токовым витком достаточно большого диаметра (определяемого также необходимой длительностью воздействия, см. рис. 7) использование удлиненного соленоида позволяет уменьшить объем пространства с создаваемым магнитным полем и, соответственно, энергозатраты на его создание.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Новиков Л.С. *Воздействие твердых частиц естественного и искусственного происхождения на космические аппараты*. Москва, Университетская книга, 2009, 104 с.
- [2] Зеленцов В.В. Проблемы мелкого космического мусора. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2015, № 4, с. 89–104. DOI: 10.7463/0415.0764904
- [3] Hu Di-qi, Chi Run-qiang, Liu Yu-yan, Pang Bao-jun. Sensitivity analysis of spacecraft in micrometeoroids and orbital debris environment based on panel method. *Defence Technology*, 2023, vol. 19, pp. 126–142.
- [4] Леун Е.В., Нестерин И.М., Пичхадзе К.М., Поляков А.А., Сысоев В.К. Обзор схем пенетраторов для контактных исследований космических объектов. *Космическая техника и технологии*, 2022, № 2 (37), с. 103–117.

- [5] Федоров С.В., Федорова Н.А., Велданов В.А. Использование импульса реактивной тяги для увеличения глубины проникания исследовательских модулей в малопрочные грунтовые преграды. *Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук*, 2014, № 4 (84), с. 53–63.
- [6] Lorenz R.D. Planetary penetrators: their origins, history and future. *Advances in Space Research*, 2011, vol. 48, no. 3, pp. 403–431.
- [7] Федоров С.В., Федорова Н.А. Влияние прочностных свойств грунтово-скальной преграды на глубину проникания ударников при дополнительном действии импульса реактивной тяги. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2016, № 4, с. 40–56.
- [8] Hyde J.L., Christiansen E.L., Kerr J.H. Meteoroid and orbital debris risk mitigation in a low Earth orbit satellite constellation. *International Journal of Impact Engineering*, 2001, vol. 26, pp. 345–356.
- [9] Вениаминов С.С., Червонов А.М. *Космический мусор — угроза человечеству*. Москва, ИКИ РАН, 2012, 192 с.
- [10] Christiansen E. Design and performance equations for advanced meteoroid and debris shield. *International Journal of Impact Engineering*, 1993, vol. 14, pp. 145–156.
- [11] Зеленцов В.В. Защита космического аппарата от воздействия фрагментов мелкого космического мусора. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2015, № 6, с. 123–142. DOI: 10.7463/0615.0778339.
- [12] Хабибуллин М.В., Кривошеина М.Н., Саммель А.Ю. Математическое моделирование ударного воздействия фрагментов космического мусора на иллюминаторы космических аппаратов. *Инженерно-физический журнал*, 2019, т. 92, № 6, с. 2548–2556.
- [13] Назаренко А.И. *Моделирование космического мусора*. Москва, ИКИ РАН, 2013, 216 с.
- [14] Воробьев А.А., Зыкова Т.С., Спицын Д.Д., Удинцев Р.Д., Яневский В.Д., Казанцев С.Г. Моделирование воздействия микрометеоритов и фрагментов космического мусора на космические аппараты. *Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ*, 2011, т. 120, с. 27–30.
- [15] Балеевский А.Г., Киселев Ю.Г., Могилев В.А., Мельцас В.Ю., Фатеев Ю.А., Шуров Ю.В., Шемарулин В.Е. Высокоскоростное метание компактных элементов. *Сб. докладов научн. конф. Волжского регионального центра РАРАН «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения»*. Саров, ВНИИЭФ, 2000, с. 244–248.
- [16] Кейбл А. Ускорители для метания со сверхвысокими скоростями. *Высокоскоростные ударные явления*. Москва, Мир, 1973, с. 13–28.
- [17] Мержиевский Л.А., Титов В.М., Фадеенко Ю.И., Швецов Г.А. Высокоскоростное метание твердых тел. *Физика горения и взрыва*, 1987, т. 23, № 5, с. 77–91.
- [18] Орленко Л.П., ред. *Физика взрыва*. В 2-х т. Москва, Физматлит, 2004, т. 2, 656 с.
- [19] Герасимов С.И., Маляров Д.В., Сироткина А.Г., Капинос С.А., Калмыков А.П., Князев А.С. Взрывные метательные устройства кумулятивного типа для формирования высокоскоростных компактных элементов. *Физика горения и взрыва*, 2020, т. 56, № 4, с. 128–136.
- [20] Федоров С.В. О реализации принципа имплозии в кумулятивных зарядах с полусферическими облицовками дегрессивной толщины. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2017, № 3, с. 71–92.
- [21] Rumyantsev V.V., Mikhaylin A.I. Jet-charge as an effective tool in the development of spacecraft shields testing against micrometeoroids and man-made debris. *Acta Astronautica*, 2015, vol. 109, pp. 166–171.

- [22] Андреев С.Г., Бойко М.М., Клименко В.Ю. Метательное действие зарядов взрывчатых веществ при распространении иницирующих и детонационных волн. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 4. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-04-1483>
- [23] Круглов П.В., Колпаков В.И. Анализ влияния разнотолщинности профиля металлических сегментных облицовок на форму высокоскоростных удлиненных элементов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 7. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-7-1782>
- [24] Федоров С.В., Ладов С.В., Никольская Я.М., Басаков В.Д., Бабурин М.А., Курепин А.Е., Горбунков А.А., Пирозерский А.С. Формирование потока высокоскоростных частиц кумулятивными зарядами с облицовкой типа полусфера-цилиндр дегрессивной толщины. *Физика горения и взрыва*, 2017, т. 53, № 4, с. 122–125.
- [25] Selivanov V.V., Ladov S.V., Nikolskaya Ya.M., Fedorov S.V. Research of the explosive formation of a compact element for meteoroids fragments and space debris modeling. *Acta Astronautica*, 2019, vol. 163, pp. 84–90.
- [26] Жданов И.В., Князев А.С., Маляров Д.В. Получение высокоскоростных компактных элементов требуемых масс при пропорциональном изменении размеров кумулятивных устройств. *Труды Томского государственного университета. Т. 276. Серия физико-математическая*. Томск, Изд-во Томского университета, 2010, с. 193–195.
- [27] Геринг Дж. Высокоскоростной удар с инженерной точки зрения. *Высокоскоростные ударные явления*. Москва, Мир, 1973, с. 468–516.
- [28] Афанасьева С.А., Белов Н.Н., Козорезов К.И., Хабибуллин М.В., Югов Н.Т. Особенности высокоскоростного проникания сильнопористого ударника в мишень конечной толщины. *Доклады Академии наук*, 1997, т. 355, № 2, с. 192–195.
- [29] Федоров С.В., Бабкин А.В., Ладов С.В. Проявление магнитокумулятивного эффекта при взрыве кумулятивного заряда с созданным в его облицовке аксиальным магнитным полем. *Журнал технической физики*, 2003, т. 73, № 8, с. 111–117.
- [30] Бабкин А.В., Кружков В.А., Луговой Э.В., Федоров С.В. Математическое моделирование растяжения кумулятивной струи при пропускании через нее электрического тока. *Оборонная техника*, 1993, № 9, с. 36–39.
- [31] Федоров С.В., Бабкин А.В., Ладов С.В. Особенности инерционного удлинения высокоградиентного проводящего стержня в продольном низкочастотном магнитном поле. *Инженерно-физический журнал*, 2001, т. 74, № 2, с. 79–86.
- [32] Бабкин А.В., Колычев М.Е., Ладов С.В., Федоров С.В. О возможном механизме разрушения кумулятивной струи импульсом тока. *Оборонная техника*, 1995, № 4, с. 47–54.
- [33] Федоров С.В. Усиление магнитного поля в металлических кумулятивных струях при их инерционном удлинении. *Физика горения и взрыва*, 2005, т. 41, № 1, с. 120–128.
- [34] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Электродинамика сплошных сред*. Москва, Наука, 1982, 624 с.
- [35] Кнопфель Г. *Сверхсильные импульсные магнитные поля*. Москва, Мир, 1972, 392 с.
- [36] Уилкинс М.Л. Расчет упругопластических течений. *Вычислительные методы в гидродинамике*, Москва, Мир, 1967, с. 212–263.
- [37] Johnson J.N. Dynamic fracture and spallation in ductile solids. *Journal of Applied Physics*, 1981, vol. 52, no. 4, pp. 2812–2825.

Статья поступила в редакцию 03.06.2024

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Федоров С.В., Болотина И.А., Горелов В.И., Струков Ю.А. Уплотнение формируемых кумулятивными зарядами высокоскоростных металлических элементов посредством магнитно-импульсного воздействия. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2024, вып. 8. EDN MHPRNG

Федоров 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

Болотина Ирина Алексеевна — старший преподаватель кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана; автор около 30 научных работ в области технологии ракетно-космического машиностроения.
e-mail: bolotina_i@bmstu.ru

Горелов Владимир Иванович — доцент кафедры № 1 РТВ ВУЦ МГТУ им. Н.Э. Баумана; автор около 30 научных работ в области военных и педагогических наук.
e-mail: gorelovvi@bmstu.ru

Струков Юрий Алексеевич — доцент кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана; автор около 30 научных работ в области физики плазмы.
e-mail: ustrukov@bmstu.ru

Compaction of high-velocity metal elements produced by shaped charges through the magnetic pulse action

© S.V. Fedorov, I.A. Bolotina, V.I. Gorelov, Yu.A. Strukov

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

High-speed metal elements produced by an explosion could be used to test the rocket and space systems for resistance to the meteoroids and space debris fragments impact. Microdamage accumulation resulting from intense plastic deformation leads to a decrease in average density of the high-speed elements formed during explosive compression of the profiled metal liners. The paper proposes to introduce action on the elements of the magnetic field produced along the motion trajectory before interaction with the target to compact such elements in testing the anti-meteor protection with their help. Based on numerical simulation within the framework of one-dimensional axisymmetric problem of continuum mechanics and electrodynamics, the paper studies physical processes occurring in the porous conducting elasto-plastic cylinder placed in the magnetic field. Using this model, magnetic pulse parameters required in steel and aluminum elements compaction were determined.

Keywords: space debris, anti-meteor protection, shaped charge, high-speed element, porous material, compaction, magnetic field, magnetic pulse effect, numerical simulation

REFERENCES

- [1] Novikov L.S. *Vozdeystvie tverdykh chastits estestvennogo i iskusstvennogo proiskhozhdeniya na kosmicheskie apparaty* [Impact of solid particles of natural and artificial origin on spacecraft]. Moscow, Universitetskaya Kniga Publ., 2009, 104 p.
- [2] Zelentsov V.V. Problemy melkogo kosmicheskogo musora [Problems of small debris]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana — Science and Education. Bauman MSTU Edition*, 2015, no. 4, pp. 89–104. <https://doi.org/10.7463/0415.0764904>
- [3] Hu Di-qi, Chi Run-qiang, Liu Yu-yan, Pang Bao-jun. Sensitivity analysis of spacecraft in micrometeoroids and orbital debris environment based on panel method. *Defence Technology*, 2023, vol. 19, pp. 126–142.
- [4] Leun E.V., Nesterin I.M., Pichkhadze K.M., Polyakov A.A., Sysoev V.K. Obzor skhem penetratorov dlya kontaknykh issledovaniy kosmicheskikh obyektov [A review of penetrator designs for contact studies of space objects]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii — Space Engineering and Technology*, 2022, no. 2, pp. 103–117.
- [5] Fedorov S.V., Fedorova N.A., Veldanov V.A. Ispolzovanie impulsa reaktivnoy tyagi dlya uvelicheniya glubiny proniknoveniya issledovatel'skikh moduley v maloprochnye gruntovye pregrady [Jet thrust impulse using for increase in research modules penetration depth into low-strength soil targets]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii raketnykh i artilleriyskikh nauk — Bulletin of the Russian Academy of Missile and Artillery Sciences*, 2014, no. 4 (84), pp. 53–63.
- [6] Lorenz R.D. Planetary penetrators: their origins, history and future. *Advances in Space Research*, 2011, vol. 48, no. 3, pp. 403–431.
- [7] Fedorov S.V., Fedorova N.A. Vliyanie prochnostnykh svoystv gruntovo-skalnoy pregrady na glubinu proniknoveniya udarnikov pri dopolnitel'nom deystvii impulsa reaktivnoy tyagi [Influence of the soil and rocky target strength properties

- on projectiles penetration depth with additional action of the jet thrust impulse]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2016, no. 4, pp. 40–56.
- [8] Hyde J.L., Christiansen E.L., Kerr J.H. Meteoroid and orbital debris risk mitigation in a low Earth orbit satellite constellation. *International Journal of Impact Engineering*, 2001, vol. 26, pp. 345–356.
- [9] Veniaminov S.S., Chervonov A.M. *Kosmicheskii musor — ugroza chelovechestvu* [Space debris is a threat to humanity]. Moscow, IKI RAN Publ., 2012, 192 p.
- [10] Christiansen E. Design and performances equations for advanced meteoroid and debris shield. *International Journal of Impact Engineering*, 1993, vol. 14, pp. 145–156.
- [11] Zelentsov V.V. Zashchita kosmicheskogo apparata ot vozdeystviya fragmentov melkogo kosmicheskogo musora [Protecting spacecraft fragments from exposure to small debris]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana — Science and Education. Bauman MSTU Edition*, 2015, no. 6, pp. 123–142.
<https://doi.org/10.7463/0615.0778339>
- [12] Khabibullin M.V., Krivosheina M.N., Sammel A.Yu. Matematicheskoe modelirovanie udarnogo vozdeystviya fragmentov kosmicheskogo musora na illyuminatory kosmicheskikh apparatov [Mathematical simulation of the shock action of the space debris fragments on the spacecraft windows]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2019, vol. 92, no. 6, pp. 1501–1508.
- [13] Nazarenko A.I. *Modelirovanie kosmicheskogo musora* [Space debris simulation]. Moscow, IKI RAN Publ., 2013, 216 p.
- [14] Vorobyev A.A., Zykova T.S., Spitsyn D.D., Udintsev R.D., Yanevsky V.D., Kazantsev S.G. Modelirovanie vozdeystviya mikrometeoritov i fragmentov kosmicheskogo musora na kosmicheskie apparaty [Modeling the impact of micrometeorites and fragments of space debris on spacecraft]. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy NPP BNIEM — Electromechanical matters. VNIEM studies*, 2011, vol. 120, pp. 27–30.
- [15] Baleevsky A.G., Kiselev Yu.G., Mogilev V.A., Meltsas V.Yu., Fateev Yu.A., Shurov Yu.V., Shemarulin V.E. Vysokoskorostnoe metanie kompaktnykh elementov [High-velocity launching of compact elements]. *Sbornik dokladov nauch. konf. Volzhskogo regionalnogo tsentra RARAN “Sovremennye metody proektirovaniya i otrabotki raketno-artilleriyskogo vooruzheniya* [Proceedings of the scientific conference of the RAMAS Volga Regional Center “Advanced methods of design and development of the missile and artillery weapons]. Sarov, VNIIEF Publ., 2000, pp. 244–248.
- [16] Cable A.J. *High-velocity impact phenomena*. New York and London, Academic Press, 1970 [In Russ.: Keybl A. Uskoriteli dlya metaniya so sverkhvysokimi skorostyami. Vysokoskorostnye udarnye yavleniya. Moscow, Mir Publ., 1973, pp. 13–28.].
- [17] Merzhievskiy L.A., Titov V.M., Fadeenko Yu.I., Shvetsov G.A. Vysokoskorostnoe metanie tverdykh tel [High-speed launching of solid bodies]. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1987, vol. 23, no. 5, pp. 576–589.
- [18] Orlenko L.P., ed. *Fizika vzryva*. [Physics of Explosion]. In 2 vol. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004, vol. 2, 656 p.
- [19] Gerasimov S.I., Malyarov D.V., Sirotkina A.G., Kapinos S.A., Kalmykov A.P., Knyazev A.S. Vzryvnye metatelnnye ustroystva kumulyativnogo tipa dlya formirovaniya vysokoskorostnykh kompaktnykh elementov [Explosive cumulative projectors for forming high-velocity compact elements]. *Fizika goreniya i*

- vzryva — *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2020, vol. 56, no. 4, pp. 486–493.
- [20] Fedorov S.V. O realizatsii printsipa implozii v kumulyativnykh zaryadakh s polusfericheskimi oblitsovkami degressivnoy tolshchiny [On implementation of implosion principle in shaped charges with hemispherical liners of degressive thickness]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Estestvennye nauki — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences*, 2017, no. 3, pp. 71–92.
- [21] Rumyantsev B.V., Mikhaylin A.I. Jet-charge as an effective tool in the development of spacecraft shields testing against micrometeoroids and man-made debris. *Acta Astronautica*, 2015, vol. 109, pp. 166–171.
- [22] Andreev S.G., Boyko M.M., Klimenko V.Yu. Metatelnoe deystvie zaryadov vzryvchatykh veshchestv pri rasprostranении initsiruyushchikh i detonatsionnykh voln [Explosive charge projectile action during initiating and detonating wave propagation]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2016, iss. 4.
<https://doi.org/10.18698/2308-6033-2016-04-1483>
- [23] Kruglov P.V., Kolkpakov V.I. Analiz vliyaniya raznotolshchinnosti profilya metallicheskih segmentnykh oblitsovok na formu vysokoskorostnykh udlinennykh elementov [Analysis of influence of metal linings profile heterogeneity on the high-speed elongated elements shape]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2018, iss. 7.
<https://doi.org/10.18698/2308-6033-2018-7-1782>
- [24] Fedorov S.V., Ladov S.V., Nikolskaya Ya.M., Baskakov V.D., Baburin M.A., Kurepin A.E., Gorbunkov A.A., Pirozerskii A.S. Formirovanie potoka vysokoskorostnykh chastits kumulyativnymi zaryadami s oblitsovkoy tipa sferopolusfera degressivnoy tolshchiny [Formation of a high-velocity particle flow from shaped charges with the hemisphere-cylinder liners of digressive thickness]. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2017, vol. 53, no. 4, pp. 122–15.
- [25] Selivanov V.V., Ladov S.V., Nikolskaya Ya.M., Fedorov S.V. Research of the explosive formation of a compact element for meteoroids fragments and space debris modeling. *Acta Astronautica*, 2019, vol. 163, pp. 84–90.
- [26] Zhdanov I.V., Knyazev A.S., Malyarov D.V. Poluchenie vysokoskorostnykh kompaktnykh elementov trebuyemykh mass pri proporsionalnom izmenenii razmerov kumulyativnykh ustroystv [Obtaining high-velocity compact elements of required mass with proportional change in the size of shaped-charge devices]. *Trudy Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. T. 276. Seriya fiziko-matematicheskaya* [Proceedings of the Tomsk State University. Vol. 276. Physics and Mathematics Series], 2010, vol. 276, pp. 193–195.
- [27] Gehring J.W. *High-velocity impact phenomena*. New York and London, Academic Press, 1970 [In Russ.: Gering J. Vysokoskorostnoy udar s inzhenernoy tochki zreniya. Vysokoskorostnye udarnye yavleniya. Moscow, Mir Publ., pp. 463–514].
- [28] Afanasyeva S.A., Belov N.N., Kozorezov K.I., Khabibullin M.V., Yugov N.T. Osobennosti vysokoskorostnogo proniknoveniya silnoporistogo udarnika v mishen konechnoy tolshchiny [The features of high-velocity penetration of a highly porous impactor into a target of finite thickness]. *Doklady Akademii nauk — Proceeding of the Academy of Sciences*, 1997, vol. 355, no. 2, pp. 192–195.
- [29] Fedorov S.V., Babkin A.V., Ladov S.V. Proyavlenie magnitokumulyativnogo effekta pri vzryve kumulyativnogo zaryada s sozdannym v ego oblitsovke magnitnym polem [Magnetic cumulative effect upon the explosion of a shaped

- charge with an axial magnetic field in its sheath]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki — Technical Physics*, 2003, vol. 73, no. 8, pp. 111–117.
- [30] Babkin A.V., Kruzhkov V.A., Lugovoy E.V., Fedorov S.V. Matematicheskoe modelirovanie rastyazheniya kumulyativnoy strui pri propuskanii cherez nee elektricheskogo toka [Mathematical simulation of stretching of the shaped-charge jet when electric current is passing through it]. *Oboronnaya tekhnika — Defence Technology*, 1993, no. 9, pp. 36–39.
- [31] Fedorov S.V., Babkin A.V., Ladov S.V. Osobennosti inertsionnogo udlineniya vysokogradientnogo provodyashchego sterzhnya v prodolnom nizkochastotnom magnitnom pole [Salient features of inertial stretching of a high-gradient conducting rod in a longitudinal low-frequency magnetic field]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2001, vol. 74, no. 2, pp. 79–86.
- [32] Babkin A.V., Kolychev M.E., Ladov S.V., Fedorov S.V. O vozmozhnom mekhanizme razrusheniya kumulyativnoy strui impulsom toka [On probable mechanism of shaped-charge jet disruption by a current pulse]. *Oboronnaya tekhnika — Defence Technology*, 1995, no. 4, pp. 47–54.
- [33] Fedorov S.V. Usilenie magnitnogo polya v metallicheskih kumulyativnykh struyakh pri ikh inertsionnom udlinenii [Magnetic-field amplification in metal shaped-charge jets during their inertial elongation]. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2005, vol. 41, no. 1, pp. 120–128.
- [34] Landau L.D., Lifshits E.M. *Elektrodinamika sploshnykh sred* [Electrodynamics of Continuous Media]. Moscow, Nauka Publ., 1982, 624 p.
- [35] Knopfel G. *Pulsed High Magnetic Fields*. Amsterdam, North-Holland Publ. Company, 1970 [In Russ.: Knopfel G. Sverkhshilnye impulsnye magnitnye polya. Moscow, Mir Publ., 373 p.].
- [36] Wilkins M.L. *Calculation of elastic-plastic flow. Methods in Computational Physics*, Ed. B. Alder et al., Vol. 3. New York, Academic Press, 1964 [In Russ.: Uilkins M.L. Raschet uprugoplasticheskikh techeniy. Vychislitelnye metody v gidrodinamike. Moscow, Mir Publ., 1967, pp. 211–263.].
- [37] Johnson J.N. Dynamic fracture and spallation in ductile solids. *Journal of Applied Physics*, 1981, vol. 52, no. 4, pp. 2812–2825.

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

Bolotina I.A., Senior Lecturer, Department of Rocket and Space Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University; author of about 30 scientific papers in rocket and space engineering technology. e-mail: bolotina_i@bmstu.ru

Gorelov V.I., Associate Professor, Department No. 1 RTF MEC, Bauman Moscow State Technical University; author of about 30 scientific papers in military and pedagogical sciences. e-mail: gorelovvi@bmstu.ru

Strukov Yu.A., Associate Professor, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University; author of about 30 scientific papers in plasma physics. e-mail: ustrukov@bmstu.ru