

УДК 620.178.7

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ ПРИ ВЫХОДЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ НА ПРОФИЛИРОВАННУЮ СВОБОДНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

В. А. Огородников, А. Л. Михайлов, А. В. Романов,
А. А. Садовой, С. С. Соколов, О. А. Горбенко

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
607190 Саров
E-mail: root@gdd.vniief.ru

Рассмотрена задача о выходе ударной волны с амплитудой на фронте около 30 ГПа на профилированную свободную поверхность образца из алюминия. Показано, что в случае достаточно больших возмущений (амплитуда 1 мм, длина волны 10 мм) на свободной поверхности имеют место струйные течения. Полученные данные описаны с использованием кинетической модели разрушения, учитывающей зарождение и развитие повреждений материала за счет действия растягивающих напряжений и сдвиговых деформаций.

Ключевые слова: ударная волна, свободная поверхность, возмущения, струйные течения, растягивающее напряжение, сдвиговые деформации.

При нормальном падении ударной волны (УВ) на свободную поверхность (СП) образца из конденсированного материала, которая не имеет макроскопических особенностей, может наблюдаться ряд эффектов, обусловленных отклонением скорости ее движения от закона удвоения, дисперсией скорости, выбросом частиц (“пылением”) с СП [1–3]. Однако СП может иметь и макроскопические особенности в виде дефектов, специально выполненных конических или полусферических выемок и присоединенных масс или некоторый профиль, например, синусоидальной формы с амплитудой a и длиной волны λ , существенно превышающими аналогичные величины, характерные для микрорельефа СП. Появление микронеровностей обусловлено чистотой обработки ($a \gg R_z$, $\lambda \gg R_z$, где R_z — высота микронеровностей поверхности). Падение УВ на СП с дефектами, выемками и присоединенными массами сопровождается выбросом кумулятивных потоков частиц [4–6], усложняя тем самым численное моделирование и прогнозирование процессов фрагментации и диспергирования элементов конструкций при их ударно-волновом нагружении. Процессы на профилированной СП при выходе на нее УВ, особенно при $\lambda \gg a \gg R_z$, изучены недостаточно.

В данной работе представлены новые экспериментальные и расчетные результаты исследования формирования и развития возмущений на СП образцов из алюминиевого сплава марки АМц, имеющей синусоидальную форму с начальной амплитудой $2a = 1$ мм и длиной волны $\lambda = 10$ мм, при выходе на нее УВ интенсивностью 30 ГПа. Схема экспериментов приведена на рис. 1.

Цилиндрический заряд взрывчатого вещества (ВВ) диаметром 120 мм и высотой 60 мм инициировался генератором плоской УВ, который обеспечивал “разновременность” прихода УВ в образец не более 50 нс. На СП исследуемого образца в виде пластины раз-

назначена для численного решения двумерных задач механики сплошной среды, в частности, для математического моделирования формирования и развития возмущений на нерегулярных многоугольных лагранжевых сетках. Расчеты проводились с учетом упругопластических свойств исследуемого образца. Для описания процессов зарождения и развития повреждений материала при ударно-волновом воздействии использовалась кинетическая модель разрушения [9, 10], описывающая зарождение и развитие повреждений и дальнейшее разрушение материала под действием растягивающих напряжений и сдвиговых деформаций. Целью данных расчетов являлась оценка границ применимости кинетической модели для описания развития разрушения образца с заданным начальным профилем, подвергнутого ударно-волновому воздействию, а также выяснение влияния варьируемых параметров на формирование и развитие возмущений.

В используемой кинетической модели введены два параметра, характеризующие скорость накопления дефектов при сдвиговых деформациях и предельную сдвиговую деформацию, при превышении которой начинается разрушение образца. В модели используется уравнение состояния поврежденного материала и учитываются зависимости динамического предела текучести и коэффициента динамической вязкости от поврежденности среды. Кроме того, последовательно учитываются диссипативные потери, обусловленные наличием прочности и вязкости поврежденного материала, а также разрушением на адиабатических полосах сдвига. Разрушение может происходить за счет механизма вязкопластического развития пор на растягивающих напряжениях (вязкопластическое разрушение) или за счет пластических сдвиговых деформаций (хрупкое разрушение).

Расчеты проводились по схеме, представленной на рис. 1. При расчете детонации использовалась модель Чепмена — Жуге с контролем скорости распространения детонации, при описании продуктов взрыва — уравнение состояния в форме уравнения Зубарева [11], при описании свойств сплава — уравнение состояния Ми — Грюнайзена

$$p = p_x + p_T.$$

Здесь p — полное давление; p_x , p_T — холодное и тепловое давление соответственно:

$$p_x = \frac{\rho}{n} c_0^2 \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^n - 1 \right], \quad p_T = \Gamma \rho (E - E_x),$$

ρ , ρ_0 — текущая и начальная плотности; c_0 — скорость звука; n — константа; $\Gamma = \gamma - 1$ — коэффициент Грюнайзена; γ — показатель адиабаты; E — энергия. Использовались следующие значения параметров в уравнении состояния: $\rho_0 = 2,7 \text{ г/см}^3$, $c_0 = 5,5 \text{ км/с}$, $\gamma = 2,33$, $n = 5,5$. Для данного типа задач существенным является правильное описание профиля УВ. На недостаточно подробной сетке фронт УВ получается размазанным, поэтому для корректного описания необходимо использовать большее число точек.

В используемой модели разрушения, как и в [9], предполагается, что при пластическом разрушении дефекты (поры) имеют сферическую форму. Их распределение по размерам описывается формулой

$$N(R) = N_0 \exp(-R/R_0),$$

где $N(R)$ — количество дефектов с размером, большим R_0 ; N_0 — общее количество пор в единице объема; R_0 — параметр распределения пор; R — размер пор. Зарождение и увеличение пор происходит под действием растягивающих напряжений.

Дифференциальное уравнение изотропного вязкопластического разрушения, описывающее две его стадии — образование и рост микроповреждений (при достижении отрицательного порогового давления происходит рост микроповрежденностей, а при достижении им определенной величины начинается образование новых пор), можно представить в виде

$$\frac{d\omega}{dt} = 8\pi \dot{N}_0 R_0^3 \exp\left(-\frac{p_s - p_h}{p_1}\right) H(p_s - p_h) + 3\omega \frac{p_s - p_{g0}}{4\eta} H(p_s - p_{g0}),$$

где ω — степень поврежденности материала под действием растягивающих напряжений; \dot{N}_0 — скорость зарождения пор; p_s — давление в твердой фазе; p_h — пороговое давление, при достижении которого начинается образование новых пор; p_1 — давление, определяющее скорость зарождения пор при наличии растягивающих напряжений; p_{g0} — отрицательное пороговое давление, при достижении которого наблюдается рост микроповрежденностей; $H(p_s - p_h)$, $H(p_s - p_{g0})$ — единичные функции Хевисайда; η — вязкость материала.

При достижении критической поврежденности ω_0 состояние материала переходит в стадию слияния микродефектов и образования трещин. Материал перестает сопротивляться расширению, т. е. происходит его разрушение. Если поврежденная среда начинает сжиматься, то наступает необратимая объемная деформация разрушенного материала. Уравнение кривой компактирования принимает вид

$$\omega(p) = \omega_0(1 - p/p_k)^2,$$

где ω_0 — предельный уровень поврежденности материала, ниже которого в разрушенном материале начинает проявляться прочность на сжатие; p_k — давление компактирования. При сжатии может произойти полное компактирование до $\omega = 0$, и далее сжатие соответствует адиабате сплошного материала.

Уравнение состояния поврежденной среды, так же как в модели NAG [9], записывается в виде

$$p(\rho, E, \omega) = (1 - \omega)p_s\left(\frac{\rho}{1 - \omega}, E_s\right),$$

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

Кинетическое уравнение для накопления меры поврежденности α за счет сдвиговых напряжений используется в виде

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

где C , S_u^* — параметры модели для конкретного материала; $S_u = \sqrt{S_{ij}S_{ij}}$ — интенсивность девиатора напряжений; $S_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma\delta_{ij}$; σ — среднее давление; σ_{ij} — тензор напряжений; δ_{ij} — символ Кронекера; $H(\alpha)$ — единичная функция Хевисайда.

При накоплении повреждений в данной модели происходит изменение свойств среды по следующим зависимостям:

- для объемного модуля сжатия $K = K_s(1 - \omega)$;
- для модуля сдвига $G = G_s(1 - \omega)(1 - \alpha)$;
- для вязкости $\eta = \eta_s(1 - \omega)(1 - \alpha)$;
- для предела текучести $Y = Y_s(1 - \omega)(1 - \alpha)$.

В методике ДМК рассчитывается также мера повреждаемости β за счет сдвиговых деформаций:

$$\dot{\beta} = c_n(\varepsilon_p - \varepsilon_0)/[(1 - \omega)(1 - \beta - \alpha)].$$

Здесь c_n , ε_0 — параметры модели для конкретного материала, характеризующие скорость развития разрушения и предельную деформацию, соответствующую началу процесса разрушения в ячейке; ε_p — предельное значение деформации.

Разрушение в результате сдвига начинается в области пластических деформаций при достижении предельного значения деформации. Разрушение может продолжаться и в об-

Таблица 1

Количество точек в расчетах и значения предела текучести алюминия

Вариант расчета	Количество точек		Y_s , ГПа
	Алюминий	ВВ	
1	248 228	82 203	0,26
2	248 228	186 277	0,26
3	248 228	20 782	0,50
4	248 228	20 782	0

Таблица 2

Параметры для расчета изотропного вязкопластического разрушения

Вариант расчета	p_1 , ГПа	η , Па·с
1	0,04	200
2	0,04	200
3	0,02	300
4	0,02	300

Таблица 3

Параметры для расчета сдвигового разрушения и компактирования

Вариант расчета	ρ_0 , г/см ³	c_n , км/с	ε_0	p_k , ГПа	G_s , ГПа
1	2,7	10,4	0,05	10	27
2	2,7	10,4	0,05	—	27
3	2,7	20,4	0,05	—	27
4	2,7	20,4	0,05	—	27

Примечание. Для всех вариантов расчета $\rho_0 = 2,7$ г/см³, $\omega_0 = 0,5$, $N_0 = 0,3$ см³/с, $R_0 = 10^{-4}$ см, $p_{h0} = 0,3$ ГПа, $p_{g0} = 0,2$ ГПа.

ласти упругих деформаций. При накоплении повреждений в данной модели происходит изменение свойств среды по следующим зависимостям:

- для объемного модуля сжатия $K = K_s(1 - \omega)$;
- для модуля сдвига $G = G_s(1 - \omega)(1 - \beta - \alpha)$;
- для вязкости $\eta = \eta_s(1 - \omega)(1 - \beta - \alpha)$;
- для предела текучести $Y = Y_s(1 - \omega)(1 - \beta - \alpha)$.

Расчеты (варианты 1–4) выполнены для четырех наборов параметров, значения которых приведены в табл. 1–3. Во всех расчетах полагалось, что инициирование заряда ВВ происходит по его наружной поверхности. В варианте 1 принято $p_k = 10$ ГПа, а варианты 2–4 проведены без учета компактирования.

На рис. 3 приведены результаты одного из расчетов (вариант 1), соответствующие состоянию образца вблизи профилированной поверхности в различные моменты времени. При выходе УВ на СП формируется волна разгрузки, распространяющаяся в глубь образца, что приводит к появлению растягивающих напряжений и формированию очагов разрушения под их действием. На СП профилированного образца разгрузка начинается в разные моменты времени, что вызывает появление сдвиговых деформаций. В результате происходит усиление разрушения по обоим механизмам в силу нелинейности процессов и постепенное развитие зон разрушения в локальных областях образца, обусловленное растягивающими и сдвиговыми напряжениями. Представленные на рис. 3 данные позволяют проследить динамику зарождения, развития и слияния зон поврежденности, обусловленных “разнодинамичностью” ударно-волновой нагрузки. Профиль волны разгрузки в момент времени $t = 10$ мкс показан на рис. 3,а. К этому моменту в образце формируются очаги растягивающих напряжений (рис. 3,б), а сдвиговые деформации пока отсутствуют (рис. 3,в), степень поврежденности $\beta < 10^{-2}$. В более поздние моменты времени

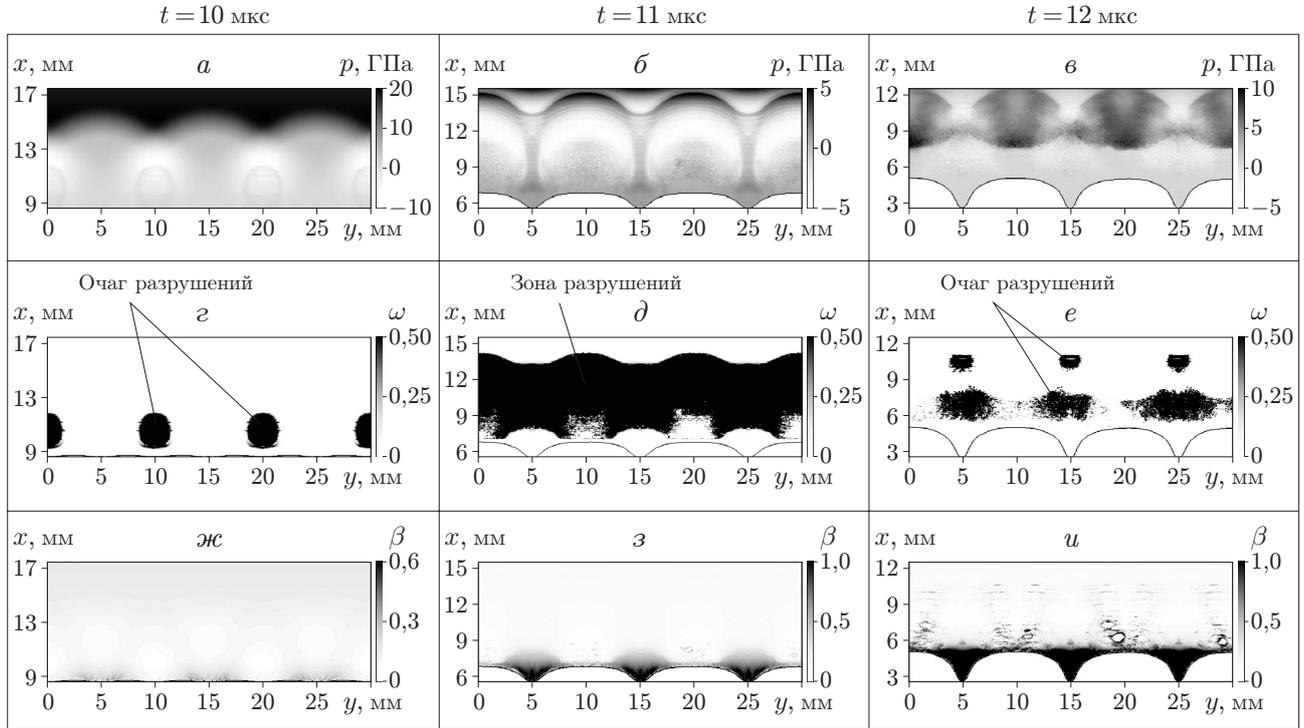


Рис. 3. Состояние образца в различные моменты времени (расчет):

a–в — распределение давления в сечении образца; *г–е* — распределение поврежденности в образце за счет растягивающих напряжений; *ж–и* — распределение поврежденности в образце за счет сдвиговых деформаций

$t = 11, 12$ мкс в результате сложного взаимодействия ударных волн и волн разгрузки на СП образца в областях первоначальных вогнутостей образуются кумулятивные струи (рис. 3, *б, в*), внутри образца появляется область разрушения за счет растягивающих напряжений (рис. 3, *д*), сдвиговые деформации накапливаются в окрестности границы свободной поверхности вблизи первоначальных вогнутостей (рис. 3, *з*), степень поврежденности за счет сдвиговых деформаций достигает предельного значения $\beta = 1$. К моменту времени $t = 12$ мкс зоны разрушения, обусловленного растягивающими напряжениями, значительно уменьшаются за счет компактирования и имеют очаговый характер (рис. 3, *е*), а сдвиговые напряжения достигают максимального значения (рис. 3, *и*).

Формирование и развитие локальных очагов разрушения при численном моделировании зависит от выбранных значений параметров модели. На рис. 4 приведены расчетные зависимости приращения длины струи L от времени t в области начальной вогнутости СП без учета компактирования разрушенного материала (варианты 2–4) и с учетом компактирования при $p_k = 10$ ГПа (вариант 1). Учет компактирования приводит к увеличению длины струи на 5 %. Исследовалось также влияние предела текучести на расчетные параметры струи. Увеличение предела текучести в два раза: с 0,26 до 0,50 ГПа (вариант 3) приводит к уменьшению длины струи на 15 %. Расчет в гидродинамическом приближении при $Y_s = 0$ (вариант 4) приводит к увеличению длины струи по сравнению с вариантом 3 на 20 %. В вариантах 3 и 4 скорость развития сдвигового разрушения была увеличена примерно в два раза. При этом расчетные параметры струи изменились незначительно (менее чем на 1 %).

Анализ всех проведенных численных расчетов показывает, что наибольшее влияние на параметры струи оказывают давление компактирования и предел текучести материала.

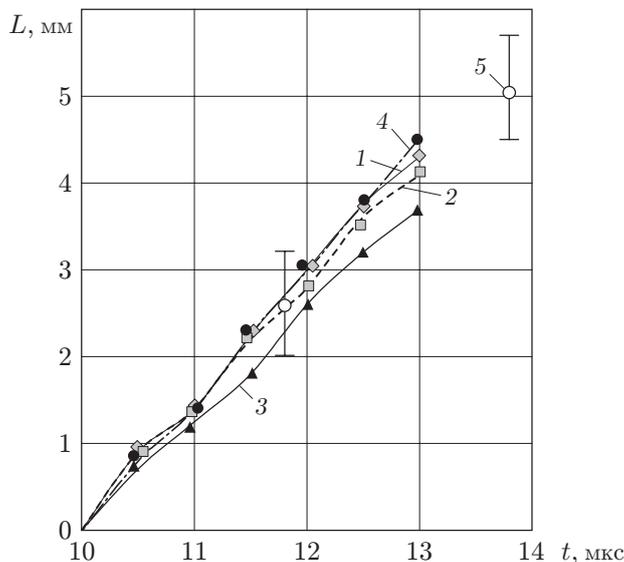


Рис. 4. Расчетная зависимость длины струи от времени при различных параметрах модели разрушения:

1, 2, 3, 4 — варианты 1, 2, 3, 4 в табл. 2, 3; 5 — экспериментальные данные

Значительно более слабое влияние на расчетные параметры струи оказывают параметры сдвигового разрушения, эффективная вязкость и давление, определяющее скорость зарождения пор при наличии растягивающих напряжений. Отметим, что основные параметры кинетической модели разрушения подбирались при описании большой серии газодинамических экспериментов (см. [3, 4, 9, 10] и др.).

На рис. 4 приведены также экспериментальные данные, полученные при обработке рентгенограмм (см. рис. 2). Сравнение результатов численных расчетов, проведенных с использованием методики ДМК, с экспериментальными данными свидетельствует о работоспособности кинетической модели разрушения [10], позволяющей описывать развитие возмущений на СП синусоидальной формы с учетом разрушений за счет растягивающих напряжений в областях с начальными выпуклостями и сдвиговых деформаций в областях с начальными вогнутостями. Полученные результаты указывают на возможность более детального моделирования процессов ударно-волнового разрушения, фрагментации и диспергирования материала элементов конструкции [12], особенно в ближней зоне действия взрыва.

Результаты проведенного моделирования выхода УВ на профилированную СП синусоидальной формы при $a \gg R_z$, $\lambda \gg R_z$ показали, что качественная картина процесса такая же, как и в случае $a \approx R_z$, $\lambda \approx R_z$, характеризующемся наличием струйных течений из областей с начальными вогнутостями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б. Физика ударных волн и высокотемпературных гидромеханических явлений / Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. М.: Физматгиз, 1963.
2. Диванов А. К., Мещеряков Ю. И., Фадеев Л. П. О распределении частиц по скоростям на упругом предвестнике волны сжатия в алюминии // Журн. техн. физики. 1983. Т. 53, № 10. С. 2050–2054.

3. **Огородников В. А., Иванов А. Г., Михайлов А. Л. и др.** О выбросе частиц со свободной поверхности металлов при выходе на нее ударной волны и методах диагностики этих частиц // Физика горения и взрыва. 1998. Т. 34, № 6. С. 103–107.
4. **Огородников В. А., Иванов А. Г., Крюков Н. И.** Ударно-волновое диспергирование конструкционных материалов // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 5. С. 122–126.
5. **Иванов А. Г., Кочкин Л. И., Огородников В. А. и др.** Особенности разгона пластин скользящей ДВ при наличии присоединенной или сосредоточенной массы // Физика горения и взрыва. 1990. № 5. С. 127–129.
6. **Тришин Ю. А.** Физика кумулятивных процессов. Новосибирск: Ин-т гидродинамики, 2005.
7. **Дреннов О. Б., Михайлов А. Л., Огородников В. А.** О задании и эволюции локальных (периодических) возмущений в экспериментах по исследованию неустойчивости Рэлея — Тейлора в средах с прочностью // ПМТФ. 2000. Т. 41, № 2. С. 171–176.
8. **Соколов С. С.** Метод расчета двумерных нестационарных упругопластических течений на нерегулярных многоугольных лагранжевых сетках // Вопр. атом. науки и техники. Сер. Мат. моделирование физ. процессов. 2004. Вып. 4. С. 62–80.
9. **Seaman L., Curran D. R., Shockey D. A.** Computational models for ductile and brittle fracture // J. Appl. Phys. 1976. V. 47, N 11. P. 4814–4826.
10. **Соколов С. С., Садовой А. А., Чайка Т. И.** Математическое моделирование формирования высокоскоростных компактных металлических элементов // Вопр. атом. науки и техники. Сер. Мат. моделирование физ. процессов. 2004. Вып. 3. С. 54–61.
11. **Жерноклетов М. В., Зубарев В. Н., Телегин Г. С.** Изэнтропы расширения продуктов взрыва конденсированных ВВ // ПМТФ. 1969. № 4. С. 127–132.
12. **Михайлов А. Л., Огородников В. А., Хохлов Н. П. и др.** Взрывное разрушение, фрагментация и диспергирование конструкционных материалов // Хим. физика. 2001. № 8. С. 73–79.

*Поступила в редакцию 28/XII 2005 г.,
в окончательном варианте — 10/III 2006 г.*
