

УДК 519.6:539.3

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗРЫВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ДЕФОРМИРУЕМЫЕ ТОНКОСТЕННЫЕ ПРЕГРАДЫ<sup>\*)</sup>

**М.Х. Абузяров, В.Н. Барабанов, А.В. Кочетков**

*НИИ механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского*

Описывается постановка задачи о взрывном воздействии на тонкий слой металла, опирающийся на массивную преграду. Приведены результаты численного моделирования, демонстрирующие некоторые кинематические и динамические аспекты рассматриваемого процесса. Проведен анализ, позволяющий сделать некоторые выводы о механизме утонения металлического слоя и влиянии прочностных свойств элементов конструкции на общую картину движения.

*Ключевые слова:* взрывное нагружение, высокоскоростное деформирование, численное моделирование.

### **Введение**

Исследования процессов взаимодействия продуктов детонации взрывчатого вещества (ВВ) с деформируемыми тонкостенными преградами являются актуальными для широкого ряда технических приложений. Так, для задач физики высоких плотностей энергии требуется разработка мощных энергетических комплексов – импульсных источников электромагнитной энергии. Важным элементом этих комплексов являются быстродействующие коммутаторы – устройства, которые позволяют за счет быстрого нарастания своего электрического сопротивления осуществлять разрыв цепи генератора и обеспечивать существенное снижение времени нарастания тока в физической нагрузке [1]. Разновидностью такого устройства является взрывной размыкатель тока (ВРТ). Механизм, инициирующий рост сопротивления ВРТ, основан на деформации и последующем локальном утонении слоя проводника (фольги), происходящих при воздействии со стороны продуктов взрыва заряда ВВ. Реализация этого механизма варьируется в зависимости от типа размыкателя, она может базироваться на следующих процессах: воздействие на тонкостенный проводник диэлектрических кумулятивных струй [2]; неоднородное движение продуктов взрыва, обеспечиваемое профилированием заряда ВВ; метание фольги на ребристую преграду [3–5]. Во всех случаях проявляется широкий набор эффектов разнообразной физической природы, нелинейное взаимодействие кото-

---

<sup>\*)</sup> Выполнено в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, Программы государственной поддержки ведущих научных школ РФ (проект НШ-4807.2010.8), а также при поддержке РФФИ (проекты 09-08-00711, 11-08-97040-р\_поволжье\_a).

рых между собой обуславливает сложную внутреннюю динамику процесса коммутации. В силу принципиальных особенностей устройства ВРТ эффекты и явления механической природы, а именно: взаимодействие продуктов взрыва с тонкостенным проводником, деформация проводника и остальных элементов конструкции размыкателя – составляют важную часть этого процесса и во многом обуславливают характеристики работы ВРТ. Поэтому для исследования действия взрывных размыкателей необходим корректный учет возникающих механических эффектов. Цель настоящей работы – математическое моделирование взрывного воздействия на тонкостенный медный проводник, опирающийся на ребристую преграду, а также изучение основных особенностей этого процесса.

### Математическая постановка задачи и численная методика

Для постановки двумерной задачи взрывного нагружения тонкостенного деформируемого проводника используются уравнения упругопластической сжимаемой среды в эйлеровых координатах [6]:

$$\begin{aligned} \rho_{,t} + (\rho u)_{,r} + (\rho v)_{,z} &= -v \frac{\rho u}{r}, \\ (\rho u)_{,t} + (\rho u^2 + p - S_{rr})_{,r} + (\rho uv - S_{rz})_{,z} &= \frac{v}{r} (2S_{rr} + S_{zz} - \rho u^2), \\ (\rho v)_{,t} + (\rho vu - S_{zr})_{,r} + (\rho v^2 - S_{zz})_{,z} &= \frac{v}{r} (S_{zr} - \rho vu), \\ e_{,t} + ((e + p - S_{rr})u - S_{rz}v)_{,r} + ((e + p - S_{zz})v - S_{rz}u)_{,z} &= v \frac{(S_{rr} - e - p)u + S_{rz}v}{r}, \quad (1) \\ S_{rr,t} + u S_{rr,r} + v S_{rr,z} - S_{rz}(u_{,z} - v_{,r}) + \lambda S_{rr} - \frac{2}{3} \mu (2u_{,r} - v_{,z}) &= -v \frac{2}{3} \mu \frac{u}{r}, \\ S_{zz,t} + u S_{zz,r} + v S_{zz,z} - S_{rz}(v_{,r} - u_{,z}) + \lambda S_{zz} - \frac{2}{3} \mu (2v_{,z} - u_{,r}) &= -v \frac{2}{3} \mu \frac{u}{r}, \\ S_{rz,t} + u S_{rz,r} + v S_{rz,z} + (S_{rr} - S_{zz})(u_{,z} - v_{,r}) + \lambda S_{rz} - \mu (u_{,z} + v_{,r}) &= 0. \end{aligned}$$

Здесь  $p$  – давление;  $\rho$  – плотность;  $u$ ,  $v$  – компоненты скорости по осям  $r$  и  $z$ ;  $e$  – полная удельная энергия;  $S_{rr}$ ,  $S_{zz}$ ,  $S_{rz}$  – компоненты девиатора тензора напряжений;  $\mu$  – модуль сдвига;  $v = 0$  для плоской задачи,  $v = 1$  для осесимметричной;  $\lambda = 0$  при упругом деформировании. Индекс после запятой обозначает частное дифференцирование по соответствующей переменной.

Область определения задачи показана на рис. 1, где  $r_{\text{he}}^{\text{cu}}$  – координата по оси  $r$  границы ВВ–медь,  $r_{\text{cu}}^{\text{steel}}$  – координата по оси  $r$  границы медь–сталь,  $r_{\text{steel}}^{\text{pl}}$  – координата по оси  $r$  границы сталь–оргстекло,  $z_{\text{slot}}^{\text{rib}}$  – координата по оси  $z$  границы паза–ребро. Для описания движения упругопластических подобластей (медь, сталь) система уравнений (1) используется полностью. Связь между гидростатическим напряжением  $p$  и объемной деформацией  $\epsilon = 1 - \rho_0/\rho$  полагается линейной:  $p = K\epsilon$ , где  $K$  – модуль объемного сжатия; критерием перехода из упругого в пластическое напряженно-деформированное состояние является условие текучести Мизеса

$$J_2 = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij} \geq \frac{1}{3} \sigma_T^2,$$

где  $J_2$  – второй инвариант девиатора тензора напряжений,  $\sigma_T$  – предел текучести. При выполнении условия текучести происходит коррекция компонент девиатора напряжений («посадка» на поверхность текучести) умножением на параметр  $\lambda = \sigma_T / \sqrt{3J_2}$ .

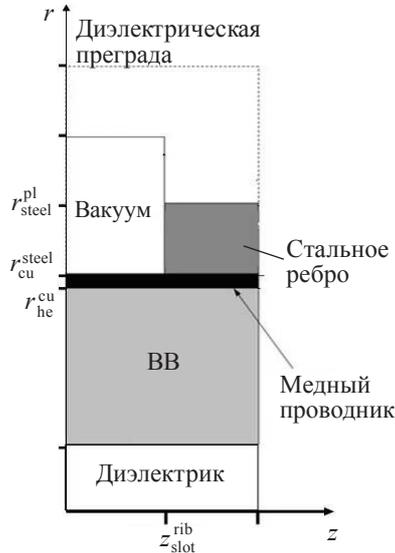


Рис. 1

Для описания движения диэлектрических подобластей, образуемых оргстеклом и продуктами взрыва (ПВ), используется редуцированная система уравнений, получающаяся из полной системы (1) в предположении, что сдвиговая составляющая напряженного состояния отсутствует:

$$S_{rr} = S_{zz} = S_{rz} = 0.$$

При этом для ПВ применяется уравнение состояния (УРС) идеального газа

$$e - \rho(u^2 + v^2) = \frac{p}{\chi - 1}$$

с переменным показателем адиабаты  $\chi = \chi(\rho)$ , а для диэлектрика (оргстекло) – УРС квазиакустического типа

$$p = \frac{K_0 \rho_0 A^2 \sigma(\sigma - 1)}{[B - (B - 1)\sigma]^2},$$

где  $\sigma = \rho/\rho_0$ , а  $K_0, \rho_0, A, B$  – константы.

Границы расчетной области (см. рис. 1) полагаются жесткими стенками. На участках контакта между подобластями ставится условие непроникания и отсутствия трения, которое предполагает отсутствие касательных напряжений и равенство нормальных компонент скоростей взаимодействующих тел. В процессе движения при появлении растягивающих нормальных напряжений возможен отрыв сред друг от друга и от жесткой границы, в этом случае условие непроникания заменяется условием на свободной границе – отсутствие внешних сил. Считается,

что паз заполнен вакуумом, поэтому на примыкающих к нему участках контуров ставится условие на свободной границе. В начальный момент времени все вещества покоятся, а ВВ инициируется одновременно во всех точках вдоль своей нижней границы. В приведенных ниже результатах расчетов рассматривалась только плоская задача:  $v = 0$ . Электромагнитные силы не учитывались.

Численная методика, которая применялась для моделирования поставленной задачи, подробно описана в [6]. Решение уравнений (1) осуществляется методом Годунова, модифицированным для решения задач динамики сжимаемых упруго-пластических сред с необратимыми объемными и сдвиговыми деформациями на подвижных эйлера-лагранжевых сетках [7]. Модификации [8] позволяют повысить точность схемы до второго порядка, сохраняя ее монотонность. Адаптация метода для решения уравнений (1), а также расчет задачи о распаде разрыва для границы газ – нелинейная упругая среда позволяют моделировать в рамках единого подхода и в связанной постановке задачи распространения детонации в ВВ и последующего ударно-волнового нагружения жидкостей, газов и деформируемых элементов конструкций.

Численная методика реализована в рамках пакета программ UPSGOD. Расчетная область задачи разделяется на однородные по физическим свойствам подобласти, контурные границы которых движутся как лагранжевы. Внутри подобластей на каждом временном шаге строятся эйлеровы сетки. Условия на поверхностях контакта сред с различными физико-механическими свойствами формулируются как комбинация условий непроникания (или прилипания) на тех участках поверхностей, которые находятся в данный момент в контакте, и условий на свободных границах на остальных участках. Контактные силы определяются совместным решением разностных уравнений движения элементов конструкций и соотношений динамической совместности на волнах в контактирующих средах. При расчете распространения детонации в ВВ используется лучевая модель [6], согласно которой каждая точка ВВ, до которой доходит детонационная волна, становится новым источником детонации, так что детонация от места инициации распространяется по лучам.

### Результаты моделирования

Приводятся результаты численного решения задачи о распространении детонационной волны по заряду и о взаимодействии ПВ с тонкостенным проводником и другими элементами конструкции ВРТ. Основное внимание уделяется последующей деформации проводника при его взаимодействии с деформируемыми элементами и движению в пазу преграды.

Рассмотрим вначале кинематическую сторону задачи. На рис. 2 изображены положения контактных границ (I – ВВ, II – медный проводник, III – стальное ребро, IV – оргстекло, V – паз) для моментов времени: а)  $t = 0,8$  мкс, б)  $t = 1,1$  мкс, в)  $t = 1,5$  мкс (время выхода детонационной волны на нижнюю поверхность фольги составляет 0,5 мкс). Взрывное воздействие приводит к вдавливанию фольги в паз преграды, боковому течению стальной вставки, растяжению и истончению среднего участка фольги. На рис. 3 приведены временные зависимости относительных координат по оси  $r$  трех точек 4, 5 и 6, лежащих в толще проводника (см. рис. 2, б), и безразмерной толщины фольги в ее наиболее тонком месте (рис. 3, в), позволяющие более точно исследовать кинематику процесса деформирования (0 на оси ординат соответствует начальному положению фольги, 1 – максимальному смеще-

нию по оси  $r$ ). Можно сделать два основных вывода. Во-первых, спустя небольшой промежуток времени (0,25–0,3 мкс) от момента, когда волна детонации приходит на нижнюю границу фольги, скорости движения по оси  $r$  различных участков проводника становятся практически постоянными, что свидетельствует об установлении инерционного характера движения проводника в пазу преграды. Во-вторых, скорость процесса утонения фольги наиболее высока вначале процесса деформирования, затем она постепенно спадает.

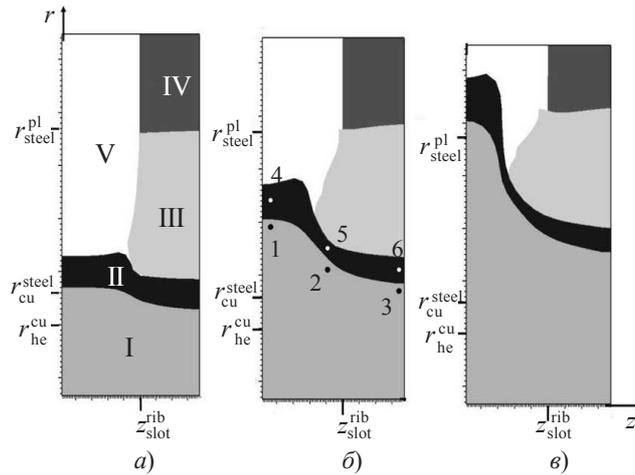


Рис. 2

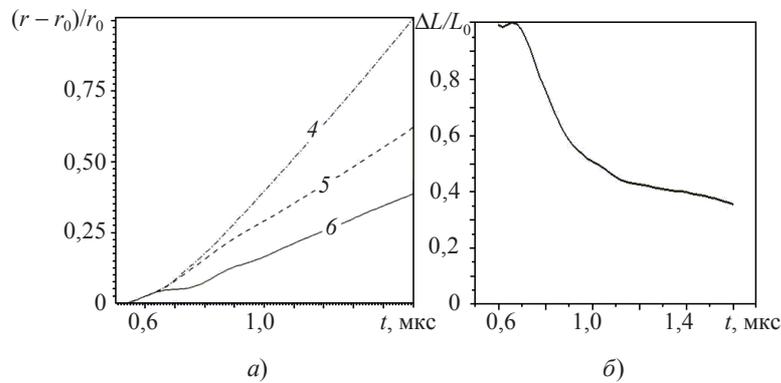


Рис. 3

Рассмотрим теперь динамическую сторону задачи. На рис. 4 представлены временные зависимости давления в точках 1, 2, 3, расположенных в центрах ячеек, примыкающих к границе ВВ–проводник со стороны ПВ, и в точках 4, 5, 6, расположенных в срединном слое проводника (см. рис. 2, б). Как видно из рис. 4, а, давление со стороны продуктов взрыва, распределенное вдоль границы с проводником практически равномерно, достигает своего максимума примерно через 0,1 мкс после момента прихода детонационной волны (который равен 0,5 мкс), а затем плавно и монотонно спадает. С убыванием давления со стороны ПВ можно связать установление инерционного характера движения проводника в пазу преграды, которое было отмечено выше. В точках 4 и 6 (см. рис. 4, б), лежащих в занимаемой медью под-области, давление ведет себя немонотонно, и в его зависимости от времени хорошо

прослеживаются волновые эффекты отражения от свободных и контактных границ. При этом характерный период волнового процесса в точке 6, находящейся под массивным стальным ребром, заметно больше, чем период волнового процесса, соответствующего точке 4, лежащей под свободной границей. Очевидно, это объясняется тем, что в волновое движение (продольное по направлению движения фронта детонационной волны), в котором участвует точка 6, вовлекаются как проводник II, так и стальная преграда III, в то время как в волновом движении, соответствующем точке 4, принимает участие только проводник II, что и обуславливает меньшие пространственный и временной масштабы процесса в последнем случае. Во временной зависимости давления в точке 5 также прослеживается волновой процесс, но он имеет более сложный характер, что, вероятно, связано с существенной неоднородностью движений в этом участке проводника. Согласно полученным зависимостям, разница давлений на участке проводника, опирающемся на стальную преграду, и на неопертом, изгибающемся участке периодически меняет свой знак, что должно обуславливать меняющийся по направлению характер перетекания вещества между этими участками. В то же время давление на изгибающемся участке всегда больше давления на опирающемся участке, движущемся в пазу, поэтому перетекание вещества между этими участками имеет постоянную направленность.

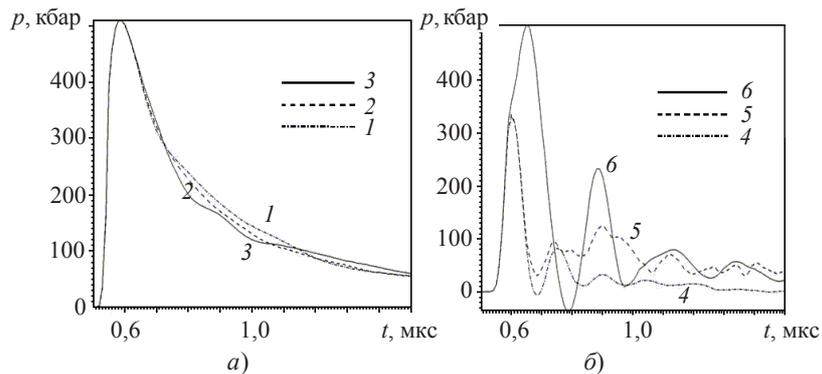


Рис. 4

Таким образом, механизм истончения фольги на ребре преграды можно описать следующим образом. Ударное воздействие со стороны продуктов взрыва ВВ на фольгу и ребристую преграду приводит, с одной стороны, к перемежающемуся перетеканию вещества фольги из-под ребристой преграды к месту перегиба, с другой стороны, – к нагружению стальной вставки и к последующей ее боковой разгрузке и течению в сторону паза. Совокупное течение фольги и вставки приводит к тому, что фольга в месте перегиба подвергается действию сильных сжимающих напряжений как со стороны продуктов взрыва, так и со стороны угла стальной вставки. Это приводит к истечению вещества фольги из места сильного сжатия в область меньших напряжений, что усиливается движением вверх участка фольги, не опирающегося на преграду.

В заключение приведем результаты оценки влияния прочностных свойств элементов конструкции на картину движения проводника в пазу преграды. Вклад сдвиговой составляющей напряженного состояния можно оценить по отношению интенсивности девиатора тензора напряжений к величине давления:  $k = J_2/|p|$ . Распределение коэффициента  $k$  для момента времени 1,3 мкс показано на рис. 5. Видно, что

коэффициент может быть существенным в стальной вставке; в медном проводнике он значительно меньше и в большей его части не превышает 0,05.

Влияние прочностных свойств элементов конструкции на картину движения было оценено также при сравнении результатов базового расчета, в котором медная и стальная подобласти полагались упругопластическими, и расчета, в котором для этих подобластей использовались уравнения состояния квазиакустического типа с шаровым тензором напряжений. На рис. 6 приведены положения контактных границ для этих двух расчетов в момент времени  $t = 1,25$  мкс. Как видно из рисунка, при учете прочностных свойств форма изгиба фольги и форма деформации стальной вставки несколько изменяются, свободный участок фольги пролетает в пазе меньшее расстояние, выдавливание материала при пренебрежении сдвиговым сопротивлением происходит более интенсивно.

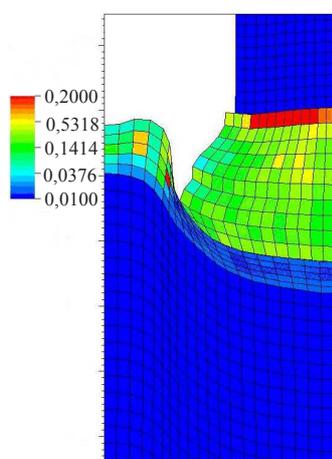


Рис. 5

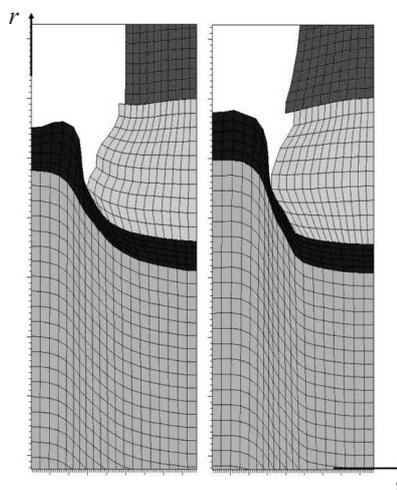


Рис. 6

На рис. 7 приведены временные зависимости давления со стороны ПВ в точке 2. Цифрой 1 отмечен расчет, в котором для меди и стали использовалась упругопластическая модель, цифрой 2 – расчет, в котором использовались уравнения состояния квазиакустического типа. Видно, что от выбора модели для медной и стальной подобластей сильно зависит также история взрывного нагружения, т.е. параметры воздействия на фольгу.

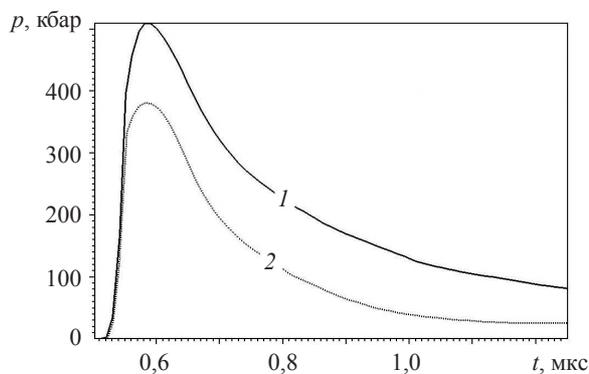


Рис. 7

### Заключение

В статье изложена постановка задачи о взрывном воздействии на фольгу, опирающуюся на массивную ребристую преграду. Приведены результаты численных расчетов, которые показывают, что движение фольги в пазу преграды через короткое время после прихода волны детонации принимает инерционный характер. Согласно проведенному анализу напряженного состояния, механизм утонения фольги на ребре преграды заключается в двустороннем обжатию срединного участка фольги продуктами взрыва и массивной стальной вставкой и в обусловленном этим обжатием истечении вещества в сторону меньших напряжений. Анализ также показал, что относительный вклад сдвиговой составляющей напряженного состояния может быть существенным в стальной вставке. Результаты расчетов демонстрируют, что при учете прочностных свойств элементов конструкции несколько изменяются характер деформации фольги и история взрывного нагружения.

### Литература

1. Study of basic regularities of formation of multi-MA current pulses with short risetime by EMG circuit interruption / V.K. Chernyshev [et al.] // *Megagauss Physics and Technology* / Ed. P.J. Turchi. – N.Y.–L.: Plenum Press, 1980. – P. 663–675.
2. Котов, Ю.А. Исследование взрывного размыкателя с кумулятивными диэлектрическими струями / Ю.А. Котов, А.П. Цыпленко // *Сверхсильные магнитные поля. Физика. Техника. Применение* / Ред. В.М. Титов, Г.А. Швецов. – М.: Наука, 1984. – С. 402–405.
3. Войтенко, А.Е. Взрывной многоззорный размыкатель / А.Е. Войтенко, В.И. Жеребенко // *ПТЭ*. – 1976. – №4. – С. 153–155.
4. Goforth, J.H. Explosively Formed Fuse Opening Switches for Use in Flux-Compression Generator Circuits / J.H. Goforth, S.P. Marsh // *Megagauss Fields and Pulsed Power Systems* / Ed. V.M. Titov, G.A. Shvetsov. – N.Y.: Nova Science Publishers, 1990. – P. 481–484.
5. Investigation of Speed Response Dependence of the Explosive Current Opening Switches on Initial Conditions / V.K. Chernyshev [et al.] // *Megagauss Fields and Pulsed Power Systems* / Ed. V.M. Titov, G.A. Shvetsov. – N.Y.: Nova Science Publishers, 1990. – P. 527–531.
6. Численное моделирование детонации и воздействия газокумулятивных зарядов на преграды / М.Х. Абузьяров [и др.] // *Вычислит. механика сплошных сред*. – 2008. – Т. 1, №2. – С. 5–15.
7. Метод распада разрыва в динамике упругопластических сред / М.Х. Абузьяров [и др.] // *Журнал вычислит. математики и математич. физики*. – 2000. – Т. 40, №6. – С. 940–953.
8. Abouziarov, M. An application of retroactive characteristic method to conservative scheme for structure problems (Elastic-Plastic flows) / M. Abouziarov, H. Aiso // *Hyperboic Problems: Theory, Numerics and Applications: Tenth intern. conf. in Osaka, 2004*. – P. 223–230.

[17.10.2011]

### MODELING OF EXPLOSIVE LOADINGS ON THE DEFORMABLE THIN-WALLED OBSTACLES

M.X. Abouziarov, V.N. Barabanov, A.V. Kochetkov

The statement of a problem of the explosive loading on a thin metal layer based on a massive obstacle is described. The results of the numerical modeling showing some kinematic and dynamic aspects of the process are presented. The analysis permits to make some conclusions about thinning down mechanism of the metal layer and the influence of strength properties of the structural elements on the complete picture of the motion.

*Keywords:* explosive loading, high-velocity deformation, numerical modeling.