

ВЛИЯНИЕ ПОЛИМОРФНЫХ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ НА ПРОЦЕСС ВЗРЫВНОГО ОБЖАТИЯ СТАЛЬНЫХ ШАРОВ

УДК 539.3

Н. Н. Белов, А. А. Коняев, В. Г. Симоненко, А. Л. Стуканов,
М. В. Хабибуллин, Н. Т. Югов

НИИ прикладной математики и механики при Томском
государственном университете, 634050 Томск

В рамках модели пористой упругопластической среды, матрица которой при деформировании испытывает полиморфные фазовые превращения, численно исследовано влияние полиморфного фазового превращения на структуру волн напряжений и на разрушение стальных шаров при обжатии их сферически сходящимися ударными волнами. Проведено сравнение результатов расчета с имеющимися в литературе экспериментальными данными.

Основная трудность численного моделирования поведения веществ в условиях высокоскоростного удара и взрыва состоит в построении определяющих уравнений, адекватно описывающих процесс в широком диапазоне изменения термодинамических и кинематических параметров — напряжений, деформаций, скоростей деформаций, температур и т. д. Это вызвано неопределенностью значений термодинамических и реологических констант материалов, необходимых для корректной формулировки модели. Хорошей основой для проверки и уточнения существующих и разработки новых физических и математических моделей поведения веществ в экстремальных условиях служат эксперименты по взрывному обжатию шаров из различных материалов сходящимися к центру ударными волнами (УВ).

Явление неограниченной кумуляции энергии в плоских и сферических сходящихся УВ систематически рассмотрены в работе [1]. Там же сформулирована гипотеза об ограниченности кумуляции энергии во фронте сферически сходящейся волны в среде с фазовыми превращениями. С использованием упрощающих предположений в [1] получены аналитические решения задачи о фокусировке в стальном шаре только упругого или только фазового предвестника. Результаты сравнительных экспериментальных и расчетных исследований поведения и свойств α - и γ -фазных сталей, а именно: упругопластических свойств, фазовых превращений и откольных разрушений железа в различных фазовых состояниях, а также их влияние на динамику сжатия и на разрушение стальных шаров в волнах напряжений различного масштаба и интенсивности рассмотрены в [2–4]. На основе этих данных проведено тестирование модели пористой упругопластической среды, матрица которой при деформировании испытывает полиморфное фазовое превращение [5, 6], и моделей отрывного [6, 7] и сдвигового разрушений [5].

Отрывное разрушение в материале рассматривается как процесс роста и слияния микропор в пластически деформированном материале под действием растягивающих напряжений. Локальным критерием разрушения служит предельная величина относительного объема пустот ξ^* (для стали 12X18H10T $\xi^* = 0,3$, для стали марки Ст.3 $\xi^* = 0,11$). Пороговым пределом для развития сдвигового разрушения является критическая величина удельной работы пластических деформаций A_p^* . При выполнении данного условия счита-

ется, что ортогонально максимальному главному напряжению образуется трещина сдвига, раскрытие которой происходит под действием растягивающих напряжений. Поведение поврежденного трещиной материала описывается приведением напряженного состояния к такому виду, при котором отсутствуют нормальные напряжения поперек трещины [8]. И в этом случае локальным критерием разрушения является предельная величина относительного объема пустот ($\xi_1^* = 0,1$). Разрушенный материал перестает сопротивляться растяжению и описывается как порошок, движение которого происходит в соответствии с уравнениями среды, лишенной напряжений. Относительное содержание пустот при этом определяется из уравнения состояния пористого вещества с нулевым давлением в частицах. Аналогично ведет себя разрушенный материал и при сжатии, пока величина пористости превышает критическое значение. В противном случае решение задачи проводится в гидродинамическом приближении в рамках модели пористой среды для сыпучих материалов. Параметры моделей разрушения, за исключением A_p^* , определяются из сопоставления данных численного моделирования с экспериментальными результатами по соударению пластин различной толщины.

В рамках предложенной модели механики сплошной среды проводится расчет взрывного обжатия сферически сходящимися УВ шаров диаметром $d = 64$ и 184 мм из γ -фазной стали 12X18H10T и α -фазной стали марки Ст.3. Используемые в расчетах режимы нагружения соответствуют экспериментальным [2].

Для шара из стали 12X18H10T диаметром 64 мм расчет взрывного обжатия проводился как с учетом, так без учета внешней оболочки в рамках модели пористой упругопластической среды с постоянными (модель А) и переменными (модель Б) пределом текучести σ_s и модулем сдвига μ . В случае модели А $\sigma_s = 0,59$ ГПа, $\mu = 79$ ГПа; для модели Б

$$\sigma_s = (A\eta^2 + B\eta + C)^{-1}[1 - E/E_p(\eta)], \quad (1)$$

$$\mu = (A_1\eta^2 + B_1\eta + C_1)^{-1}[1 - E/E_p(\eta)], \quad (2)$$

где E — удельная внутренняя энергия; $E_p(\eta)$ — энергия плавления вещества; $\eta = \rho/\rho_0 - 1$ — сжимаемость материала матрицы; ρ — текущая плотность материала матрицы; ρ_0 — начальная плотность материала матрицы; $A = 4,372 \cdot 10^4$ ГПа $^{-1}$; $B = -5,254 \cdot 10^4$ ГПа $^{-1}$; $C = 1,667 \cdot 10^4$ ГПа $^{-1}$; $A_1 = -1,1846 \cdot 10^2$ ГПа $^{-1}$; $B_1 = -1,2487 \cdot 10^2$ ГПа $^{-1}$; $C_1 = 1,2283 \cdot 10^2$ ГПа $^{-1}$. Константы в зависимостях (1), (2) получены на основе обработки экспериментальных данных [9]. Уравнение кривой плавления можно найти в [10].

Исследовалось влияние прочностных характеристик материала на величину полости, образующейся в центре шара, и на изменение наружного диаметра шара. Результаты сравнения с экспериментом приведены в таблице. Здесь p_1 — максимальное давление на расстоянии 0,5 мм от центра шара; R_1 — радиус зоны плавления в момент фокусировки

Материал	d , мм	p_1 , ГПа	R_1 , мм	R_2 , мм		D , %		Модель среды
				эксперимент	расчет	эксперимент	расчет	
12X18H10T	64	493	3,3	11,46 ± 0,11	15,5	1,439 ± 0,001	5,0	А
12X18H10T	64	340	1,7	11,46 ± 0,11	13,5	1,439 ± 0,001	3,0	Б
12X18H10T	184	1220	7,3	37,5	41,7	2,21	2,9	Б
Ст.3	64	100	—	10,95 ± 0,08	9,5	1,064 ± 0,006	1,0	Б
Ст.3	184	96	—	29,7	32	1,06	1,0	Б

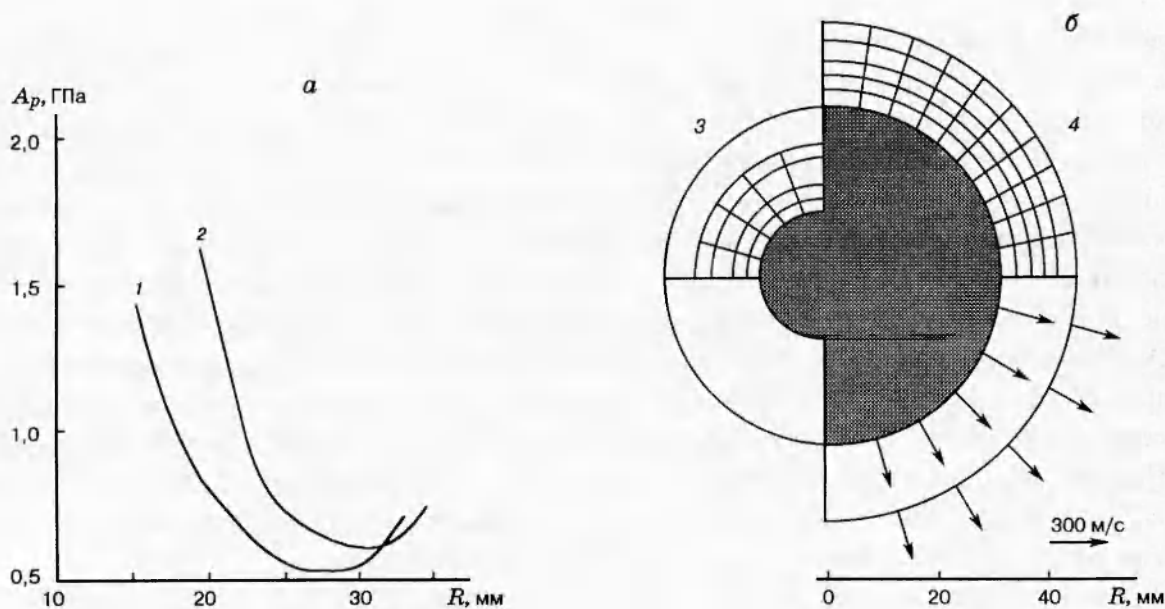


Рис. 1. Распределение удельной работы пластических деформаций вдоль радиуса шара (а) и сравнительная картина разрушения в шарах из стали 12Х18Н10Т диаметром 64 мм при взрывном обжатии в оболочке и без нее (б):

1, 3 — взрывное обжатие в оболочке; 2, 4 — без оболочки

УВ; D — деформация наружного диаметра шара; R_2 — радиус полости в центре шара. Наилучшее согласование экспериментальных данных с расчетом получено в рамках модели пористой упругопластической среды с переменными пределом текучести и модулем сдвига.

При выходе детонационного фронта на поверхность шара вглубь материала распространяется сходящаяся к центру УВ. Амплитуда УВ до момента времени $t = 3$ мкс уменьшается с 47 до 33 ГПа в результате взаимодействия с волнами упругопластической разгрузки, распространяющимися от поверхности шара. Затем вследствие сферической симметрии амплитуда растет. Фокусировка в центре шара падающей УВ происходит при $t = 5,7$ мкс. В рамках модели Б давление p_1 достигает значения 340 ГПа.

В окрестности центра шара радиусом 1,7 мм ударно-сжатый материал плавится. При решении задачи в рамках модели А максимальное давление составляет 493 ГПа, при этом радиус зоны плавления 3,3 мм.

На рис. 1, а представлены распределения удельной работы пластических деформаций вдоль радиуса шара в момент окончания расчета ($t = 81$ мкс). Видно, что материал шара, помещенного вместе с взрывчатим веществом в оболочку, в процессе взрывного обжатия испытывает меньшие пластические деформации, чем при обжатии без оболочки. За величину предельной работы пластических деформаций A_p^* принималось минимальное значение на кривой 2 ($A_p^* = 0,62$ ГПа). В обоих вариантах расчета максимальная величина A_p достигается у поверхности полости, образующейся в центре шара в процессе отрывного разрушения материала. Дальнейшее дробление шара в процессе взрывного обжатия без оболочки происходит вследствие образования полос сдвига на поверхности полости и их распространения вглубь материала. Аналогичный процесс разрушения в материале наблюдается при детонации взрывчатых веществ в полном цилиндре [11].

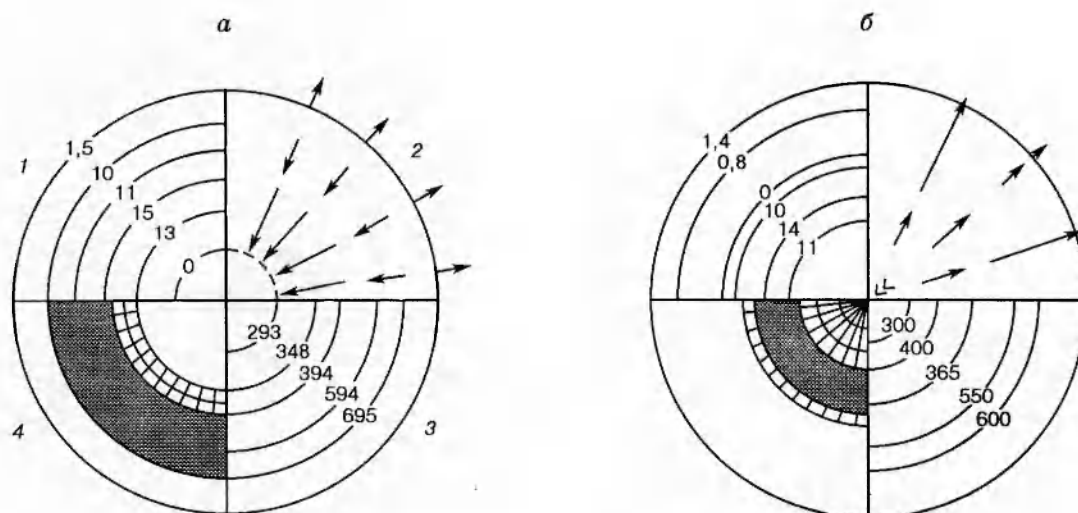


Рис. 2. Изобары (1), поля массовых скоростей (2), изотермы (3) и фазовые диаграммы (4) в два момента времени взрывного обжата в оболочке шара диаметром 64 мм из стали марки Ст.3:

t , мкс: а — 4; б — 8; единицы измерения — p , ГПа; T , К

Конечная картина деформации и разрушения приведена на рис. 1, б. Полость на рисунке затемнена, а область материала, в которой работа пластической деформации достигла предельной величины A_p^* , заштрихована. При обжате шара без оболочки происходит раскрытие трещин под действием растягивающих напряжений, что приводит к дроблению материала и его разлету. В шаре, обжате которого осуществлялось в оболочке, образовалась полость радиусом 13,5 мм. Радиус полости, полученный на основе численного моделирования, на 17% больше экспериментального. Радиус области, в которой выполнилось условие образования сдвигового разрушения, составляет 26 мм. Кроме этой области существует слой поврежденного сдвигом материала толщиной 1 мм у поверхности шара.

Процесс деформации шара в оболочке заканчивается к моменту времени 50 мкс. В расчете деформация наружного диаметра шара к моменту времени 80 мкс составила 3%, в то время как в эксперименте конечная деформация равна 1,439%. При обжате шара без оболочки продолжается разлет разрушенного трещинами сдвига материала. Причем чем ближе частицы разрушенного материала расположены к поверхности шара, тем большей скоростью они обладают (~ 300 м/с).

Более сложная волновая картина наблюдается в шарах из сталей, испытывающих полиморфные фазовые превращения. На рис. 2 представлены поля массовых скоростей, изобары, фазовые диаграммы и изотермы в два момента времени взрывного обжата в оболочке шара диаметром 64 мм из стали марки Ст.3. Области материала, находящегося в фазе высокого давления, затемнены, а в смеси фаз — заштрихованы. Распределения давления вдоль радиуса шара приведены на рис. 3. По ним можно судить о волновой картине процесса обжата и о фазовом состоянии материала.

Распространяющийся к центру шара ударный фронт имеет двухволновую структуру (без учета упругого предвестника). В первой пластической УВ (фазовом предвестнике) образуются и активируются зародыши фазы высокого давления; во второй происходит

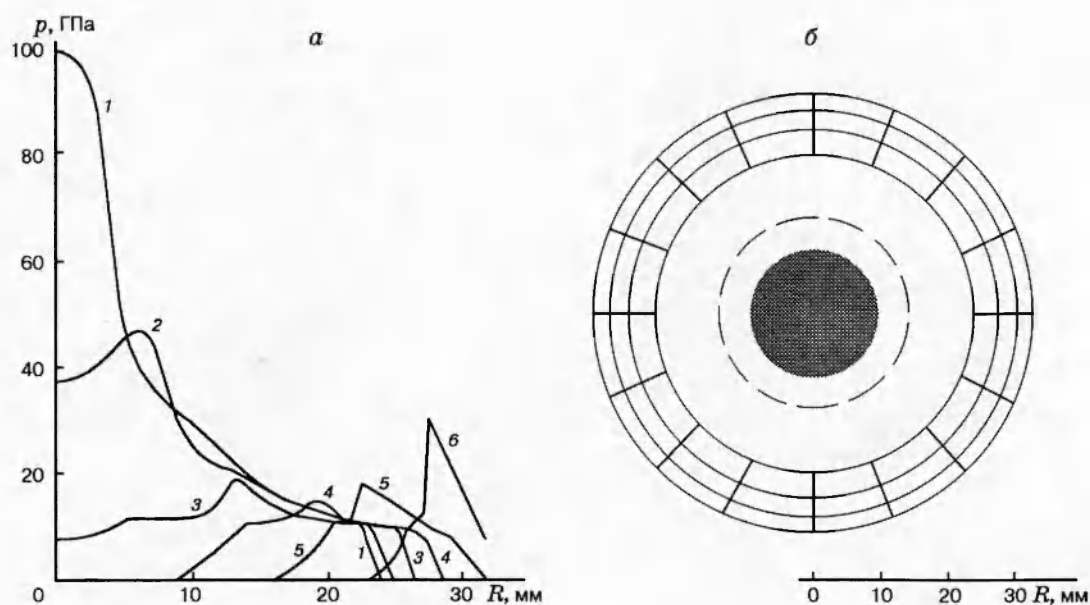


Рис. 3. Распределения давления вдоль радиуса в различные моменты взрывного обжатия в оболочке шара из стали марки Ст.3 диаметром 64 мм (а) и картина разрушения в нем в момент времени 81 мкс (б):

t , мкс: 1 — 6,5; 2 — 6; 3 — 5; 4 — 4; 5 — 3; 6 — 2

переход α -фазы в ϵ -фазу. В пластической волне разгрузки фаза высокого давления переходит в нестабильное состояние, и в ударной волне разрежения происходит переход в исходную α -фазу. В то время как амплитуда фазового предвестника остается постоянной ($p = 11,4$ ГПа), амплитуда второй пластической УВ с течением времени вначале уменьшается до 15 ГПа в результате действия волн разгрузки ($t = 4$ мкс), а затем растет вследствие сферической симметрии. При $t = 5$ мкс упругий предвестник достигает центра шара. В направлении поверхности шара распространяется расходящаяся от центра УВ, взаимодействующая с фазовым предвестником. При достижении фазовым предвестником центра шара происходит формирование расходящейся от центра пластической УВ, переводящей материал в фазу высокого давления.

Дальнейший процесс обжатия характеризуется взаимодействием этой волны с пластической УВ и волной пластической разгрузки, сходящимися к центру шара. Поэтому максимум на профиле давления в момент времени 6 мкс достигается на расстоянии 6 мм от центра шара. Если фокусировка УВ в шаре из аустенитной стали происходит при $t = 5,7$ мкс и на расстоянии 0,5 мм от центра давление достигает 340 ГПа, то в шаре из стали марки Ст.3 фокусировка второй пластической УВ происходит при $t = 6,5$ мкс, а давление на этом же расстоянии от центра равно лишь 100 ГПа. В то время как в шаре из аустенитной стали в радиусе 1,7 мм от центра материал находится в расплавленном состоянии, температура материала в окрестности центра шара из стали марки Ст.3 не превышает 800 К.

Сходящаяся к центру пластическая волна разгрузки после взаимодействия с расходящейся от центра УВ и фокусировки в центре шара распространяется в сторону его поверхности в виде расходящейся пластической волны разгрузки, которая переводит материал в окрестности центра шара из фазы высокого давления в нестабильное состояние. Расходя-

щаяся от центра УВ затем взаимодействуют с ударной волной разрежения. В результате ударно-сжатый материал разгружается сначала в пластической волне разгрузки, переводящей материал из фазы высокого давления в нестабильное состояние, а затем в ударной волне разрежения ($t = 8$ мкс). Взаимодействие двух встречных волн пластической разгрузки приводит к тому, что на расстоянии 10 мм от центра при $t = 9$ мкс материал разгружается до давления 5 ГПа. При этом он переходит в исходную α -фазу. В момент времени 9,7 мкс в результате взаимодействия ударной волны разрежения с волной разгрузки, распространяющейся от центра шара, на расстоянии 15 мм от центра образуется область растягивающих напряжений, в которой происходит интенсивный рост микродефектов, приводящий к образованию ($t = 10$ мкс) в этом сечении магистральной трещины.

Разрушение в окрестности центра шара начинается при $t = 10,5$ мкс и заканчивается при $t = 12$ мкс. К этому времени в окрестности центра шара радиусом 9,5 мм материал разрушается. В промежутке между полостью в центре шара и магистральной трещиной он поврежден лишь частично. В последующие моменты деформирования шара происходит залечивание магистральной трещины в результате расширения неразрушенного материала, находящегося между полостью и трещиной. Картина разрушения шара в момент окончания расчета ($t = 81$ мкс) приведена на рис. 3,б.

Область отрывного разрушения затемнена на рис. 3. Положение магистральной трещины помечено штриховой линией. В то же время как в аустенитной стали интенсивное сдвиговое разрушение начинается у поверхности полости, в Ст.3 оно образуется и распространяется вглубь материала с поверхности шара. Область материала, в которой величина работы пластических деформаций достигла предельного значения A_p^* , на рисунке заштрихована.

Данные компьютерного моделирования процессов взрывного обжатия шаров из стали марки Ст.3 диаметром 184 мм в оболочке и без нее приведены на рис. 4, 5, где представлены распределения давления вдоль радиуса в различные моменты времени. В основном волновая картина в шаре диаметром 184 мм при обжатии его в оболочке аналогична волновой картине в шаре диаметром 64 мм. Фокусировка второй пластической УВ, сходящейся к центру, происходит при $t = 18,7$ мкс; на расстоянии 0,5 мм от центра шара давление не превышает 100 ГПа, в то время как в аустенитной стали при фокусировке УВ его величина достигла 1220 ГПа при $t = 16,4$ мкс. Сравнительный анализ профилей давления, приведенных на рис. 4, 5, показывает, что до момента фокусировки второй пластической УВ, волновые картины процесса обжатия шара в оболочке и без нее в основном совпадают. Различие в деформировании шаров состоит лишь в том, что в первом случае давление в материале за ударной волной разрежения не равно нулю из-за действия продуктов детонации на поверхности шара. Во втором случае, начиная с $t \approx 6$ мкс, продукты детонации не оказывают влияния на процесс деформирования шара. Волновая картина различается лишь с момента времени 21 мкс, когда УВ в шаре, образованная на его поверхности в процессе выхода УВ, распространяющейся по продуктам детонации со стороны оболочки, догоняет фронт ударной волны разрежения ($t = 21$ мкс, см. рис. 4, 5).

При обжатии шара без оболочки взаимодействие УВ, расходящейся от центра, с ударной волной разрежения приводит к тому, что ударно-сжатый материал разгружается вначале в сходящейся к центру пластической волне разгрузки, а затем в ударной волне разрежения. Взаимодействие сходящейся и расходящейся волн пластической разгрузки приводит к тому, что при $t = 24$ мкс весь материал в радиусе 48 мм от центра шара находится в смеси фаз. Отрывное разрушение в материале начинается на расстоянии 42 мм от цен-

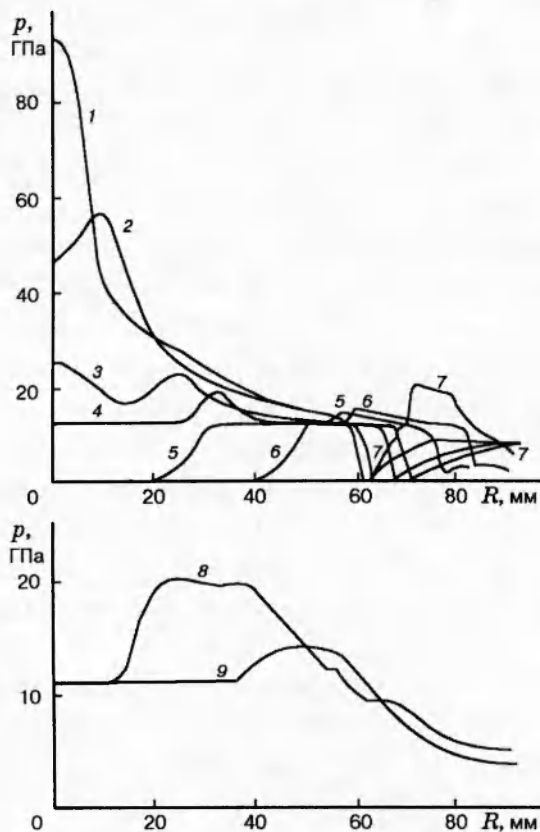


Рис. 4

Рис. 4. Распределения давления вдоль радиуса в различные моменты времени взрывного обжатия в оболочке шара из стали марки Ст.3 диаметром 184 мм:
 t мкс: 1 — 18,7; 2 — 18; 3 — 16; 4 — 15; 5 — 12; 6 — 9; 7 — 6; 8 — 21; 9 — 24

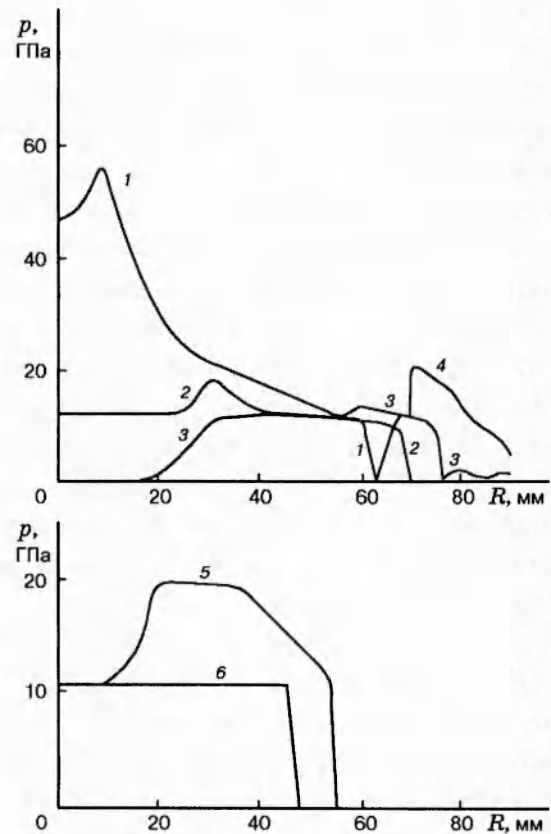


Рис. 5

Рис. 5. Распределения давления вдоль радиуса в различные моменты взрывного обжатия без оболочки шара из стали марки Ст.3 диаметром 184 мм:
 t , мкс: 1 — 18; 2 — 15; 3 — 12; 4 — 6; 5 — 21; 6 — 24

тра в момент времени 27 мкс вследствие интерференции ударной волны разрежения с не успевшей оформиться ударной волной разрежения, зарождающейся в результате взаимодействия сходящейся и расходящейся пластических волн разгрузки [5]. Полное разрушение шара происходит при $t = 102$ мкс, когда область пластического разрушения смыкается с областью разрушений, образующихся в результате интерференции встречных волн разгрузки.

При обжатии шара в оболочке при $t = 21$ мкс происходит взаимодействие ударной волны разрежения, распространяющейся к центру, и вторичной волны сжатия, распространяющейся от оболочки. В результате образуются распространяющаяся к центру волна сжатия и расходящаяся волна разгрузки. Поэтому в отличие от обжатия шара без оболочки, когда расходящаяся от центра УВ взаимодействовала с распространяющейся к центру ударной волной разрежения, в данном случае происходит интерференция двух встречных волн сжатия. Результат этого взаимодействия хорошо прослеживается на профиле давления (см. рис. 4, б) при $t = 24$ мкс.

При обжатии шара без оболочки к этому моменту времени уже не существовало области, в которой материал находился в фазе высокого давления, а была лишь область материала в окрестности центра шара радиусом 48 мм, где он был представлен смесью фаз.

Волновая картина при $t = 24$ мм характеризуется взаимодействием расходящихся от центра волны пластической разгрузки, переводящей материал из фазы высокого давления в нестабильное состояние, и УВ со сходящимися к центру волной сжатия и волной разгрузки.

В конечном итоге взаимодействие встречных волн разгрузки приводит к разрушению материала в окрестности центра шара, однако в отличие от обжатия без оболочки оно наступает значительно позднее. Радиус основной зоны разрушения 32 мм. Сравнение расчетных и экспериментальных данных представлено в таблице.

Сопоставление результатов математического моделирования с данными экспериментальных исследований позволяет сделать вывод о том, что рассмотренная математическая модель в основном описывает особенности процессов высокоскоростного деформирования и разрушения шаров из γ - и α -фазных сталей. При этом прочностные характеристики (предел текучести и модуль сдвига) не являются постоянными величинами, а зависят от внутренней энергии и сжимаемости.

Следует отметить также высокую информативность одномерных сферически симметричных взрывных экспериментов для целей калибровки и выбора взаимосогласованных моделей описания поведения и свойств веществ в волнах напряжений различного масштаба и интенсивности.

Авторы выражают благодарность Е. А. Козлову за постановку задачи, обсуждение проблемы и ознакомление с результатами экспериментальных и расчетных исследований до их опубликования.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта № 95-01-00713а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Забабахин Е. И., Забабахин И. Е. Явление неограниченной кумуляции. М.: Наука, 1988.
2. Kozlov E. A. Shock adiabat features, phase transition macrokinetics, and spall fracture of iron in different phase states // High Pressure Res. 1992. V. 10. P. 541–582.
3. Kozlov E. A., Kovalenko G. V., Kuropatenko V. F., Sapozhnikov G. N. Computational-experimental investigation of wave processes in metal balls under their loading by spherically converging shock waves // Bull. Amer. Phys. Soc. 1991. V. 36, N 6. P. 1831.
4. Kozlov E. A., Zhukov A. V. Phase transitions in spherical stress waves // High Pressure Science and Technology — 1993. New York: Amer. Inst. of Physics, 1994. P. 977–980.
5. 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.
6. Белов Н. Н., Корнеев А. И., Симоненко В. Г. Модель откольного разрушения пористой упругопластической среды, испытывающей полиморфный фазовый переход // Докл. АН СССР. 1990. Т. 310, № 5. С. 1116–1120.
7. Белов Н. Н., Корнеев А. И., Николаев А. П. Численный анализ разрушения в плитах при действии импульсных нагрузок // ПМТФ. 1988. № 4. С. 115–120.

8. **Майнчен Дж., Сак С.** Метод расчета «Тензор» // Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 1967. С. 185–211.
9. **Альтшуллер Л. В., Бражник М. И., Телегин Г. С.** Прочность и упругость железа и меди при высоких давлениях ударного сжатия // ПМТФ. 1971. № 6. С. 159–166.
10. **Жуков А. В.** Уравнение кривой плавления металлов при высоких давлениях // Прикладные вопросы деформируемых тел. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1985. С. 257–293.
11. **Курран Д. Р.** Динамическое разрушение // Динамика удара. М.: Мир, 1985. С. 257–293.

*Поступила в редакцию 17/X 1995 г.,
в окончательном варианте — 6/VIII 1996 г.*
