

УДК 539.3

А.Н. Ищенко, Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, В.В. Буркин, С.А. Афанасьева,  
А.А. Югов, В.А. Бураков, С.В. Которов, А.Л. Стуканов

### АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ БРОНЕПЛИТ ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ МЕТОДОМ<sup>1</sup>

Расчетно-экспериментальным методом в диапазоне скоростей встречи 2000...2400 м/с исследованы процессы ударного взаимодействия стальных ударников в стакане из текстолита общей массой 118 г со стальными бронеплитами. Рассматриваются вопросы кратерообразования и откольные явления. Получено удовлетворительное согласование результатов математического моделирования с экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** соударение, экспериментальное, математическое моделирование, разрушение, кратер, откол, динамическая прочность.

Реакция твердых тел на ударное нагружение носит сложный сугубо индивидуальный характер. Поэтому с помощью только экспериментальных методов вряд ли можно исследовать свойства вещества в достаточно широкой области измерения параметров, характеризующих его состояние. В связи с развитием вычислительной техники резко возросла роль математического моделирования как средства изучения различных явлений и процессов в твердых телах при динамическом нагружении.

Целью проводимых в настоящее время исследований является уточнение научных представлений о поведении веществ в экстремальных условиях, получения более корректных моделей, описывающих деформирование и разрушение сред сложной структуры в области больших нелинейных упругопластических деформаций.

Метод исследования свойств материалов, когда физический элемент и математическое моделирование применяются совместно, дополняя друг друга, может быть назван расчетно-экспериментальным. Совместное проведение лабораторного эксперимента и математического моделирования, с одной стороны, позволяет глубже понять результаты проведенных испытаний и дать им верную интерпретацию, с другой – способствуют уточнению математической модели и выбору численных значений её параметров. В области, недоступной для экспериментальных исследований, поведение материала изучается путем компьютерного моделирования. Этот метод использовался, например, для подтверждения гипотезы Е.И. Забабахина об ограниченности кумуляции энергии во фронте сферической сходящейся ударной волны в среде с фазовыми превращениями [1], для исследований физических процессов, сопровождающих взрывное компактирование порошков из тугоплавких веществ [2]. Этим же методом исследованы особенности аномально глубокого высокоскоростного проникания сильно пористого ударника в различные среды и дано объяснение этого уникального явления [3].

<sup>1</sup> Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 08-01-00268а и АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» на 2009 – 2010 гг. № 21.1.1/4147.

В данной работе расчетно-экспериментальный метод применяется для анализа динамической прочности стальных бронеплит при ударном взаимодействии с составным цилиндрическим ударником в диапазоне скоростей встречи 2000...2400 м/с. Экспериментальная часть исследований выполнена на высокоскоростной металлической установке, использующей электротермохимическую технологию ускорения макротел [4, 5]. Вычислительный эксперимент проведен на базе математических моделей [6]. Для исследования поведения материалов в условиях высокоскоростного удара предложена модель пористой упругопластической среды, в рамках которой отрывное разрушение рассматривается как процесс роста и слияния микродефектов под действием изотропного растягивающего напряжения. Моментом завершения локального макроскопического разрушения конденсированного материала является достижение относительным объемом пор критической величины. Пороговым пределом для развития сдвигового разрушения является критическая величина интенсивности пластических деформаций. Модель реализована в пакете вычислительных программ «РАНЕТ-3» [7], предназначенном для решения задач удара и взрыва в полной трехмерной постановке модифицированным на решения динамических задач методом конечных элементов.

### 1. Математическая модель

Удельный объем пористой среды  $\nu$  представляется в виде суммы удельного объема матрицы  $\nu_m$  и удельного объема пор  $\nu_p$ . Пористость материала характеризуется относительным объемом пустот  $\xi = \nu/\nu_p$ , либо параметром  $\alpha = \nu/\nu_m$ , которые связаны зависимостью  $\alpha = 1/(1-\xi)$ . Система уравнений, описывающих движение пористой упругопластической среды, имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_V \rho dV = 0, \quad \frac{d}{dt} \int_V \rho \mathbf{u} dV = \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma} dS, \quad \frac{d}{dt} \int_V \rho E dV = \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{u} dS, \\ \mathbf{e} = \frac{\mathbf{s}^J}{2\mu} + \lambda \mathbf{s}, \quad \mathbf{s} : \mathbf{s} = \frac{2}{3} \sigma_T^2, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $t$  – время;  $V$  – объем интегрирования;  $S$  – его поверхность;  $\mathbf{n}$  – единичный вектор внешней нормали;  $\rho$  – плотность;  $\boldsymbol{\sigma} = -p\mathbf{g} + \mathbf{s}$  – тензор напряжений;  $\mathbf{s}$  – его девиатор;  $p$  – давление;  $\mathbf{g}$  – метрический тензор;  $\mathbf{u}$  – вектор скорости;  $E = \varepsilon + \mathbf{u} \cdot \mathbf{u}/2$  – полная удельная энергия;  $\varepsilon$  – удельная внутренняя энергия;  $\mathbf{e} = \mathbf{d} - (\mathbf{d} : \mathbf{g})\mathbf{g}/3$  – девиатор тензора скоростей деформаций;  $\mathbf{d} = (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)/2$  – тензор скоростей деформаций;  $\mathbf{s}^J = \dot{\mathbf{s}} + \mathbf{s} \cdot \boldsymbol{\omega} - \boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{s}$  – производная девиатора тензора напряжений в смысле Яуманна – Нолла;  $\boldsymbol{\omega} = (\nabla \mathbf{u}^T - \nabla \mathbf{u})/2$  – тензор вихря;  $\mu = \mu_{m0}(1-\xi) \left[ 1 - (6\rho_{m0}c_{m0}^2 + 12\mu_{m0})\xi / (9\rho_{m0}c_{m0}^2 + 8\mu_{m0}) \right]$ ,  $\sigma_T = \sigma_S/\alpha$  – эффективные модуль сдвига и предел текучести соответственно;  $\rho_{m0}$ ,  $c_{m0}$ ,  $\mu_{m0}$  – начальные плотность, объемная скорость звука и модуль сдвига материала матрицы соответственно. Параметр  $\lambda$  исключается с помощью условия пластичности Мизеса. Динамический предел текучести материала матрицы  $\sigma_S$  в общем случае является функцией скорости деформации, давления, температуры, а также некоторых других параметров.

Система уравнений (1) замыкается уравнением состояния и соотношениями, описывающими кинетику роста и затекания пор.

Если известна линейная зависимость скорости ударной волны  $D$  от массовой скорости  $u$  для матричного материала  $D = c_{m0} + S_{m0}u$ , то уравнение состояния пористого материала имеет вид

$$p = \frac{\rho_{m0}}{\alpha} \left[ \gamma_{m0}\varepsilon + \frac{c_{m0}^2 \left(1 - \frac{\gamma_{m0}\eta}{2}\right) \eta}{(1 - S_{m0}\eta)^2} \right],$$

где  $\gamma_{m0}$  – коэффициент Грюнайзена матричного материала;  $\eta = 1 - \rho_{m0} \frac{v}{\alpha}$ .

Рост пор в пластически деформированном материале при растяжении описывается уравнением

$$\frac{\rho_{m0} c_{m0}^2 \left(1 - \frac{\gamma_{m0}}{2} \eta\right)}{(1 - S_{m0}\eta)^2} + \rho_{m0} \gamma_{m0} \varepsilon + a_s \ln\left(\frac{\alpha}{\alpha - 1}\right) = 0.$$

Уравнение кинетики роста пор описывает эволюцию параметра  $\alpha$  в диапазоне  $1 < \alpha_{00} < \alpha \leq \alpha_{кр}$ . Оно используется при  $\alpha p + a_s \ln\left(\frac{\alpha}{\alpha - 1}\right) < 0$ . В противном случае  $\frac{d\alpha}{dt} = 0$ .

В уравнение входят три легко определяемых параметра  $a_s, \alpha_{00}, \alpha_{кр}$ .

Вообще говоря, величина  $a_s = \frac{2}{3} \sigma_s$ , однако при проведении расчетов она часто рассматривается как параметр, не зависящий от  $\sigma_s$ , и подбирается по лучшему согласованию расчетных и экспериментальных данных. Параметр  $\alpha_{00}$  – остаточная пористость в материале, которая не может быть устранена предварительным сжатием. Этот параметр служит для определения начального порогового давления, определяющего рост пор:  $p_{кр} = \frac{a_s}{\alpha_{00}} \ln\left(\frac{\alpha_{00}}{\alpha_{00} - 1}\right)$ .  $\alpha_{кр}$  – величина пористости, при которой происходит разрушение материала.

Локальным критерием отрывного разрушения служит предельная величина относительного объема пустот  $\xi^* = \frac{\alpha_{кр} - 1}{\alpha_{кр}}$ .

Все эти параметры могут быть уточнены или определены при сравнении данных расчета с результатами эксперимента по откольному разрушению пластин в случае одноосного деформированного состояния.

В качестве сдвигового критерия разрушения рассматривается величина предельной интенсивности пластической деформации

$$e_u^* = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{3T_2 - T_1^2},$$

где  $T_1, T_2$  – первый и второй инварианты тензора пластических деформаций.

## 2. Результаты математического моделирования и лабораторного эксперимента

Исследуются процессы ударного взаимодействия ударника массой 118 г со стальными бронеплитами различной толщины в диапазоне скоростей удара 2000...2400 м/с. Ударник представляет собой стакан из текстолита, внутри которого находится сердечник из стали-45. Высота стакана – 42,3 мм, диаметр – 34,14 мм, толщина стенки – 5,07 мм, толщина дна – 20 мм. Диаметр стального сердечника – 24 мм, его высота – 22,3 мм. Ударник ускорялся в баллистической установке калибром 74 мм и длиной участка разгона 5 м. Иницирование заряда и интенсификация его горения осуществляется с применением импульсных плазмотронов, обеспечивающих ввод в заряд электрической энергии в виде плазмы до 40 кДж в течение 1...1,5 мс.

Параметры математической модели материалов взаимодействующих тел представлены в таблице.

Параметры модели

Материал	$\rho_{m0},$ $\frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	$c_{m0},$ $\frac{\text{см}}{\text{мкс}}$	$S_{m0}$	$\gamma_{m0}$	$\mu_{m0},$ ГПа	$\sigma_S,$ ГПа	$a_S,$ ГПа	$\alpha_{00}$	$\xi^*$	$e_u^*$
Текстолит	1,593	0,168	1,30	1,83	5,0	0,10	0,08	1,0003	0,10	1,00
Сталь-45	7,85	0,457	1,50	2,26	82,0	1,00	0,43	1,0006	0,30	1,00
Бронева сталь	7,85	0,457	1,50	2,26	79,0	0,64	0,17	1,0006	0,041	1,00

Рассмотрим соударение ударника с «полубесконечной» преградой.

Ниже приведена конечная картина внедрения ударника в бронеплиту толщиной 120 мм при скорости соударения 2380 м/с, наблюдаемая в расчёте при 86 мкс (рис. 1) и эксперименте (рис. 2). В результате соударения произошло полное срабатывание ударника, и в бронеплите образовался кратер, близкий к полусфере диаметром 85 мм, обрамленный «венчиком» высотой 10 мм. Диаметр расчетного кратера составляет 82 мм (расхождение с экспериментом 3,5 %). Без учета

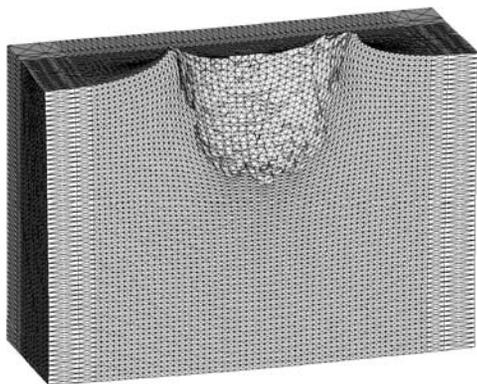


Рис. 1. Кратер в бронеплите после соударения со скоростью 2380 м/с

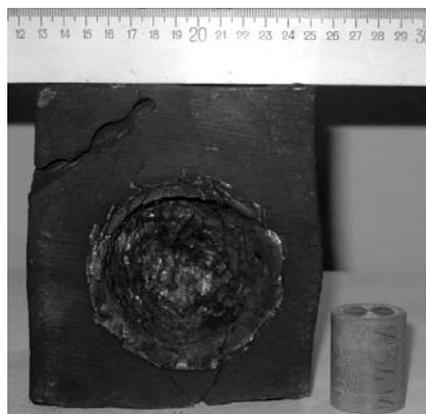


Рис. 2. Лицевая поверхность бронеплиты после соударения со скоростью 2380 м/с и начальный вид ударника

«венчика» диаметр кратера составляет 72 мм, в расчете – 68 мм (расхождение 5,5 %). Глубина кратера без учета «венчика» 40 мм, в расчете 41 мм (расхождение 2,4 %).

Рассмотрим соударение ударника с конечной преградой.

На рис. 3 приведена хронограмма процесса взаимодействия данного ударника с бронеплитой толщиной 50 мм при скорости удара 2000 м/с. На рис. 4 приведена фотография бронеплиты (вид сбоку) после соударения. Наблюдается «венчик» кратера с лицевой стороны бронеплиты и выпучивание диаметром 78 мм и высотой 18 мм с тыльной. В результате соударения произошло полное срабатывание ударника, и в бронеплите образовался кратер диаметром 63,5 мм и глубиной 52 мм (без учета «венчика»).

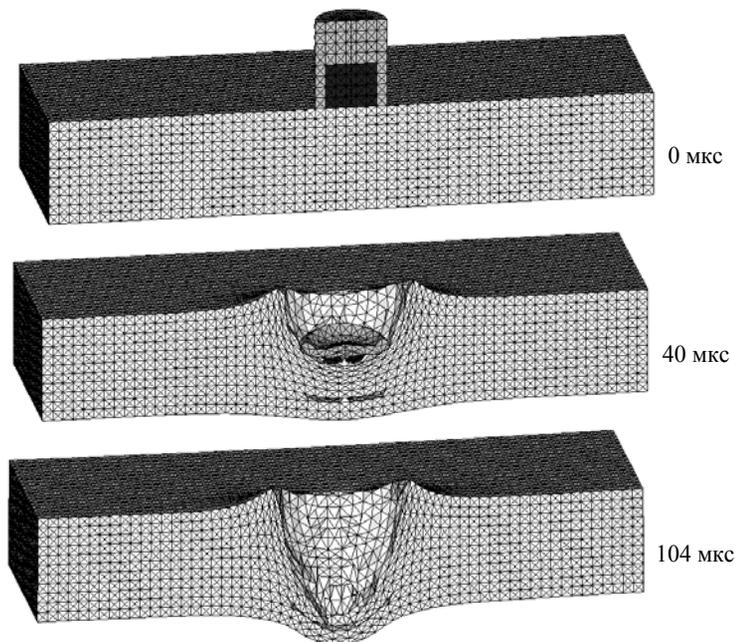


Рис. 3. Деформация и разрушение ударника и бронеплиты при скорости удара 2000 м/с в различные моменты времени

Расчет показал, что к моменту времени 20 мкс в результате взаимодействия встречных волн разгрузки, распространяющихся от лицевой и тыльной поверхностей мишени, на расстоянии 13,6 мм от тыльной поверхности образовалась макротрещина размером 23 мм. К 40 мкс происходит полное срабатывание ударника, и дальнейший рост кратера происходит при взаимодействии бронеплиты с дном текстолитового стакана. Размер трещины увеличивается до 32 мм. Процесс кратерообразования продолжается до 104 мкс. Расчетная глубина кратера составляет 58 мм (расхождение с экспериментом 10,3 %). Диаметр кратера 62 мм, (расхождение 2,4 %). С тыльной стороны наблюдается выпучивание диаметром 75 мм (расхождение 3,8 %) и высотой 17,5 мм (расхождение 2,8 %). Сформировалась откольная тарелка диаметром примерно 50 мм и высотой до 13,5 мм. Однако при данной скорости удара её отделение от мишени не произошло. Как и в расчете, так и в эксперименте мишень находится на стадии предоткола.



Рис. 4. Бронеплита после соударения со скоростью 2000 м/с (вид сбоку)

Ниже рассматриваются результаты соударения со скоростью 2325 м/с.

На рис. 5 приведена хронограмма процесса взаимодействия ударника с бронеплитой толщиной 50 мм. На рис. 6 приведена фотография лицевой поверхности бронеплиты и откольной тарелки после соударения. Увеличение скорости удара до 2325 м/с приводит к пробитию бронеплиты и откольному разрушению в ней.

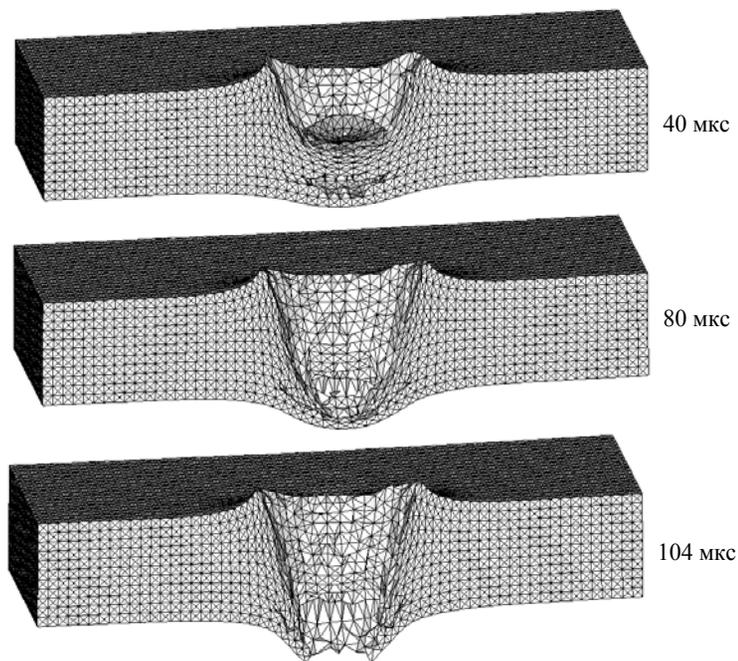


Рис. 5. Деформация и разрушение ударника и бронеплиты при скорости удара 2325 м/с в различные моменты времени

В результате соударения произошло полное срабатывание ударника, в бронеплите образовалось сквозное отверстие диаметром с лицевой стороны 75 мм (без учета «венчика») и с тыльной стороны диаметром 51 мм. Откольная тарелка диаметром 95,5 мм и высотой 15 мм отделилась от мишени. В ней имеется сквозное отверстие диаметром 42 мм.



Рис. 6. Вид бронеплиты и откольной тарелки после соударения со скоростью 2325 м/с

Расчет также показал полное срабатывание ударника, образование макротрещины и сквозного отверстия диаметром 73 мм с лицевой стороны бронеплиты (расхождение с экспериментом 2,7 %), с тыльной – 40 мм (расхождение 20 %). При математическом моделировании не учитывались рост и ветвление трещин на квазистатической стадии процесса деформирования мишени, поэтому в расчете отделения откольной тарелки не происходит. Однако можно судить о параметрах откола: высота откольной тарелки 14,5 мм (расхождение 3,3 %) и диаметр 73,6 мм (расхождение 23 %), диаметр внутреннего отверстия в ней 37 мм (расхождение 14,5 %).

Как видно из сопоставления, получено хорошее согласование данных математического моделирования с результатами экспериментов. Совместное проведение лабораторных испытаний и математического моделирования поведения бронеплит на стадии предоткола позволило уточнить параметры модели разрушения броневой стали (см. таблицу).

Разработанный расчетно-экспериментальный метод исследований практических вопросов бронeballистики позволит прогнозировать результат взаимодействия «тяжелых» ударников с бронеплитами различных размеров и составов в диапазоне скоростей до 3000 м/с и более.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Белов Н.Н., Коняев А.А., Хабибуллин М.В. и др. Влияние полиморфных фазовых превращений на процесс обжаривания стальных шаров // ФГВ. 1997. Т. 33. № 5. С. 128 – 136.
2. Белов Н.Н., Коняев А.А., Хабибуллин М.В. и др. Моделирование ударно-волнового пресования порошковой керамики на баллистическом стенде // ПМТФ. 1997. Т. 38. № 1. С. 43 – 50.

3. Афанасьева С.А., Белов Н.Н., Хабибуллин М.В. и др. Анализ высокоскоростного проникания сильно пористого ударника в мишень конечной толщины // Изв. РАН. МТТ. 1999. № 2. С. 91 – 100.
4. Baryshev M.S., Burakov V.A., Burkin V.V., et al. Using Plasma to Intensify the Ignition and Combustion of High-Energy Materials // Изв. вузов. Физика. 2006. № 11. Приложение. С. 487 – 490.
5. Барышев М.С., Бураков В.А., Буркин В.В., и др. Разработка импульсных плазмотронов и опыт их применения для насыпных зарядов в баллистических экспериментах // Химическая физика и мезоскопия. 2009. Т. 11. № 2. С. 147 – 152.
6. Белов Н.Н., Югов Н.Т., Копаница Д.Г., Югов А.А. Динамика высокоскоростного удара и сопутствующие физические явления. Томск: SST, 2005. 360 с.
7. Югов Н.Т., Белов Н.Н., Югов А.А. Расчет адиабатических нестационарных течений в трехмерной постановке (РАНЕТ-3) / Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2010611042. Москва. 2010.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

**ИЩЕНКО Александр Николаевич** – доктор физико-математических наук, профессор, заместитель директора Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета. E-mail: ichan@niipmm.tsu.ru

**БЕЛОВ Николай Николаевич** – доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета. E-mail: n.n.belov@mail.ru

**ЮГОВ Николай Тихонович** – доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета. E-mail: n.t.yugov@mail.ru

**БУРКИН Виктор Владимирович** – кандидат физико-математических наук, заведующий сектором Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета. E-mail: ichan@niipmm.tsu.ru

**АФАНАСЬЕВА Светлана Ахмед-Рызовна** – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета. E-mail: s.a.afanasyeva@mail.ru

**ЮГОВ Алексей Александрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций Томского государственного архитектурно-строительного университета. E-mail: Yugalex@sibmail.com

**БУРАКОВ Валерий Арсентьевич** – научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета. E-mail: ichan@niipmm.tsu.ru

**КОТОРОВ Сергей Владимирович** – старший офицер Управления перспективных межвидовых исследований и специальных проектов МО РФ. E-mail: ichan@niipmm.tsu.ru

**СТУКАНОВ Анатолий Леонидович** – кандидат технических наук, заведующий кафедрой инженерной графики Томского государственного архитектурно-строительного университета. E-mail: yugalex@sibmail.com

Статья принята в печать 16.04.2010 г.