

УДК 539.3

А.Н. Ищенко, Н.Н. Белов, Н.Т. Югов,  
С.А. Афанасьева, В.В. Буркин, А.А. Югов

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОНИКАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СОСТАВНЫХ УДАРНИКОВ ИЗ СТАЛИ И ТЕКСТОЛИТА В БРОНЕПЛИТЫ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ МЕТОДОМ<sup>1</sup>

Методом компьютерного моделирования исследованы процессы ударного взаимодействия двух типов составных ударников массой 300 г со стальными бронеплитами толщиной 50 мм. Скорость удара 1600 м/с. В первом варианте ударник представляет собой стальной стержень в поддоне из текстолита. Во втором – стальной стержень заменен набором из 10 стальных пластин разделенных прокладками из текстолита. Получено удовлетворительное согласование с результатами специально поставленного эксперимента.

**Ключевые слова:** *экспериментальное, математическое моделирование, высокоскоростное соударение, ударник, бронеплита, ударные волны, разрушение, кратер.*

Исследование явлений, возникающих при высокоскоростном ударе, взрыве и воздействии мощных потоков излучения на вещество, экспериментальными методами без глубокого теоретического анализа часто не дают необходимого результата, несмотря на большие материальные и технические затраты. В связи с развитием вычислительной техники резко возросла роль математического моделирования как средства изучения различных явлений и процессов в твердых телах при динамических нагрузках [1 – 14]. Метод исследования свойств материалов, когда физический эксперимент и математическое моделирование применяются совместно, дополняя друг друга, называется расчетно-экспериментальным [9, 10]. Создание надежных методов прочностных расчетов конструкций, работающих в условиях кратковременных импульсных воздействий, больших скоростей деформаций, интенсивного радиационного облучения и других сложных физико-химических условий является в настоящее время актуальной научно-технической задачей.

В [7 – 9, 15, 16] предложена математическая модель, позволяющая рассчитывать в рамках механики сплошной среды напряженно-деформированное состояние и разрушение в твердых телах в условиях взрывного и ударного нагружений. Динамическое разрушение в рамках данной модели рассматривается как процесс роста и слияния микродефектов под действием образующихся в процессе нагружения напряжений. Локальным критерием как сдвигового, так и отрывного разрушений в хрупких материалах является предельная величина характерного размера трещин. В пластических материалах локальным критерием отрывного разрушения служит предельная величина относительного объема пустот, а сдвигового – предельная величина пластических деформаций. Модель реализована в пакете вычислительных программ «РАНЕТ-3» [17], предназначенном для решения задач удара и взрыва в полной трехмерной постановке модифицированным на ре-

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке программы АВИЦП Минобрнауки РНПВШ № 2.1.1/12470 гранта РФФИ № 10-01-00573а.

шение динамических задач методом конечных элементов [8, 9, 18]. В частности, данный комплекс программ использовался в [8] для анализа процессов, протекающих в стальных мишенях конечной толщины при групповом ударе сферическими частицами, а также для исследования прочности моделей бетонных, железобетонных и стальных трубобетонных колонн на неоднократный торцевой удар падающего груза на копровой установке [9, 19]. Расчетно-экспериментальным методом в [20] проведено исследование проникающей способности группы компактных цилиндрических элементов при последовательном ударе как по полубесконечным стальным мишеням, так и по мишеням конечной толщины при различных углах встречи.

В данной работе проведен анализ проникающей способности в диапазоне скоростей удара до 2-х км/с в стальные бронеплиты составных ударников, представляющих собой помещенный в поддон из текстолита набор стальных пластин, разделенных текстолитовыми прокладками. Экспериментальная часть исследований выполнена на высокоскоростной метательной установке, использующей электротермохимическую технологию ускорения макротел [21, 22].

### 1. Математическая модель

Удельный объем пористой среды  $v$  представляется в виде суммы удельного объема матрицы  $v_m$  и удельного объема пор  $v_p$ . Пористость материала характеризуется относительным объемом пустот  $\xi = v/v_p$  либо параметром  $\alpha = v/v_m$ , которые связаны зависимостью  $\alpha = 1/(1 - \xi)$ .

Система уравнений, описывающих движение пористой упругопластической среды, имеет вид

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

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;  $\mu = \mu_{m0} (1 - \xi) [1 - (6\rho_{m0} c_{m0}^2 + 12\mu_{m0})\xi / (9\rho_{m0} c_{m0}^2 + 8\mu_{m0})]$ ,  $\sigma_T = \sigma_S / \alpha$  – 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

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

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

Рост пор в пластически деформированном материале при растяжении описывается уравнением

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

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 слу-

чае  $\frac{d\alpha}{dt} = 0$ . 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

$$e_u = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{3T_2 - T_1^2}, \quad (3)$$

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

## 2. Результаты математического моделирования и лабораторного эксперимента

Исследуется проникающая способность составных ударников в бронеплиту толщиной 50 мм при скорости удара 1600 м/с. Рассматриваются два типа составных ударников калибром 34 мм, состоящих из текстолитового стакана с различными сердечниками: 1-й тип ударника (рис. 1, а) содержит стальной цилиндрический сердечник массой 246,6 г, масса ударника в сборке 305,9 г; 2-й тип ударника (рис. 1, б) содержит набор из 10 стальных цилиндрических стержней из стали, разделенных текстолитовыми прокладками, суммарная масса стальных элементов 200 г, масса ударника в сборке 312 г. Проведены баллистические испытания ударников 1-го и 2-го типов. Ударники ускорялись в баллистической электротермохимической установке калибром 34 мм.

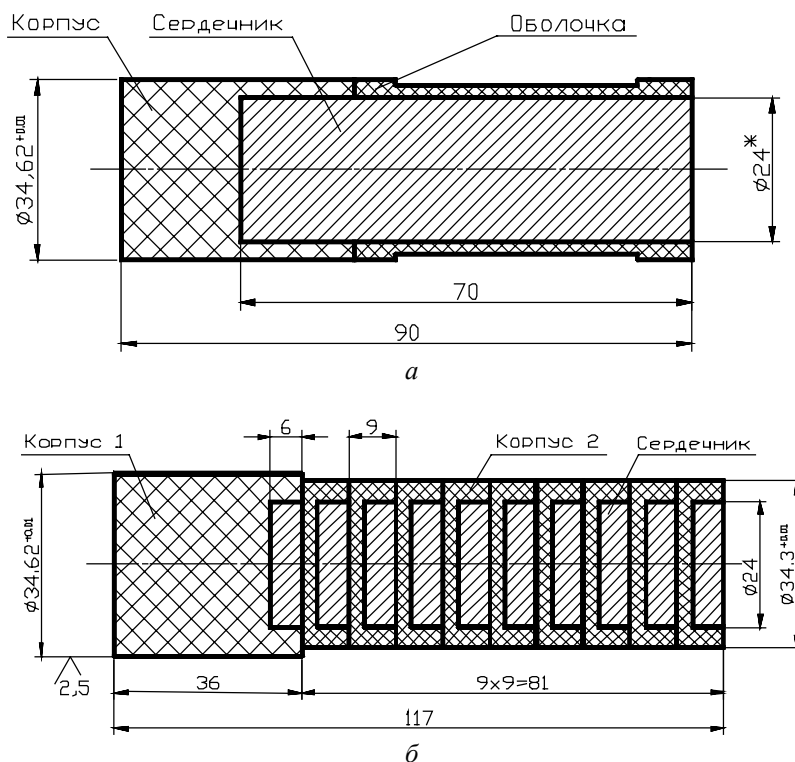


Рис. 1. Чертеж ударника с монолитным (а) и составным сердечником (б)

На рис. 2 представлены экспериментальные результаты взаимодействия ударника типа 1 с заданной бронеплитой при соударении со скоростью 1600 м/с. В бронеплите образуется сквозное отверстие и с тыльной стороны отделяется откольная тарелка. Диаметр входного отверстия с лицевой стороны 44 мм. Диаметр выходного отверстия с тыльной стороны 30 мм. Диаметр откольной тарелки 47 мм.

Параметры математической модели рассматриваемых материалов приведены в [14].

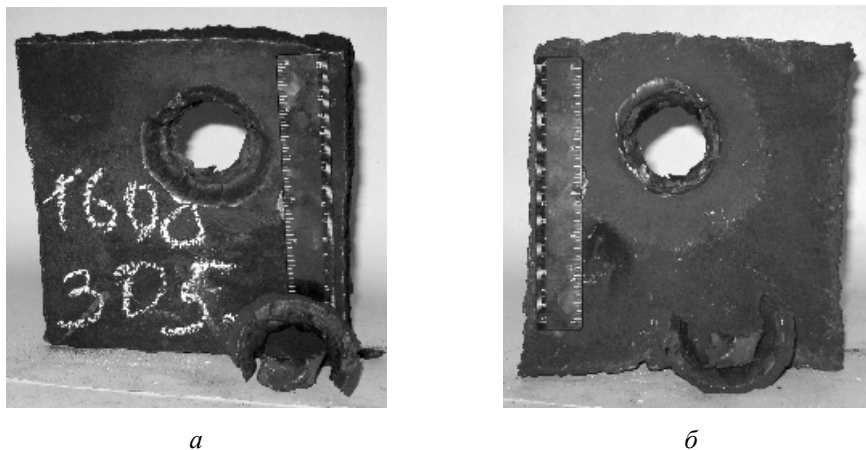


Рис. 2. Вид лицевой (а), тыльной (б) сторон бронеплиты и фрагмента откольной тарелки после соударения с поражающим элементом 1 типа

На рис. 3 и 4 представлены результаты математического моделирования ударно-го взаимодействия ударника 1-го типа с бронеплитой при скорости удара 1600 м/с.

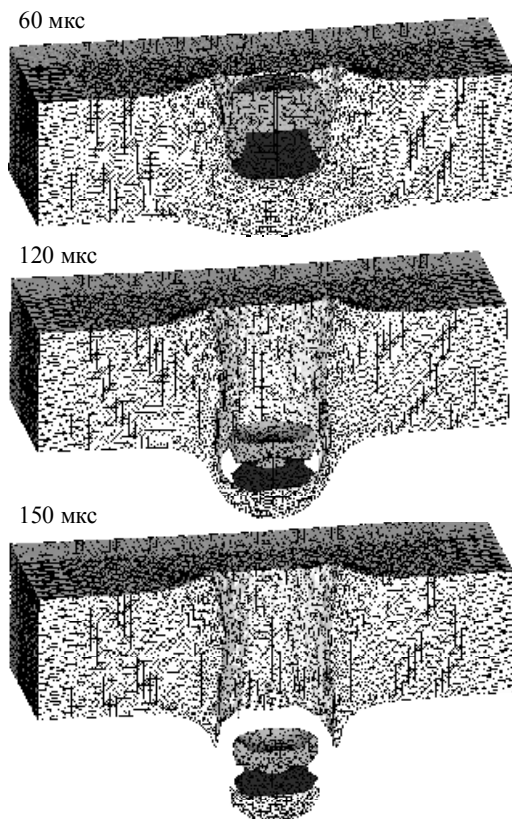


Рис. 3. Хронограмма пробития бронеплиты ударником 1-го типа

Хронограмма пробития бронеплиты ударником 1-го типа приведена на рис. 3. Пробитие мишени происходит при 120 мкс. На этот момент времени ударник сработался не полностью. В запреградное пространство попадают материал, выбитый из бронеплиты ударником, остатки стального стержня и дна текстолитового стакана. Сопоставление результатов математического моделирования и эксперимента показывает удовлетворительное согласование: по диаметру входного отверстия с лицевой стороны 1 % (45,5 мм – расчет), по диаметру выходного отверстия с тыльной стороны 10 % (33 мм – расчет).

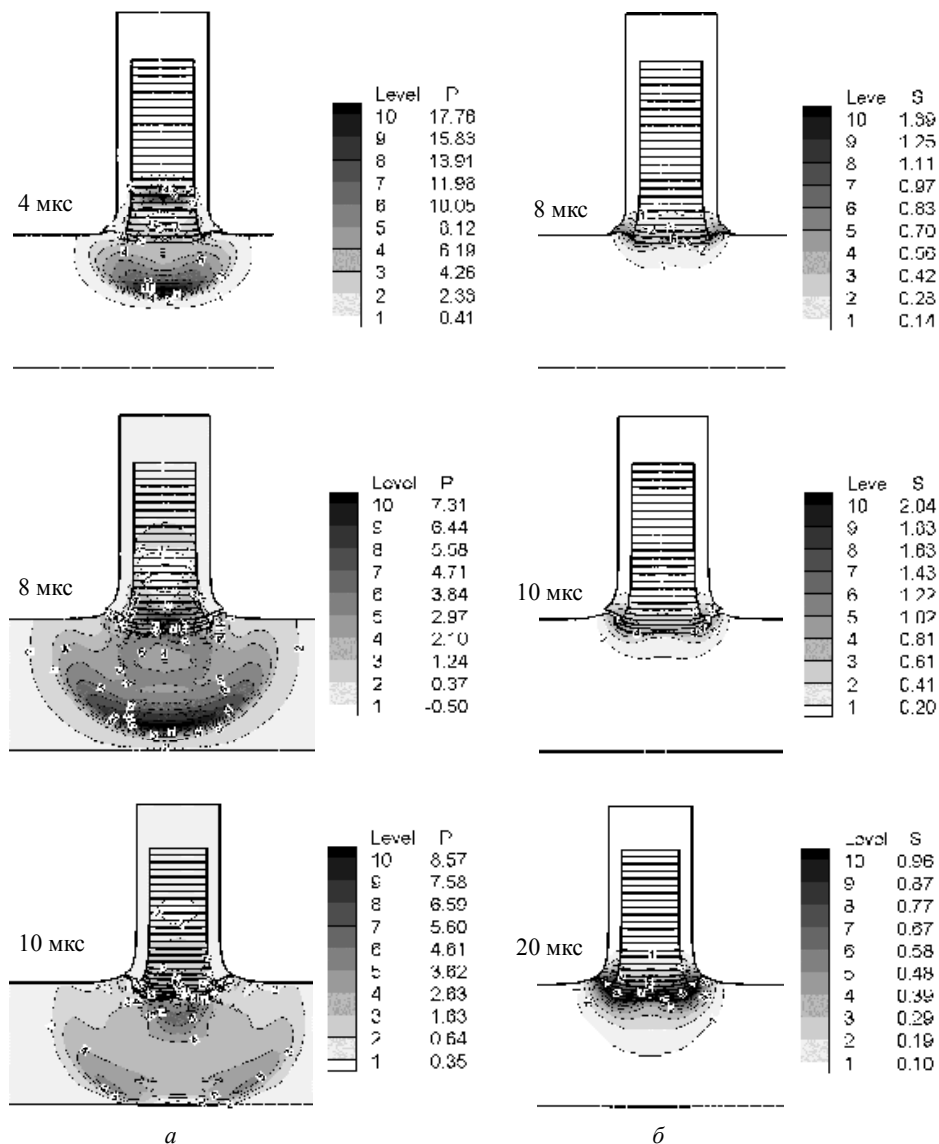


Рис. 4. Изолинии давления  $P$  (ГПа) (а) и интенсивности пластических деформаций  $S$  (б) в ударнике 1-го типа и бронеплите

Распределение изолиний давления (рис. 4, а) в начальные моменты времени характеризуют формирование ударно-волновых процессов при соударении. В результате удара по составному ударнику и мишени в противоположных направлениях от контактной поверхности распространяются ударные волны, давление за фронтом которых достигает величины 36,2 ГПа. Одновременно по контуру от свободных поверхностей взаимодействующих тел в глубь ударно сжатых материалов распространяются волны упругопластической разгрузки, понижающие уровень сжимающих напряжений. В момент времени 4 мкс ударный фронт в плите достиг её центральной части. В результате действия волн разгрузки величина давления за ударным фронтом понизилась до 17,8 ГПа. Область максимальных сжимающих напряжений в составном ударнике находится в стальном стержне на расстоянии от поверхности контакта взаимодействующих тел равном, примерно, первоначальному его диаметру. Максимальное давление в ней 8,12 ГПа. Ударный фронт в мишени выходит на тыльную свободную поверхность в момент времени 8 мкс. За его фронтом давление достигает величины лишь 7,3 ГПа. Область максимальных сжимающих напряжений в составном ударнике расположена в данный момент времени в стальном стержне у поверхности раздела материалов ( $P = 4,71$  ГПа). Ударный фронт отражается от свободной тыльной поверхности в ударно сжатый материал в виде волн упруго-пластической разгрузки. Последующие моменты времени процесса характеризуются взаимодействием встречных волн разгрузок, распространяющихся от лицевой и тыльной поверхностей бронеплиты. Уровень растягивающих напряжений, образующихся в бронеплите в процессе их взаимодействия, не достаточен для роста и слияния микродефектов, поэтому отрывного разрушения в бронеплите не наблюдается. В момент времени 10 мкс весь материал бронеплиты под ударником подвергнут воздействию сжимающих напряжений. Разрушение материалов ударника и мишени происходит по сдвиговому механизму. Это хорошо видно из рис. 4 б, на котором в те же моменты времени представлены изолинии интенсивности пластических деформаций.

На рис. 5 представлены экспериментальные результаты взаимодействия ударника 2-го типа с бронеплитой. При соударении со скоростью 1600 м/с в бронеплите образовался кратер со следующими характеристиками: глубина 22 мм, внешний диаметр 43 мм, внутренний диаметр 22 мм. Ударник при внедрении сработался полностью. На тыльной стороне образовалась небольшая выпучина.

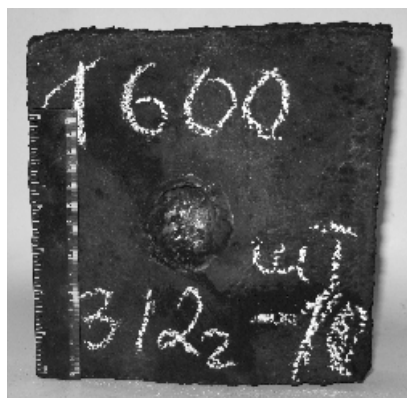


Рис. 5. Вид лицевой стороны бронеплиты после соударения с ударником 2-го типа

На рис. 6 и 7 представлены результаты математического моделирования ударного взаимодействия ударника 2-го типа с бронеплитой при скорости удара 1600 м/с. В момент времени 80 мкс ударник состоит из остатков деформированного десятого стального элемента и дна текстолитового стакана. К моменту времени 100 мкс происходит полное срабатывание последнего стального элемента, дальнейшее формирование кратера в мишени происходит в результате внедрения дна стакана. Расчет проведен до момента времени 150 мкс. Ударник полностью сработался. Как и в эксперименте (рис. 5), пробитие бронеплиты ударником 2-го типа не произошло. Сопоставление результатов математического моделирования и эксперимента показывает удовлетворительное согласование: по глубине кратера 11 % (24 мм – расчет), по внешнему диаметру кратера 8 % (39 мм – расчет), по внутреннему диаметру кратера 3 % (34 мм – расчет). Хронограмма проникания ударника второго типа в бронеплиту при скорости удара 1600 м/с приведена на рис. 6. О волновой картине протекающих процессов и характере разрушения можно судить по приведенным на рис. 7 изолиниям давления  $P$  (ГПа) (а) и изолиниям интенсивности пластических деформаций  $S$  (б).

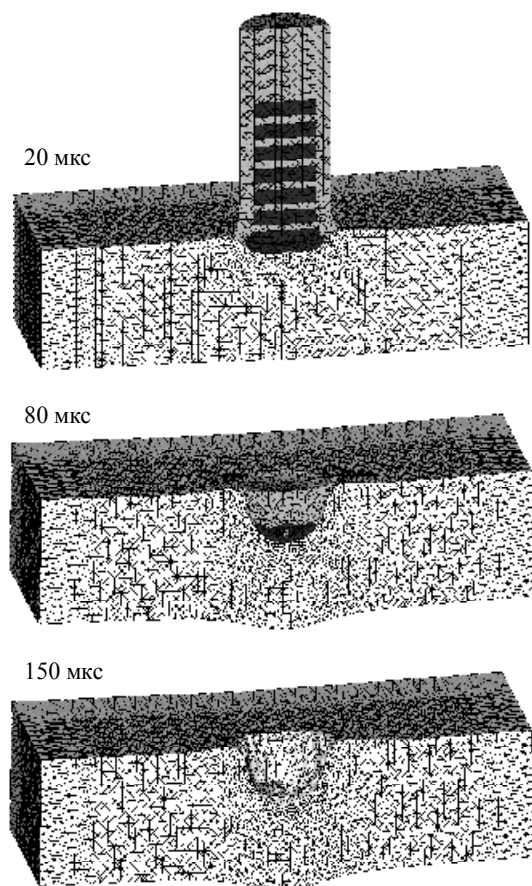


Рис. 6. Хронограмма процесса внедрения ударника 2-го типа в бронеплиту



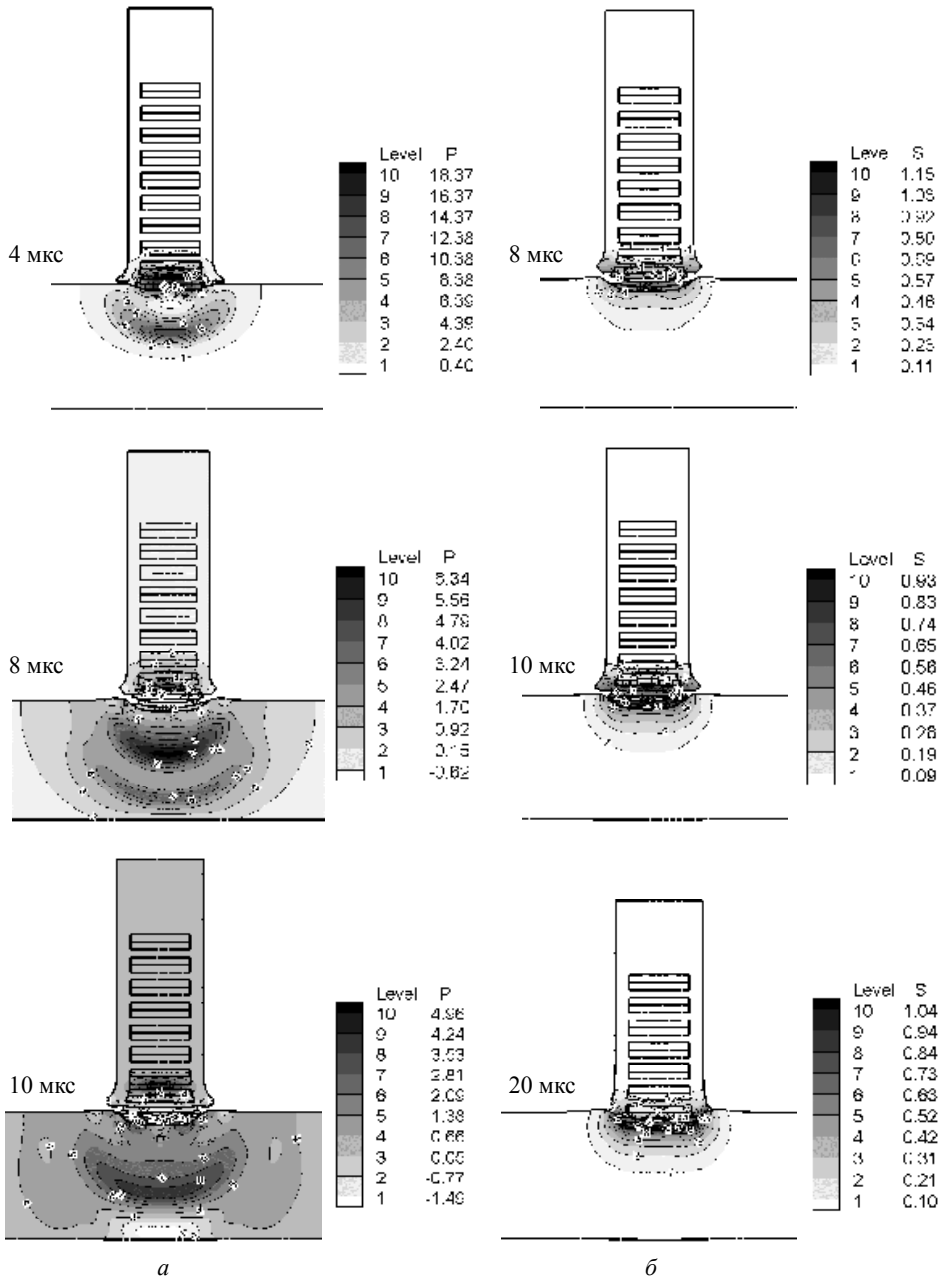


Рис. 7. Изолинии давления  $P$  (ГПа) (а) и интенсивности пластических деформаций  $S$  (б) в ударнике 2-го типа и бронеplate

Как и в предыдущем варианте взаимодействия в момент удара в ударнике и в мишени образуются ударные волны, давление за фронтом которых достигает величины 36,2 ГПа. Однако картина взаимодействия волн сжатия и разгрузки сильно отличается от рассмотренной выше. В момент времени 4 мкс за ударным

фронтом в бронеплите давление достигает величины лишь 10,6 ГПа. В то же время в области сжимающих напряжений в составном ударнике второго типа, расположенной у контактной поверхности взаимодействующих тел и охватывающей материалы двух стальных элементов и текстолитовую прокладку между ними, его величина равна 18,37 ГПа. Ударный фронт достигает тыльной свободной поверхности мишени, как и в предыдущем варианте в момент времени 8 мкс. Однако давление за фронтом равно лишь 4,02 ГПа. В отличие от предыдущего варианта вслед за первым ударным фронтом в сторону тыльной поверхности в центре мишени распространяется второй ударный фронт, в котором давление достигает величины 5,56 ГПа.

Область сжимающих напряжений в ударнике охватывает второй и часть третьего стальных элементов и текстолитовую прокладку между ними. В этой области давление достигает величины 3,24 ГПа. Происходит разрушение материалов ударника и мишени по сдвиговому механизму, как видно из рис. 7, б. Взаимодействие встречных волн разгрузки, распространяющихся от лицевой и тыльной свободных поверхностей, привело к образованию в момент времени 10 мкс области растягивающих напряжений вблизи тыльной свободной поверхности ( $P = -1,49$  ГПа), однако разрушение материала по отрывному механизму не произошло. Максимальные сжимающие напряжения ( $P = 3,53$ ) достигаются в центре мишени за вторым ударным фронтом. Последующие моменты времени характеризуются взаимодействием этого фронта с волнами разгрузки, распространяющимися от лицевой и тыльной поверхностей мишени. Под ударником в бронеплите формируется область максимальных сжимающих напряжений. В этой же области при 20 мкс достигаются предельные значения величины интенсивности пластических деформаций. Разрушение материалов ударника и мишени в данной области протекает по сдвиговому механизму.

Рассмотренные варианты высокоскоростного взаимодействия ударников, содержащих монолитный и составной сердечник, с бронеплитой при одинаковых условиях удара показали различную картину как по интегральным результатам – пробитие плиты ударником 1-го типа и образование кратера в плите ударником 2-го типа, так и по течению ударно-волновых процессов во взаимодействующих телах. Это объясняется различной конструкцией ударников. Ударник 1-го типа отличается большей проникающей способностью, чем ударник 2-го типа.

Таким образом, совместное проведение лабораторного эксперимента и математического моделирования позволяет глубже понять процессы высокоскоростного соударения и дать им верную физическую интерпретацию.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьева С.А., Белов Н.Н., Хабибуллин М.В. и др. Прогнозирование последствий высокоскоростного соударения метеоритных частиц с элементами защитных конструкций космических аппаратов // Космические исследования. 1997. Т. 35. № 5. С. 480–486.
2. Соломонов Ю.С., Белов Н.Н., Югов Н.Т. и др. Разрушение пластин и цилиндрических оболочек импульсом рентгеновского излучения // Вестник ТГАСУ. 2003. № 2. С. 118–119.
3. Волокитин Г.Г., Белов Н.Н., Хабибуллин М.В. и др. Электрогидравлическая очистка внедренных плоскостей тепловых агрегатов от отложений // Теплофизика аэромеханика. 2000. Т. 7. № 3. С. 451–457.
4. Белов Н.Н., Коняев А.А., Хабибуллин М.В. Моделирование ударно-волнового прессования порошковой керамики на баллистическом стенде // ПМТФ. 1997. Т. 38. № 1. С. 43–50.

5. Белов Н.Н., Бирюков Ю.А., Югов Н.Т. и др. Процессы ударного взаимодействия частиц керамических материалов при измельчении в пневмоциркуляционном аппарате // Теоретические основы химической технологии. 2005. Т. 39. № 3. С. 327–333.
6. Афанасьева С.А., Белов Н.Н., Копаница Д.Г. и др. Разрушение бетонных и железобетонных плит при высокоскоростном ударе и взрыве // ДАН. 2005. Т. 401. № 2. С. 185–188.
7. Белов Н.Н., Демидов В.Н., Ефремова Л.В. и др. Компьютерное моделирование динамики высокоскоростного удара и сопутствующих физических явлений // Изв. вузов. Физика. 1992. № 8. С. 5–48.
8. Белов Н.Н., Югов Н.Т., Копаница Д.Г., Югов А.А. Динамика высокоскоростного удара и сопутствующие физические явления. Томск: STT, 2005. 360 с.
9. Белов Н.Н., Кабанцев О.В., Копаница Д.Г., Югов Н.Т. Расчетно-экспериментальный метод анализа динамической прочности элементов железобетонных конструкций. – Томск: STT, 2008. 292 с.
10. Глушак Б.Л., Куропатенко В.Ф., Новиков С.А. Исследование прочности материалов при динамических нагрузках. Новосибирск: Наука, 1992. 295 с.
11. Белов Н.Н., Коняев А.А., Хабибуллин М.В. и др. Влияние полиморфных фазовых превращений на процесс взрывного обжатия стальных шаров // ФГВ. 1997. Т. 33. № 5. С. 128–136.
12. Афанасьева С.А., Белов Н.Н., Хабибуллин М.В. и др. Анализ высокоскоростного проникания сильнопористого ударника в мишень конечной толщины // Изв. РАН. МТТ. 1995. № 2. С. 91–100.
13. Афанасьева С.А., Белов Н.Н., Югов Н.Т. Проникание цилиндрических ударников в преграды из бетона и песчаного грунта // ДАН. 2002. Т. 387. № 5. С. 1–4.
14. Ииценко А.Н., Белов Н.Н., Югов Н.Т. и др. Анализ динамической прочности бронеплит при ударном нагружении расчетно-экспериментальным методом // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2010. № 2(10). С. 71–78.
15. Белов Н.Н., Корнеев А.И., Николаев А.П. Численный анализ разрушения в плитах при действии импульсных нагрузок // ПМТФ. 1985. № 3. С. 132–136.
16. Белов Н.Н., Корнеев А.И., Симоненко В.Г. Модель окольного разрушения пористой упругопластической среды, испытывающей полиморфный фазовый переход // ДАН. 1990. Т. 310. № 5. С. 1116–1120.
17. 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.
18. Югов Н.Т. Численный анализ трехмерного процесса деформирования и разрушения цилиндра и пластины при наклонном соударении // Изв. АН СССР. МТТ. 1990. № 1. С. 112–117.
19. Белов Н.Н., Югов Н.Т., Копаница Д.Г. и др. Исследование прочности моделей стальных трубобетонных и железобетонных колонн на неоднократный торцевой удар падающего груза расчетно-экспериментальным методом // Механика композиционных материалов и конструкций. 2010. Т. 16. № 2. С. 181–190.
20. Белов Н.Н., Югов Н.Т., Югов А.А. и др. Исследование методом компьютерного моделирования проникающей способности группы компактных цилиндрических элементов при последовательном ударе по различным мишеням // Вестник ТГАСУ. 2007. № 4. С. 80–92.
21. Baryshev M.S., Burakov V.A., et al. Using plasma to intensify the ignition and combustion of high-energy materials // Изв. вузов. Физика. 2006. № 11. Приложение. С. 487–450.
22. Барышев М.С., Бураков В.А., Буркин В.В. и др. Разработка импульсных плазматронов и опыт их применения для насыпных зарядов в баллистических экспериментах // Химическая физика и мезоскопия. 2009. Т. 11. № 2. С. 147–152.

*Ishchenko A.N., Belov N.N., Yugov N.T., Afanas'eva S.A., Burkin V.V., Yugov A.A.* RESEARCH OF THE PENETRATING ABILITY OF STEEL AND TEXTOLITE COMPOUND STRIKERS INTO ARMOR PLATES USING THE EXPERIMENT-CALCULATED METHOD. Processes of shock interaction of two types of compound strikers with a weight of 300 g and steel armor plates with a thickness of 50 mm were investigated by the computer modeling method. The impact speed is 1600 m/s. In the first version, the striker was represented as a steel core in a textolite pallet. In the second version, the steel core was replaced by a set of ten steel plates divided with textolite spacers. A satisfactory coordination with the results of a specially performed experiment was obtained.

Keywords: experimental, mathematical modeling, high-speed impact, striker, armor plate, shock waves, destruction, crater.

*Ishchenko Aleksandr Nikolaevich* (Tomsk State University)

*Belov Nikolay Nikolaevich* (Tomsk State University)

E-mail: [n.n.belov@mail.ru](mailto:n.n.belov@mail.ru)

*Yugov Nikolay Tichonovich* (Tomsk State University)

E-mail: [n.t.yugov@mail.ru](mailto:n.t.yugov@mail.ru)

*Afanas'eva Svetlana Ahmed-Ryzovna* (Tomsk State University)

E-mail: [s.a.afanasyeva@mail.ru](mailto:s.a.afanasyeva@mail.ru)

*Burkin Viktor Vladimirovich* (Tomsk State University)

*Yugov Aleksey Aleksandrovich* (Tomsk State University of Architecture and Building)

E-mail: [yugalex@sibmail.com](mailto:yugalex@sibmail.com)