

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА НА ЖЕЛЕЗНУЮ ПЛИТУ

С. Г. Сугак, Г. И. Канель, В. Е. Форгов,
А. Л. Ни, В. Г. Стельмах
(Черноголовка)

Метод численного моделирования в настоящее время успешно используется для решения разнообразных задач гиперзвуковой аэродинамики, физики взрыва и высоких плотностей энергии [1—3]. Успех применения этих методов для описания процессов в конденсированных средах определяется как совершенством расчетной методики, так и адекватностью термодинамических, кинетических и реологических моделей, для поиска которых привлекаются как методы строгой теории, так и доступные для содержательной интерпретации эксперименты с плоскими стационарными ударными волнами.

В данной работе решена задача о взрыве конденсированного ВВ на плоской плите из армо-железа [2]. Путем сопоставления результатов расчета с экспериментом проанализированы основные физические процессы, сопровождающие распространение нестационарного двумерного импульса сжатия в металле, сформулирована математическая модель процесса и найдены ее численные характеристики.

Постановка задачи

Рассматривалась цилиндрически симметричная задача: на диске из армо-железа толщиной 10 и диаметром 120 мм установлен цилиндрический заряд тринитротолуола диаметром и высотой 20 мм, инициируемый в осевой точке на свободной поверхности. Для описания нестационарного движения среды использовались уравнения сохранения массы и количества движения в лагранжевом представлении:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV = 0, \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho u_l dV = \int_{\Sigma} \sigma_{ml} n_m d\Sigma, \quad m, l = 1, 2, 3, \quad (2)$$

где V — объем; Σ — ограничивающая объем поверхность с вектором внешней нормали \vec{n} ; u_l — скорость; ρ — плотность; σ_{ml} — компоненты тензора напряжений.

Предполагается, что процесс детонационного превращения происходит мгновенно и характеризуется только особенностями уравнения состояния $p_{ВВ} = p(\rho)$, а характерные давления в металле не превосходят 30 ГПа, позволяя пренебречь тепловыми составляющими в уравнении состояния. Эти обстоятельства, а также малая роль теплопроводности [4] позволяют в данной задаче ограничиться уравнениями (1), (2).

Метод решения

Задача решалась сквозным конечно-разностным методом с использованием четырехугольной счетной сетки [5]. При этом скорости смещения рассчитывались для узлов сетки, а плотности, напряжения, параметры разрушения и деформации — для центра ячейки. Объем интегрирования в (1) отождествлялся с объемом счетной ячейки, а в (2) вычислялся по положению ближайших к рассматриваемому узлу четырех узлов сетки [5].

Интегрирование по времени проводилось по схеме «предиктор — корректор» [6]. Можно показать, что используемая система конечно-разностных уравнений полностью консервативна на произвольной прямоугольной сетке и имеет второй порядок аппроксимации на равномерной сетке.

Подавление счетных осцилляций осуществлялось с использованием квадратичной объемной искусственной вязкости

$$q_s = c_s A/v \cdot \dot{v}/v \cdot \min(0, \dot{v}/v), \quad (3)$$

сдвиговой вязкости [7]

$$\begin{aligned} q_{xx} &= 2\mu_1(\epsilon_{xx} - 1/3 \cdot \dot{v}/v), \\ q_{yy} &= 2\mu_1(\epsilon_{yy} - 1/3 \cdot \dot{v}/v), \\ q_{zz} &= 2\mu_1(\epsilon_{zz} - 1/3 \cdot \dot{v}/v), \\ q_{xy} &= \mu_1 \epsilon_{xy} \end{aligned} \quad (4)$$

и продольно-поперечного сглаживания по скоростям [8]:

$$u_{ij}^k = \alpha u_{i-1,j}^k + (1 - 2\alpha) u_{ij}^k + \alpha u_{i+1,j}^k, \quad k = 1, 2, \quad (5)$$

где $\mu_1 = \frac{ac_d \sqrt{A}}{v}$; c_s, c_d — константы; A — площадь счетной ячейки; a — скорость звука; $v = 1/\rho$; $\dot{v} = \frac{dv}{dt}$; $\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{zz}, \epsilon_{xy}$ — скорости полной деформации в направлениях индексов; α — коэффициент сглаживания; u^k — сглаженное значение скорости. В расчете сглаживание прекращалось после прохода падающей ударной и отраженной волн через центральную часть образа. Для адекватного описания физических процессов (разрушение, фазовый переход и др.) в металле под действием динамических нагрузок выбран следующий набор констант в (3)–(5): $c_s = 3, c_d = 0,04, \alpha = 0,002$, обеспечивающий минимальные осцилляции параметров при умеренной толщине фронта ударной волны.

Ввиду ограниченности памяти ЭВМ использовано упрощенное описание детонации заряда ВВ в предположении, что детонация возникает в точке инициирования без задержки, а ее фронт распространяется со скоростью D и имеет сферическую форму. В момент прохождения фронта детонации через узел счетной сетки последнему сообщалась скорость по нормали к фронту $u_{ч.-ж.}$, равная скорости Чемпена — Жуге. После прохождения фронта через центр счетной ячейки состояние вещества в ней описывалось уравнением состояния продуктов взрыва [9]

$$p = p_{ч.-ж.} / \rho_{ч.-ж.}^3 \cdot \rho^3.$$

Состояния непрореагировавшего ВВ описывались уравнениями ударной адиабаты

$$D = c_0 + bu, \quad p = \frac{\rho_0 c_0^2 \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right)}{\left[1 - b \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right)\right]^2}. \quad (6)$$

Для тринитротолуола принято: $\rho_0 = 1,56$ г/см³, $D = 6,85$ км/с, $u_{ч.-ж.} = 1,71$ км/с, $c_0 = 2,16$ км/с, $b = 2,24$, $p_{ч.-ж.} = 19$ ГПа, $\rho_{ч.-ж.} = 2,14$ г/см³. Принятая модель не описывает тонкую (с характерным размером ~0,1 мм) структуру химического пика и другие кинетические особенности развития детонации [9], но оказывается достаточно удобной в вычислительном отношении, позволяя с приемлемой точностью описывать действие взрыва в течение значительных промежутков времени.

На границе между зарядом и плитой задано условие скольжения, при котором счетные ячейки ВВ могут смещаться вдоль деформируемой

границы плиты [7]. Смещение граничных узлов плиты и продуктов взрыва рассчитывается независимо, с соблюдением равенства нормальных к границе раздела скоростей, для чего используется поле сил в прилегающих к ней слоях материала.

Поскольку материал плиты обладает сдвиговой прочностью, расчет течения в ней сопряжен с определением тензоров напряжений. Шаровая составляющая тензора напряжений — давление — определялась по плотности материала в счетной ячейке с использованием уравнения состояния [10]

$$p = \frac{c_0^2}{4bv_0} \left[\exp \left(4b \frac{v_0 - v_s}{v_0} \right) - 1 \right], \quad (7)$$

где v_s — удельный объем сплошной компоненты; v_0 — удельный объем при нормальных условиях; $c_0, b = 1,5$ — как и ранее, коэффициенты в (6).

Для описания обратимого полиморфного превращения в железе (давление ~ 13 ГПа) задавались две ветви уравнения состояния $p(v_s)$ с параметрами: $\rho_0 = 7,85$ г/см³, $c_0 = 4,63$ км/с для $p < 13$ ГПа; $\rho_0 = 8,3$ г/см³, $c_0 = 4,9$ км/с для $p \geq 13$ ГПа.

Расчет тензора-девиатора напряжений $s_{xx}, s_{yy}, s_{\theta\theta}$ проводился в деформациях с использованием закона Гука для связи между скоростью деформаций и скоростью изменения девиаторного напряжения. Компоненты скорости деформации определялись по скоростям смещения узлов сетки. Переход от упругой к пластической деформации задавался уравнением текучести Мизеса:

$$s_{xx}^2 + s_{yy}^2 + s_{\theta\theta}^2 + 2T_{xy}^2 = \frac{2}{3} \sigma_T^2,$$

где T_{xy} — касательное напряжение; σ_T — предел текучести для простого растяжения. Условие Мизеса реализовывалось с использованием процедуры приведения напряжения к кругу текучести [7]. В расчетах учитывалась зависимость предела текучести от давления:

$$\sigma_T^0 = \sigma_T' + k_p p,$$

где коэффициенты $k_p = 0,08$, $\sigma_T' = 0,6$ ГПа оценивались по результатам ударно-волновых измерений [10].

Для описания разрушения материала растягивающими нагрузками в [11] предложен континуальный подход, основанный на рассмотрении разрушения как непрерывного процесса зарождения и роста трещин или пор. Параметры материала подбираются на основании металлографического анализа сохраненных образцов. Кинетические соотношения содержат сильные экспоненциальные зависимости, что вызывает определенные трудности при проведении расчета конечно-разностными методами. В данной работе в качестве меры разрушения принят удельный объем трещин v_c , так что удельный объем вещества в счетной ячейке представлялся в виде

$$v = v_c + v_s,$$

где v_s — удельный объем сплошной компоненты, входящий в уравнение состояния (7).

Процесс разрушения описывался на основе кинетического соотношения, построенного на следующих соображениях. Пусть в образце имеются зародыши разрушения с удельным объемом v_{c0} , которые начинают расти при превышении растягивающими напряжениями некоторой критической величины σ_c . Известно, что по мере роста очагов разрушения пороговое напряжение, необходимое для их роста, снижается. Принимая закон вязкого роста трещин или пор [11] и простейшее соотношение для связи между степенью разрушения и пороговым напряжением, получим

следующее простое выражение для скорости роста удельного объема трещин:

$$\frac{\partial v_c}{\partial t} = \begin{cases} 0, & \text{если } |\sigma_{\max}| < \sigma_0 \frac{v_{c1}}{v_c + v_{c1}}, \\ -k_c \operatorname{sign}(\sigma_{\max}) \left(|\sigma_{\max}| - \sigma_c \frac{v_{c1}}{v_c + v_{c1}} \right) (v_{c0} + v_c), & \\ & \text{если } |\sigma_{\max}| \geq \sigma_c \frac{v_{c1}}{v_c + v_{c1}}, \end{cases} \quad (8)$$

где σ_{\max} — минимальное из трех главных напряжений при растяжении или максимальное из трех главных напряжений при сжатии; k_c — величина, обратно пропорциональная вязкости материала; v_{c1} — параметр изменения критического напряжения. Соотношение (8) использовалось также при расчете схлопывания трещин или пор в фазе сжатия.

Известно, что по мере разрушения изменяется сдвиговая прочность и упругие характеристики материала. В данной работе использовалось упрощенное описание этого явления:

$$\sigma_T = \sigma_T^0 \frac{v_{c1}}{v_c + v_{c1}},$$

$$\mu = \mu_0 \frac{v_{c1}}{v_c + v_{c1}},$$

где μ — модуль сдвига; μ_0 — модуль сдвига в исходном материале без разрушения.

Величина $\sigma_c = 1,55$ ГПа взята близкой к величине откольной прочности моделируемого железа «армко». Константы k_c , v_{c0} , k_{c1} подбирались путем сопоставления результатов модельного одномерного расчета и экспериментов по регистрации скорости поверхности при нагружении железной пластины плоскими импульсами сжатия [12]. На рис. 1 показаны расчетные и экспериментальные профили скорости поверхности для случая нагружения образца из армко-железа толщиной 10 мм ударом двухмиллиметровой пластины, движущейся со скоростью 600 м/с. Для описания пластической деформации в одномерных расчетах использовалась упруговязкопластическая модель [12]. Расчет проводился при следующих кинетических константах разрушения: $k_c = 2,5 \times 10^{-2}$ см·с/г, $v_{c1} = 5 \cdot 10^{-3}/\rho_0$, $v_{c0} = 10^{-4}/\rho_0$, где ρ_0 — плотность железа. Результаты модельного расчета хорошо воспроизводят экспериментальные данные. Преимущества кинетического соотношения перед предлагаемыми ранее [11, 12] — в меньшем числе эмпирических параметров и возможности счета с большим шагом по времени.

В силу осевой симметрии задача решалась в цилиндрических координатах. На область заряда отводилось 200 счетных ячеек, на плиту — 576. Исходные размеры счетной ячейки в заряде ВВ составляли 1×1 мм. Для повышения точности счета счетная сетка в области плиты задавалась неравномерной. В области наибольших градиентов течения с радиусом 20 мм размеры счетной ячейки брались равными 0,555 мм в осевом направлении и 0,666 мм в радиальном. Периферийная часть плиты описывалась счетными ячейками с размерами 10 и 30 мм в радиальном направлении.

Результаты расчета

Развитие деформации заряда ВВ и образца со временем показано на рис. 2 в различные моменты времени, отсчитываемые от начала инициирования детонации. Видно распространение детонации по заряду ВВ, разлет продуктов детонации и искажение формы образца под давлением продуктов взрыва. Развитие разрушения приводит к расширению счетных ячеек под действием растягивающих напряжений, что в рамках принятой модели соответствует разрыхлению образца. В отличие от реальной физической картины в расчете при континуальном описании

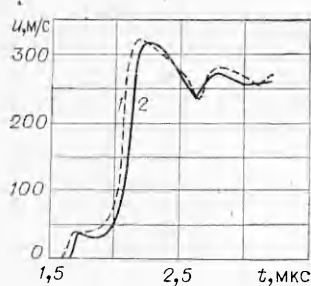


Рис. 1. Расчетные (1) и экспериментальные (2) профили скорости свободной поверхности.

не выявляется положение отдельных трещин. Отметим, однако, что в одномерном расчете отражения от поверхности образца относительно длительных импульсов сжатия в рамках данной модели разрушения на значительно более мелкой расчетной сетке локализация разрушения в отдельные трещины выявляется достаточно четко. Это позволяет надеяться, что точность расчетов по континуальной модели в значительной мере определяется размерами счетной сетки и будет возрастать с ростом числа ячеек.

На рис. 3, 1 показан профиль осевого напряжения $\sigma_{xx}(t)$ в центральной части образца. Сжимающие напряжения приняты положительными. Видно, что форма импульса близка к прямоугольной и соответствует наблюдавшемуся в [13] профилю напряжения после затухания второй пластической волны с фазовым переходом. Время нарастания напряжения во фронте пластической волны не превышает 0,3 мкс. На профиле напряжения выделяется несколько смазанный упругий предвестник. Рост растягивающих напряжений при взаимодействии падающей и отраженной волн разрежения ограничен процессом разрушения материала образца, сопровождающимся релаксацией напряжений.

Развитие зоны разрушения в образце наглядно демонстрируется рис. 4, где приведены с шагом 0,02 см³/г изолинии удельного объема трещин на различные моменты времени. Видно, что зарождаясь вблизи тыльной поверхности центральной части образца, область разрушений распространяется как в осевом, так и в радиальном направлении к заряду ВВ. Степень разрыхления материала в центральной части образца при этом непрерывно возрастает. На график не выводились уровни объема трещин выше 0,3 см³/г, поскольку такая степень разрушения соответствует заведомо полной потере связи между отдельными частицами разрушенного материала.

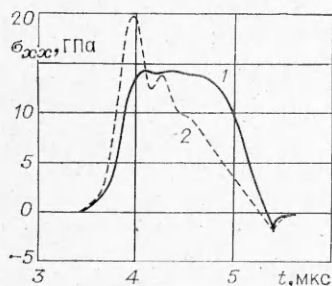


Рис. 3. Профили осевого напряжения $\sigma_{xx}(t)$ в центральной части образца с учетом (1) и без учета фазового перехода (2).

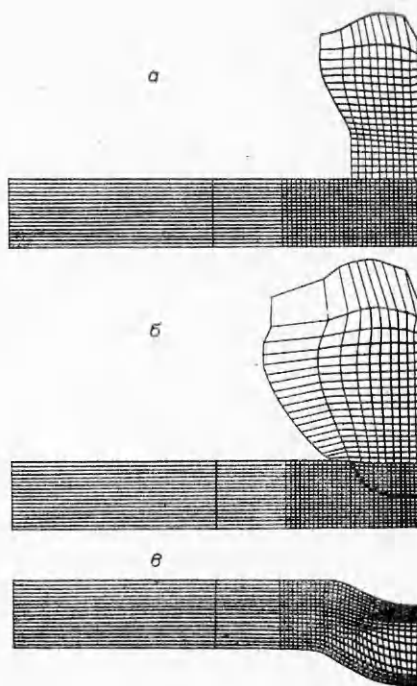


Рис. 2. Система заряд ВВ — плита в моменты времени 2,4 (а), 4 (б) и 16 (в) мкс (точками отмечена граница зоны, где произошел фазовый переход).

Для контроля точности физической модели расчетные данные сравнивались с результатами эксперимента по разрушению диска из армо-железа детонацией цилиндрического заряда ВВ. Верхняя часть заряда на 1/3 высоты заменялась прессованным гексогеном, что обеспечивало полноту детонации заряда. На рис. 5 приведена фотография сохраненного образца.

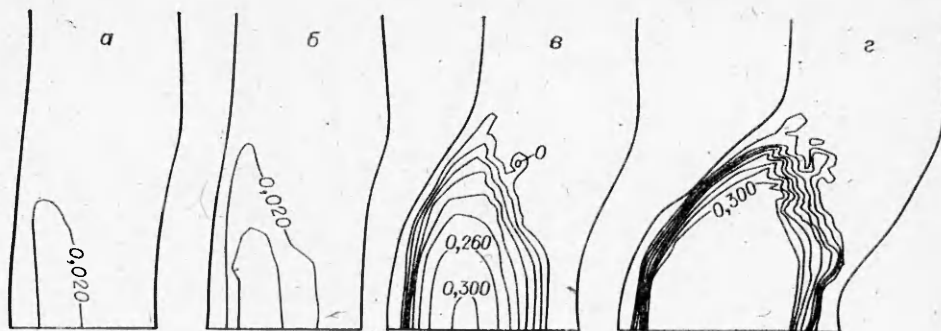


Рис. 4. Изолинии удельного объема трещин на моменты времени 6,4 (а), 8 (б), 16 (в) и 28,8 (г) мкс. Расчет проводился без учета упрочнения и разупрочнения.

Основное качественное отличие результатов эксперимента от расчетных заключается в том, что наблюдается полное отделение откольной пластины от образца и образование отверстия на оси под зарядом ВВ. Ясно, что в принятой модели упругопластического поведения и разрушения материала воспроизвести в расчете эти эффекты невозможно, так как в приповерхностных слоях растягивающие напряжения в радиальном направлении не превышают предела текучести материала, который по величине меньше «предела прочности» σ_c . С другой стороны, известно, что в процессе пластического деформирования материал упрочняется и его предел текучести возрастает. Известно также [14], что предел прочности материала понижается с увеличением суммарной пластической деформации. Для описания этих эффектов используемые модели пластической деформации и разрушения были модифицированы. Предполагалась линейная зависимость предела текучести от интенсивности пластической деформации

$$\sigma_T = \sigma_T^0 (1 + c_i \varepsilon_i^p).$$

Параметр упрочнения c_i оценивался по приведенным в [15] результатам испытаний на растяжение стержней из армко-железа. Зависимости «предела прочности» от величины пластической деформации принималась в виде

$$\sigma_c = \frac{\sigma_{c0}}{1 + k_i \varepsilon_i^p},$$

где $\sigma_{c0} = 1,55$ ГПа для армко-железа. Параметр разупрочнения брался таким, чтобы при указанной в [15] величине остаточной деформации образца величина σ_c становилась равной истинному напряжению отрыва S_k . Полученные таким образом значения коэффициентов составили: $c_i = 2$, $k_i = 0,13$.

На рис. 6 приведены полученные в результате расчета с модифицированными моделями упругопластической деформации и разрушения изолинии объема трещин в образце на заключительных стадиях разрушения. Внесенные изменения привели к развитию разрушения на периферийной части откольной пластины и затем в прилегающей к заряду центральной области образца. Таким образом, расчет с модифицированными моделями пластической деформации и разрушения воспроизводит

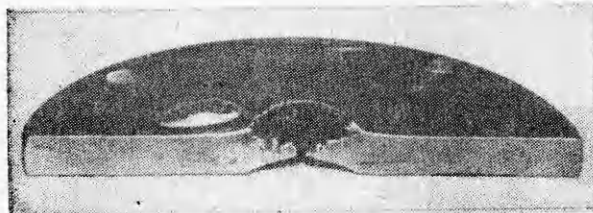


Рис. 5. Разрушение плиты.

все качественные особенности экспериментально наблюдаемых разрушений образца. И в расчете, и в эксперименте максимальный диаметр области разрушений незначительно превышает диаметр заряда. В эксперименте от-

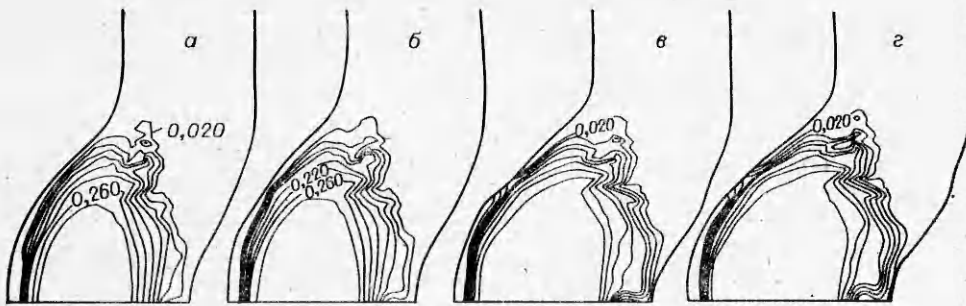


Рис. 6. Изолинии удельного объема трещин на моменты времени 22,4 (а), 24 (б), 28,8 (в) и 30,4 (г) мкс. Расчет проводился с учетом упрочнения и разупрочнения.

кольчатая пластина имела в плане неправильную форму и размеры меньше диаметра откольной выемки в образце, что связано с разрушением ее периферийной части. Отделение откольной пластины сопровождается в расчете развитием радиальных колебаний.

На рис. 7 показаны профили осевой составляющей $u_x(t)$ скорости свободной тыльной поверхности образца. Расчет воспроизводит колебания скорости поверхности, связанные с отколом в образце, причем в полном соответствии с местной толщиной откольной пластины частота этих колебаний на периферийной части откольной пластины выше. До отделения откольной пластины наблюдается неуклонное падение величины u_x во всех трех точках. Развитие «поперечного» разрушения в откольной пластине приводит к установлению постоянной скорости в центральной ее части и резкому усилению торможения остающейся, связанной с обрывом части откольной пластины.

Представляет интерес вопрос о влиянии фазового перехода на динамику процесса высокоскоростного деформирования образца. В работе [16] отмечалось, что численное моделирование высокоскоростного удара по образцу нейлоновым шариком без учета фазового перехода дает существенно меньшую степень разрушения образца, чем расчет с учетом перехода. Вообще говоря, естественно было бы ожидать обратного, поскольку фазовый переход ускоряет затухание ударных волн [13]. В связи с этим проведен расчет процесса взрывного нагружения образца детонацией заряда ВВ, постановка которого отличалась от предыдущего случая только тем, что величина порогового давления принята недостижимо большой. На рис. 3, 2 показан профиль осевого напряжения $\sigma_{xx}(t)$ в этом случае. Небольшие колебания напряжения в разгрузочной части имеют счетный характер. Форма профиля напряжения близка к треугольной, что и следовало ожидать для вещества с нормальной сжимаемостью.

На рис. 8 иллюстрируется развитие разрушения. При расчете без учета фазового перехода картина разрушения значительно отличается от результатов аналогичного расчета с учетом фазового перехода. Область разрушения смещается к тыльной поверхности образца, уменьшается толщина откольной пластины и увеличивается степень разрушения ее периферийной части. При этом примыкающая к заряду область образца остается неразрушенной.

Анализировались изолинии осевой составляющей скорости частиц образца для трех рассматриваемых случаев на момент времени 28,8 мкс. Для образца без фазового перехода движение примыкающей к заряду части образца к данному моменту времени практически прекратилось. Следовательно, ее разрушение в даль-

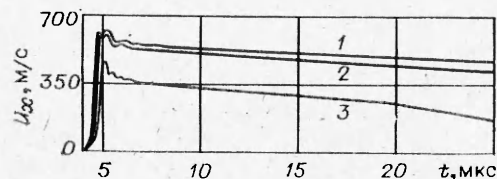


Рис. 7. Профили осевой составляющей $u_x(t)$ скорости свободной тыльной поверхности образца в центральной его части (1) и на расстояниях 4 (2) и 9,5 (3) мм от оси.

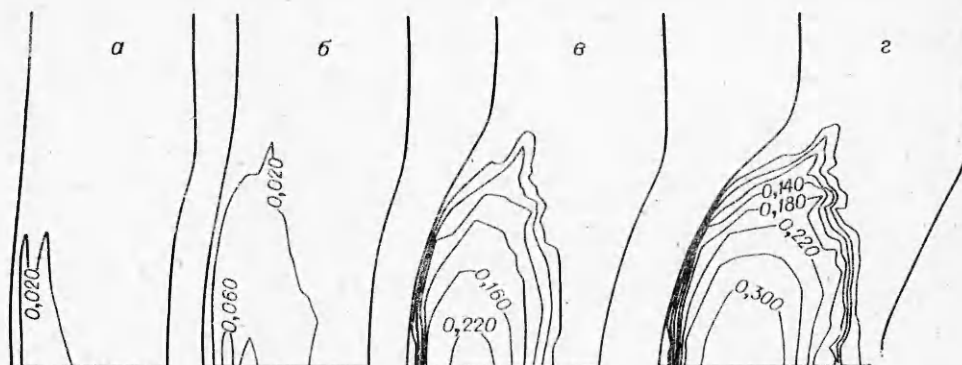


Рис. 8. Изолинии удельного объема трещин на моменты времени 6,4 (а), 8 (б), 16 (в), 24 (г) мкс. Расчет проводился без учета фазового перехода.

нейшем невозможно. В остальных двух случаях наблюдается «вышибание пробки» малого радиуса под зарядом в центре образца.

Выводы

1. Численное моделирование нагружения железной плиты взрывом показало, что предложенное для расчета разрушения простое кинетическое соотношение обеспечивает реалистическое описание процесса разрушения.

2. Детальное описание разрушения может быть достигнуто лишь с учетом влияния величины деформации на прочностные свойства материала.

3. Показано, что протекание обратимого полиморфного превращения в материале образца существенным образом влияет на характер его разрушения взрывом.

Авторы выражают глубокую благодарность Ф. И. Дубовицкому за постановку задачи и поддержку исследований и М. Ф. Иванову за помощь в работе.

Поступила в редакцию 18/IX 1981,
после доработки — 4/VI 1982

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Самарский, Ю. П. Понов. Разностные методы решения задач газовой динамики. М.: Наука, 1980.
2. Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 1967.
3. Высокоскоростные ударные явления. М.: Мир, 1973.
4. Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.
5. С. W. Hirt, A. A. Amsden, J. L. Cook. J. Comp. Phys., 1974, 14, 3, 227.
6. В. В. Жаровцев. ЖВМ и МФ, 1977, 17, 5, 1320.
7. М. Л. Уилкинс.— В кн.: Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 1967.
8. А. В. Каширский, Ю. В. Коровин, Л. А. Чудов.— В кн.: Вычислительные методы и программирование. Вып. 19. М.: МГУ, 1972.
9. А. Н. Дремин, С. Д. Савров и др. Детонационные волны в конденсированных средах. М.: Наука, 1970.
10. А. В. Ананьин, А. Н. Дремин, Г. И. Канель. ФГВ, 1981, 17, 3.
11. Т. В. Varbee, L. Seaman e. a. J. Materials, 1972, 7, 3, 393.
12. Г. И. Канель, В. В. Щербань. ФГВ, 1980, 16, 4, 93.
13. А. В. Ананьин, А. Н. Дремин, Г. И. Канель. ФГВ, 1973, 9, 3, 437.
14. В. В. Новожилов, О. Г. Рыбакина. МТТ, 1966, 5, 103.
15. А. П. Ващенко. Проблемы прочности, 1978, 1, 87.
16. L. D. Bertholf, L. D. Vuxton e. a. J. Appl. Phys., 1975, 46, 9, 3776.