УДК 519.6

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ КОМПАКТНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

С. С. Соколов, А. А. Садовой, Т. И. Чайка
(РФЯЦ-ВНИИЭФ)

Исследовано влияние механизмов разрушения на формирование компактных высокоскоростных элементов. Для математической модели использована ранее развитая кинетическая модель динамического разрушения, учитывающая разрушения как на разгрузках, так и при сдвиговых деформациях, а также описывающая в некоторых случаях компактирование разрушенного материала.

Численные расчеты выполнены по двумерной методике ДМК для конструкции типа *полусфера-цилиндр* с алюминиевой оболочкой и конструкции в форме слабовогнутого лайнера из меди. Показано, что в алюминиевом лайнере формируются локальные зоны разрушения головной части элемента. Для медного лайнера полученные зоны разрушения не удается согласовать с экспериментальными данными при использовании выбранных параметров сдвигового разрушения.

На протяжении последних лет в РФЯЦ-ВНИИЭФ активно развивались расчетно-теоретические методы исследования процессов формирования высокоскоростных компактных металлических элементов, которые характеризуются интенсивными вязкопластическими течениями [1—5]. Результаты расчетов этих процессов в определенной мере калибровались по известным экспериментальным данным, однако до настоящего времени нет полной уверенности в их адекватности. Схожие проблемы отмечаются и разработчиками подобных устройств в России [6, 7] и за рубежом.

Среди первоочередных, влияющих на точность моделирования формирования компактного высокоскоростного элемента, можно выделить проблему достаточно полного учета основных физических процессов, определяющих динамику его формирования, и учета происходящих в связи с этим изменений свойств материала. В выполненных к настоящему времени расчетных работах достаточно полно учитываются диссипативные процессы, связанные с большими пластическими деформациями, однако практически не учитывается влияние динамической вязкости на диссипативные процессы [1] при реализуемых больших скоростях деформации. Отдельного рассмотрения заслуживает учет динамики разрушения компактного элемента на различных стадиях его формирования. Последнее существенно, так как в некоторых зонах рассматриваемого элемента на различных стадиях его формирования могут достигаться локальные деформации, превышающие предельные (по статическому критерию разрушения) для материала элемента, что может приводить к образованию локальных повреждений (трещин, каверн). Известные экспериментальные данные указывают, что реальные элементы имеют часто негладкие поверхности, влияющие на устойчивость движения сформированного элемента по траектории и его аэродинамические характеристики.

Наиболее подробно расчетно-теоретически исследованы конструкции поражающих элементов в форме слабовогнутого разнотолщинного лайнера и в виде соединения полусферы с цилиндром.

При действии продуктов взрыва на лайнер он ускоряется в осевом и испытывает большие деформации в радиальном направлении. Скорости движения вещества в осевом и радиальном направлениях должны быть оптимизированы для конкретных массово-габаритных параметров лайнера. Последнее объясняется тем, что при малой радиальной скорости движения лайнера возможно преждевременное торможение высокорасположенных его слоев, а при больших осевых скоростях концов лайнера возможно их схлопывание сзади его центральной части в процессе полета.

В кумулятивных устройствах типа *полусфера-цилиндр* вершина полусферической облицовки вытягивается в струю под действием продуктов взрыва ВВ, что в дальнейшем может приводить к распаданию струи на ряд осколков. После схлопывания цилиндрической части облицовки образуется еще одна более высокоскоростная струя, которая в последующем ускоряет осколки, образованные из полусферической облицовки. Развитые в последнее время во ВНИИЭФ кинетические модели динамического разрушения, учитывающие разрушения как на разгрузке [2—4], так и при сдвиговых деформациях, а также описывающие компактирование разрушенного материала, позволяют исследовать влияние механизмов разрушения на формирование компактных элементов и уточнить некоторые их параметры при проектировании.

Численное моделирование задач проводилось по методике ДМК [8], предназначенной для расчета двумерных задач гидродинамики с учетом упругопластических свойств веществ, теплопроводности и детонации взрывчатых веществ, которая включает в себя методики расчета на регулярных и нерегулярных разностных сетках. Использование счетной сетки в виде многоугольников произвольной конфигурации значительно упрощает возможность ее построения в областях произвольной формы с заданными размерами счетных ячеек.

Было проведено две серии расчетов: в первой рассматривалась конструкция заряда типа *полусфера-цилиндр* с алюминиевой оболочкой, во второй — конструкция заряда в форме слабовогнутого лайнера из меди. На рис. 1 приведены начальные геометрии расчетов.

Общее число счетных точек в начальный момент времени в расчетах заряда с алюминиевой оболочкой было равно 14 500, для медного лайнера — 29 700.

В первой серии были проведены следующие расчеты:

а) с достаточно хрупким алюминием без учета компактации;
б) с пластичным вариантом алюминия без учета компактации;

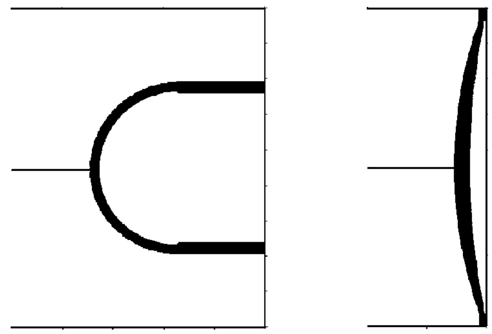


Рис. 1. Начальная геометрия расчетов: *а* — для заряда с алюминиевой оболочкой типа *полусфера-цилиндр*; *б* — для медного лайнера слабовогнутой формы

в) с пластичным вариантом алюминия с учетом компактации;
г) с упругопластической моделью алюминия.

Расчеты проводились в упругопластической постановке.

Для описания развития дефектов во времени использовалась ранее рассмотренная кинетическая модель разрушения [3, 4], которая дала удовлетворительное описание некоторых характерных экспериментов по динамическому разрушению. В этой модели по сравнению с кинетической моделью вязкопластического разрушения дополнительно введены два параметра, характеризующие скорость накопления дефектов при сдвиговых напряжениях (α) и предельную сдвиговую деформацию (β), при превышении которой начинает происходить разрушение образца.

Кратко опишем основные расчетные формулы модели, подробное описание которой можно найти в работах [2, 3]. Как и в [5], будем полагать, что при вязкопластическом механизме разрушения поврежденность среды определяется удельным объемом пор: $\omega = V_n/(V_s + V_n)$. Распределение пор по размерам, согласно обработке экспериментальных данных [5], можно описать формулой $N(R) = N_0 \exp(-R/R_0)$. Здесь $N(R)$ — количество микропор с радиусом, большим R; N_0 — суммарное количество микропор в единице объема; R_0 — параметр распределения. Следовательно, для удельного объема пор можно получить выражение

$$\omega = -\frac{4\pi}{3}\int\limits_0^\infty R^3 \frac{dN}{dR} dR = 8\pi N_0 R_0^3.$$

Как и в модели NAG [5], предполагаем, что при действии растягивающих напряжений происходит зарождение и одновременно рост пор:

$$\dot{N}_0 = \frac{dN}{dt} = N_1 \exp\left(-\frac{P_s - P_{h0}}{P_1}\right), \quad P_s > P_{h0};$$
$$\frac{dR}{dt} = -\frac{P_s - P_{g0}}{4\eta} R, \quad P_s > P_{g0},$$

где N_1 — скорость образования пор при пороговом давлении зарождения пор P_{h0}; P_s — давление в веществе (отрицательное при растяжении); P_1 — параметр модели; P_{g0} — пороговое давление развития пор; η — эффективная вязкость.

Суммарное изменение удельного объема пор определяется уравнением

$$\frac{d\omega}{dt} = 8\pi N_0 R_0^3 \exp\left(-\frac{P_s - P_{h0}}{P_1}\right) \vartheta(P_s - P_{h0}) + $$
$$+ 3\omega \frac{P_s - P_{g0}}{4\eta} \vartheta(P_s - P_{g0}). \qquad (1)$$

Уравнение (1) описывает две стадии разрушения — образование и рост микроповреждений. Разгрузка первоначально не разрушенного материала происходит сначала по адиабате. Однако при достижении отрицательного порогового давления P_{g0} начинается расширение пор, а при достижении порогового давления P_{h0} начинается образование новых пор.

При достижении критической поврежденности ω_0 вещество переходит в следующую стадию — слияния микродефектов и образования трещин. Вещество перестает сопротивляться расширению, т. е. происходит его разрушение. Предполагается, что в этом случае вещество распадается на невзаимодействующие между собой фрагменты, и давление в ячейке полагается равным нулю. Дальнейшее расширение разрушенного вещества не приводит к изменению давления, которое остается нулевым. При этом поврежденность среды ω находится методом итераций из следующего условия: при данном состоянии среды (ρ, E) давление в ячейке должно быть равно нулю.

Как показано в работе [2], приращение тепла dQ, переданного системе, определяется мощностью диссипации энергии при необратимых объемных деформациях: $T_s dS_s = -\dfrac{P d\omega}{\rho\,(1-\omega)}$. Мера поврежденности может как увеличиваться, так и уменьшаться (при компактировании). При отрицательном давлении P_s рост поврежденности $\dfrac{d\omega}{dt} > 0$, следовательно $dQ > 0$. В [2] возможность роста энтропии при сжатии связывается с совершением работы по дроблению и уплотнению частиц. На траекториях разгрузки удельный объем пор не меняется: $\dfrac{d\omega}{dt} = 0$. Кривая компактирования $\omega = \omega\,(P_k)$ разделяет области обратимых и необратимых деформаций.

Если поврежденная среда начинает сжиматься, то происходит процесс необратимых объемных деформаций разрушенного материала, т. е. так называемый процесс компактирования. В рамках рассматриваемой модели кривая компактирования представляется в виде [2]

$$\omega = \omega_0 \left(1 - \frac{P}{P_k}\right)^2,$$

где P_k — давление компактирования; ω_0 — предельный уровень поврежденности материала, ниже которого в разрушенном материале начинает проявляться прочность на сжатие. В процессе сжатия может произойти полное компактирование до $\omega = 0$, и далее сжатие идет по адиабате сплошного материала.

В области обратимых объемных деформаций в частично разрушенном материале поврежденность при сжатии меняется пропорционально изменению плотности вещества. В этом случае сжатие пойдет по упругой кривой, а начиная с определенного момента перейдет на кривую компактирования. Если в компактирующемся материале произойдет сброс давления, то разгрузка также пойдет по упругой кривой.

При построении уравнения состояния поврежденной среды используется дополнительный параметр ω. Из рассмотрения теромодинамической согласованности модели получено

$$P(\rho, E, \omega) = (1-\omega) P_s \left(\frac{\rho}{1-\omega}, E\right).$$

Здесь $P_s(\rho_s, E_s)$ — уравнение состояния сплошного вещества; $\rho = \rho_s(1-\omega)$, где ρ_s — плотность сплошного вещества, ρ — средняя плотность вещества в ячейке.

Используемое в данной работе кинетическое уравнение для накопления сдвиговых разрушений аналогично уравнению, приведенному в работе [9]. По аналогии с теорией пластического течения оно базируется на предположении, что девиатор скорости деформации разрушения пропорционален девиатору тензора напряжений [9]. Для скалярного параметра сдвиговой поврежденности использованы уравнения

$$\dot{\alpha}=C\left[\frac{S_u}{(1-\omega)(1-\alpha)}-S_u^*\right]H\left(\frac{S_u}{(1-\omega)(1-\alpha)}-S_u^*\right);$$

$$\dot{\beta}=c_n(\varepsilon_p-\varepsilon_0)\frac{1}{(1-\omega)(1-\beta-\alpha)},$$

где $S_u=\sqrt{S_{ij}S_{ij}}$ — второй инвариант девиатора тензора напряжений S_{ij}; $\varepsilon_p=\sqrt{\varepsilon_{ij}^p\varepsilon_{ij}^p}$ — второй инвариант тензора пластических деформаций ε_{ij}; $H(x)$ — функция Хевисайда; C, S_u^*, c_n, ε_0 — параметры модели.

Параметр α отвечает за сдвиговые разрушения при развитых пластических течениях материала. Параметр β отвечает за разрушения на сдвиговых деформациях материала при достижении критического значения ε_0. Разрушение по сдвигу начинает формироваться в области пластических деформаций при достижении деформацией ε_p предельного значения. После начала разрушения эти процессы могут продолжаться и в области упругих деформаций. При накоплении повреждений в данной модели происходит изменение эффективных свойств среды в ячейке по следующим зависимостям:

- модуль сдвига: $G=G_s(1-\omega)(1-\beta-\alpha)$;
- динамическая вязкость: $\eta=\eta_0(1-\omega)\times\times(1-\beta-\alpha)$;
- предел текучести: $Y=Y_s(1-\omega)(1-\beta-\alpha)$.

Существенно, что эти параметры выражаются через второй инвариант тензора деформаций — тем самым можно надеяться, что такие параметры будут иметь универсальный характер, т. е. будут оставаться одними и теми же для экспериментов с различными симметриями (сферическими, цилиндрическими, плоскими). Напомним, что в моделях, использующих непосредственно предельно допустимые значения скорости деформации, эти параметры будут различными для различных газодинамических экспериментов.

Другие особенности кинетической модели динамического разрушения, включающей вязкопластический рост пор и поврежденность при сдвиговых деформациях, заключаются в следующем:

- учитывается ослабление несущей способности конструкции за счет роста дефектов, имеющих форму, близкую к сферической, и происходящих в областях, охваченных разгрузкой;
- в областях сжатия предсказывается компактирование материала, т. е. увеличение его несущей способности;
- при интенсивных сдвиговых деформациях моделируется разрушение материала за счет разрыва атомных связей в твердом теле.

Существенно, что изменение механических свойств материала при накоплении повреждений в данной модели носит нелинейный характер, так как после каждого шага, на котором рассчитываются объемные и сдвиговые параметры поврежденности, происходит пересчет реологических параметров среды.

Указанные выше особенности кинетической модели динамического разрушения, включающей пластический рост пор и поврежденность при сдвиговых деформациях, позволяют использовать ее для моделирования газодинамических экспериментов, в которых реализуются сложные напряженные состояния.

В таблице приведены значения параметров кинетики разрушения, использованные в расчетах для алюминия и меди. При этом и для меди, и для алюминия $\omega_0=0{,}3$.

В качестве примера приводятся результаты расчета для алюминиевого заряда типа *полусфера-цилиндр* с учетом компактации. В расчетах исследовалось включение механизма хрупкого разрушения на формирование и полет поражающего элемента.

На рис. 2 представлены распределения скоростей и плотностей на характерные моменты времени, полученные в расчете с учетом компактации алюминия.

Значения параметров кинетики разрушения

Вещество	R_0, см	N_0, (см$^3\times$ $\times10^{-3}c)^{-1}$	P_{h0}, ГПа	P_{g0}, ГПа	P_1, ГПа	η, ГПа$\times$ $\times10^{-5}c$	ε_0,	c_n, $10^{-5}c^{-1}$	C, $10^{-5}c^{-1}$	S_u^*, ГПа	P_k, ГПа
Al	0,0001	3 000	0,3	0,2	0,04	0,02	0,25	10	-10	0,315	7
Cu	0,0001	$2\cdot10^7$	0,5	0,5	0,2	0,002	0,3	50,1	-10	0,072	—

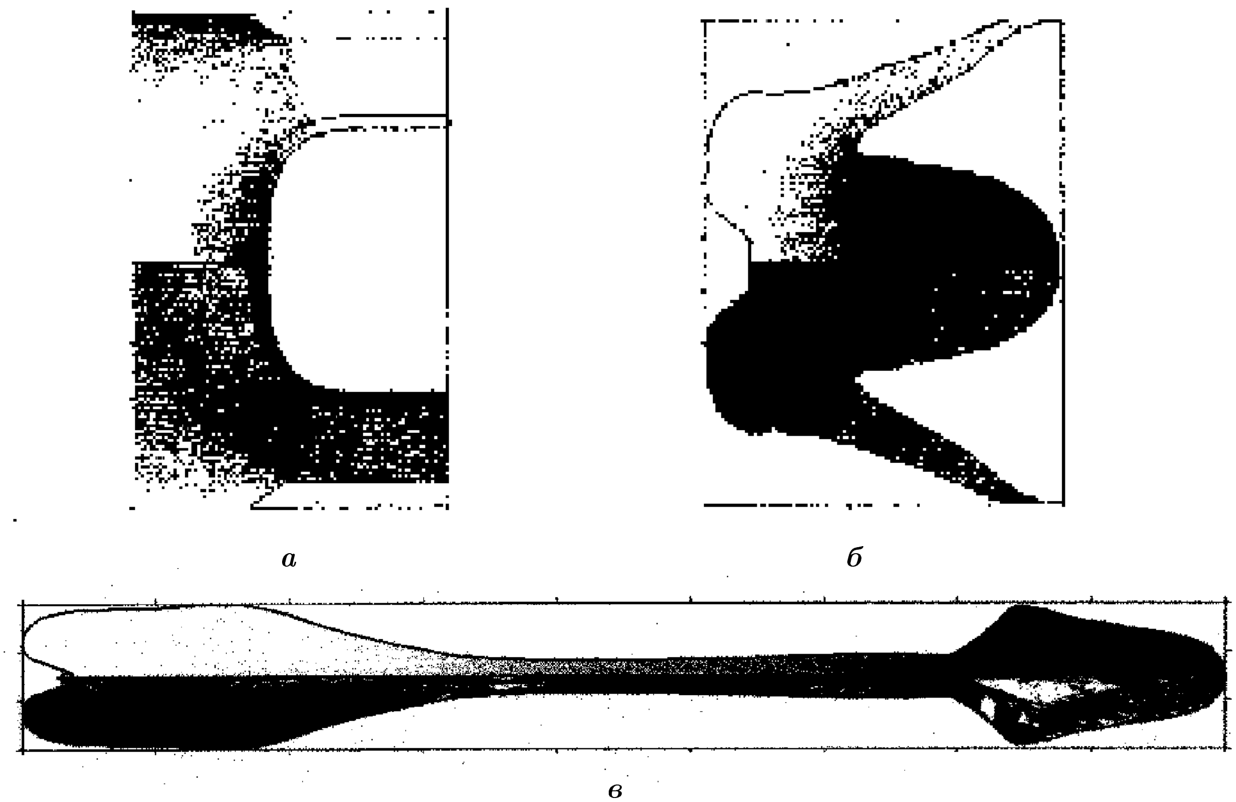


Рис. 2. Распределение скоростей (км/с) (вверху) и плотностей (г/см^3) (внизу) в конструкции заряда типа *полусфера-цилиндр*: *а* — $t = 17{,}5$ мкс; *б* — $t = 30$ мкс; *в* — $t = 55$ мкс

На рис. 3, *а, б, в* приведены распределения параметров механических повреждений, полученные в указанном расчете. В верхней части каждого рисунка приведен массив, характеризующий вид разрушения: черный цвет означает разрушение по откольному напряжению, темно-серый — по сдвиговому напряжению, светло-серый — пластическое состояние, белый — упругое состояния после достижения пластических деформаций. В нижней, симметричной, части рисунка приводится мера повреждения по сдвиговой деформации: если достигается значение, равное 1 (черный цвет), то материал разрушен по сдвиговому механизму.

На рис. 4, *а, б* приведены распределения механических повреждений с учетом меры повреждений по вязкопластическому механизму за счет действия растягивающих напряжений. В верхней части каждого рисунка приведен массив, характеризующий вид разрушения. В нижней, симметричной, части рисунка, приводится мера повреждения за счет действия растягивающих напряжений: если достигается значение, равное 0,3 (черный цвет), то материал разрушен в данном месте полностью.

Из рис. 3, 4 видно, что при учете компактации материала на сжатии происходит частичное "залечивание" микроповрежденностей в образце.

Для второй серии задач приводятся результаты расчета с учетом параметров механических повреждений (для вязкопластического и хрупкого разрушения без учета компактации материала). На рис. 5, 6 приводятся распределения параметров, характеризующих состояние меди на некоторые моменты времени.

К моменту времени $t = 60$ мкс практически весь материал лайнера разрушен по сдвигу (темно-серый цвет на рис. 6, *а* вверху). Область в лайнере, разрушенная по отколу, практически не меняется с течением времени (черный цвет на рис. 6, *б* внизу).

Результаты расчетов конструкций для формирования компактных элементов из алюминия и меди показали влияние задаваемых механизмов разрушения в модели на их форму и состояние. Развиваемая кинетическая модель для описания процессов разрушения за счет механизма вязкопластического развития пор на растягивающих напряжениях (так называемого вязкопластического разрушения) и за счет пластических

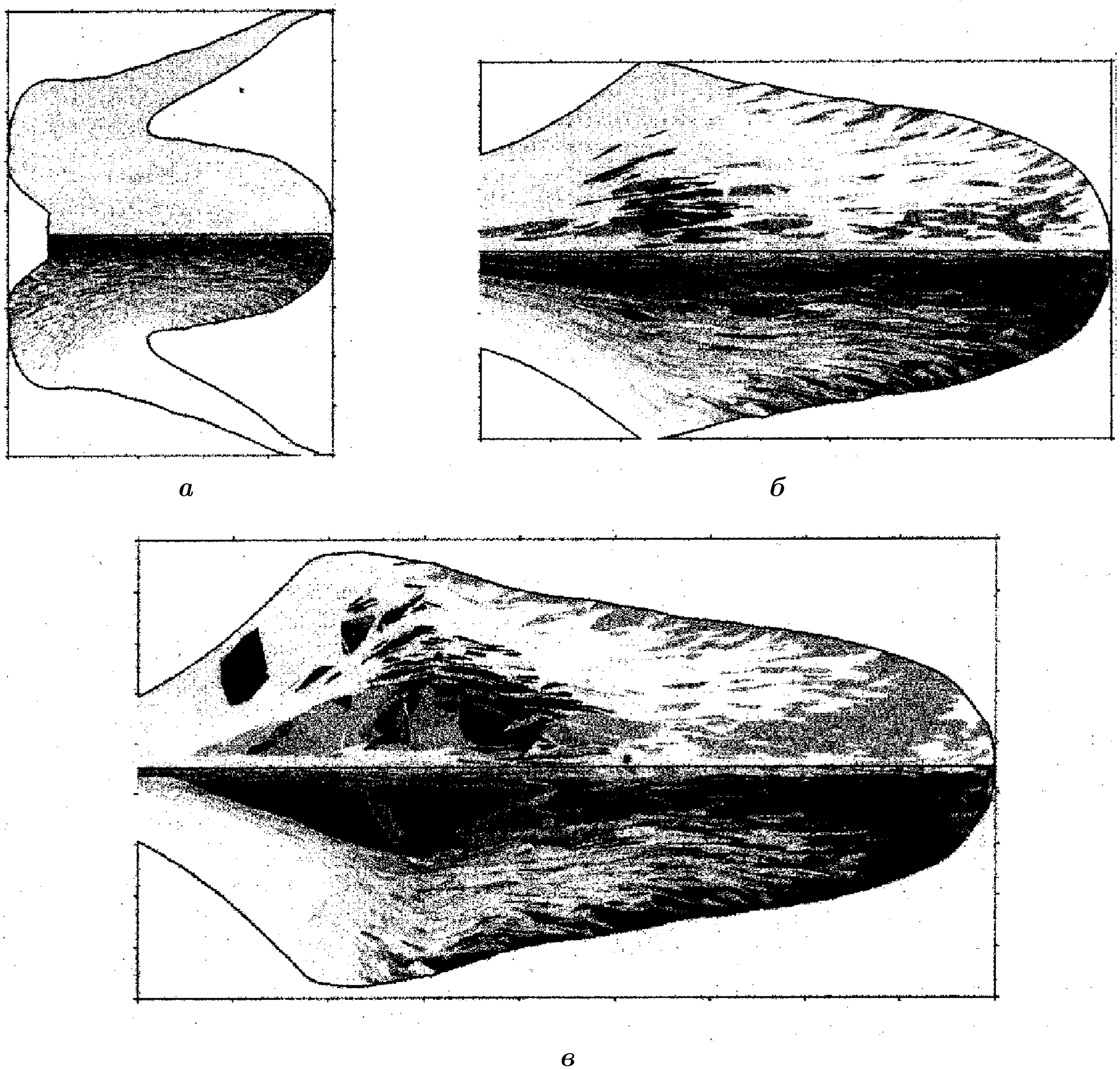


Рис. 3. Распределение параметров, характеризующих механические повреждения алюминия (вверху) и степень повреждения по сдвигу (внизу): *а* — $t = 30$ мкс; *б* — $t = 40$ мкс; *в* — $t = 55$ мкс

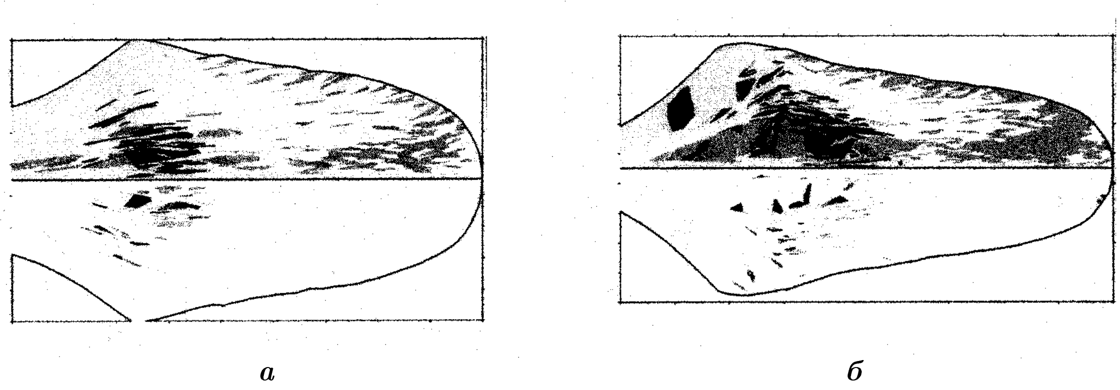
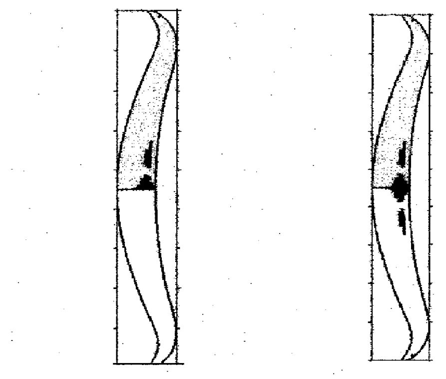
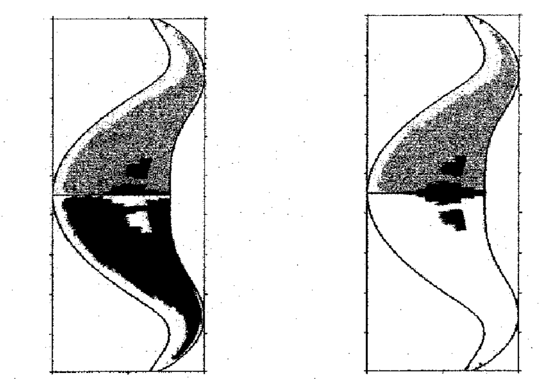


Рис. 4. Распределение параметров, характеризующих механические повреждения алюминия (вверху) и степень повреждения по отколу (внизу) при учете компактации: *а* — $t = 40$ мкс; *б* — $t = 55$ мкс



а *б*

Рис. 5. Распределение параметров, характеризующих механические повреждения меди (вверху) и степень повреждения (внизу) по сдвигу (*а*) и по отколу (*б*) на момент времени $t = 25$ мкс



а *б*

Рис. 6. Распределение параметров, характеризующих механические повреждения меди (вверху) и степень повреждения (внизу) по сдвигу (*а*) и по отколу (*б*) на момент времени $t = 60$ мкс

сдвиговых деформаций (так называемого хрупкого разрушения) была проверена и протестирована на ряде экспериментальных данных для некоторых материалов (см. [2—5] и приведенные в них ссылки).

Результаты расчетов по методике ДМК для алюминиевого лайнера показали, что в сформировавшемся компактном элементе образовались локальные зоны разрушения в головной части. Несмотря на большие зоны разрушения медного лайнера на стадии формирования компактного элемента за счет сдвиговых деформаций, расчетные данные по форме лайнера близки к экспериментальным. Расчетная информация по разрушению образцов получена впервые, и она будет уточняться по мере уточнения параметров модели.

Хотя развиваемая модель является феноменологической, тем не менее при разумном выборе параметров можно осуществлять прогнозирование поведения образцов и элементов конструкций, подверженных ударно-волновому воздействию и последействию в результате разгрузки, с учетом возможных их повреждений микродефектами.

Полученные результаты указывают на возможность использования развиваемой методики для теоретического описания формирования компактных высокоскоростных элементов и оптимизации их расчетных характеристик.

Список литературы

1. *Садовой А. А* Диссипативные процессы при интенсивных вязкопластических течениях // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Теоретическая и прикладная физика. 1989. Вып. 1. С. 19—23.
2. *Огородников В. А., Садовой А. А., Софронов В. Н. и др.* Кинетическая модель пластического разрушения с учетом диссипативных процессов // Хим. физика. 2002. Т. 21, № 9. С. 104—109.
3. *Глушак Б. Л., Иоилев А. Г., Садовой А. А. и др.* Расчетная модель изотропной кинетики пластического разрушения: сравнение двумерных расчетов и экспериментальных данных // Вещества, материалы и конструкции при интенсивных динамических воздействиях. Тр. межд. конф. V Харитоновские науч. чтения. Саров, 17—21 марта 2003. С. 16—21.
4. *Садовой А. А., Соколов С. С.* Кинетическая модель динамического разрушения, включающая пластический рост пор и поврежденность при сдвиговой деформации // Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения. Тр. 3 науч. конф. Волжского регионального центра РАРАН. Саров, 3—5 июня 2003 г. С. 240—241.
5. *Seaman L., Curran D., Shockey A.* Computational models for ductile and brittle fracture // J. Appl. Phys. 1971. Vol. 47(11). P. 4814—4826.

6 *Федоров С. В.* Использование электромагнитных воздействий при взрывном формировании высокоскоростных компактных металлических элементов // Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения. Тр. 3 науч. конф. Волжского регионального центра РАРАН. Саров, 3—5 июня 2003 г. С. 103—104.

7 *Ладов С. В., Бабкин А. В., Колпаков В. И., Федоров С. В.* О возможности использования формируемых взрывом высокоскоростных элементов для пробития подводных преград // Там же. С. 109—110.

8 *Мотлохов В. Н., Рассказова В. В., Шапоренко А. Н.* Лагранжева методика ДМК для решения прикладных задач газовой динамики на нерегулярных сетках // Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения. Саров: ВНИИЭФ, 2000. С. 57—63.

9 *Кисилев А. Б.* Динамические процессы необратимого деформирования и разрушения твердых тел // Мат. моделирование. 2000. Т. 12, № 6. С. 115—121.

Статья поступила в редакцию 26.01.04.