

## ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА НА ПОТЕРЮ УСТОЙЧИВОСТИ ТОНКОЙ ПЛАСТИНЫ, РАЗДЕЛЯЮЩЕЙ ПОРОШОК, СЖИМАЕМЫЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

С. П. Киселёв<sup>1</sup>, В. П. Киселёв<sup>1</sup>, В. И. Мали<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090 Новосибирск  
kiselev@itam.nsc.ru

<sup>2</sup>Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск

Представлены результаты экспериментального и теоретического исследования задачи о компактировании в ударной волне металлического порошка, заключенного в металлический контейнер с поперечной перегородкой. Показано, что внутренние напряжения в перегородке создают возмущения, которые развиваются при взрывном нагружении и сжатии перегородки вместе с порошком. В сочетании с потерей прочности в порошок, имеющей место при затекании пор, это приводит к волнообразованию на перегородке.

Ключевые слова: ударная волна, компактирование порошка, неустойчивость, структура металла, размер зерна.

### ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] обнаружен эффект волнообразования (рис. 1) в тонких металлических перегородках, разделяющих металлический порошок в цилиндрической ампуле при взрывном компактировании. В качестве порошка использовали уплотненные до состояния плотной упаковки смеси медного и молибденового порошков с различным соотношением компонентов. Перегородки представляли собой тонкие диски, изготовленные из электротехнической стали.

В работе [2] была численно решена задача о компактировании за ударной волной металлического порошка, разделенного поперечной перегородкой. В результате проведенного анализа было показано, что волнообразование обусловлено потерей устойчивости пластины, сжимаемой вместе с порошком, теряющим прочность при затекании пор. Волнообразование перегородки наблюдалось только в том случае, если в начальный момент времени ее поверхность подвергалась малому возмущению. При этом остался невыясненным вопрос о природе начальных возмущений.

В работе [1] отмечалось, что волнооб-

разование происходило только на пластинах из электротехнической стали и способствовало устранению центрального отверстия в прилегающем порошковым компакте, которое обычно связывают с особенностью схождения конической ударной волны к центру. Используемые в этих экспериментах пластины из стали других марок, из меди и алюминия дефор-



Рис. 1. Волнообразная деформация диска из электротехнической стали Э3412

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 08-01-00108-а), интеграционного проекта СО РАН № 40, программы № 12 фундаментальных исследований Президиума РАН (проект № 14, 2009 г.) и фонда Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ (НШ-4292.2008.1.).



Рис. 2. Деформация медной перегородки с образованием центрального отверстия



Рис. 3. Композитные диски из взрывных компактов

мировались без волнообразования, с образованием сквозных центральных отверстий в них (рис. 2) и прилегающих порошковых компактах, что делало их непригодными для дальнейшей переработки. Существенного влияния состава исходных порошков и их смесей на процесс волнообразования в разделяющих их перегородках не обнаружено. Перегородки вводились в порошок с целью разделить взрывные компакты на композитные диски определенной толщины, вид которых после механической обработки показан на рис. 3. В настоящей работе дано объяснение природы начальных возмущений в перегородке, приводящих к волнообразованию.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЛНООБРАЗОВАНИЯ В ПЕРЕГОРОДКАХ ИЗ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ

На рис. 4 показана экспериментальная схема компактирования порошка, использованная в работе [1]. Металлический порошок (меди, молибдена или их смесей с различными соотношениями компонентов) насыпали порциями высотой 12 мм в цилиндрическую стальную ампулу (наружный диаметр 60 мм, внутренний — 50 мм, высота 165 мм). Порции разделяли с помощью тонких (0.35 ÷ 0.4 мм) поперечных перегородок. В качестве материалов перегородок использовали Ст.3, 12Х18Н10Т, электротехническую сталь Э3412, а также технический алюминий А0 и медь М1. Химический состав исследуемых сталей приведен в таблице.

Ампулу размещали вдоль оси цилиндрического заряда аммонита 6ЖВ, скорость детонации которого составляла 3.6 км/с. Иницирование взрывчатого вещества, помещенного в картонный контейнер, производили детонатором. Компактирование порошка происходило в ударной волне, создаваемой детонационной волной скользящей по поверхности оболоч-

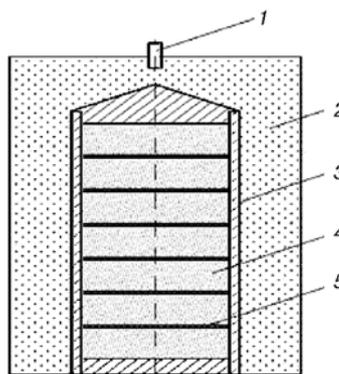


Рис. 4. Схема взрывного компактирования:

1 — детонатор, 2 — взрывчатое вещество, 3 — цилиндрическая стальная ампула, 4 — порошок, 5 — металлические диски

Марка стали	Содержание элементов, %					
	Mn	Cu	Ni	Cr	Si	C
Ст.3	0.35	0.30	0.30	0.30	0.07	0.20
12Х18Н10Т	1.8	0.25	10	18	0.7	0.12
Э3412	0.44	0.17	0.11	0.11	3.22	0.05

ки. В случае, когда использовались перегородки из электротехнической стали, после взрыва обнаружена волнообразная деформация (см. рис. 1) перегородок с прилегающими порошковыми компактами. В перегородках из других материалов (медь, алюминий, Ст.30, нержавеющая сталь) подобного волнообразования на контактных границах «перегородка — порошковый компакт» не наблюдалось (см. рис. 2).

Анализ структурного состояния исходных материалов показал, что они значительно различаются в исследуемых объектах размером действительного зерна. Средний размер зерна электротехнической стали Э3412 236 мкм, Ст.3 — 5 мкм, 12Х18Н10Т — 26 мкм, меди М1 — 8 мкм. Отсюда следует, что наиболее крупнозернистой структурой обладает электротехническая сталь Э3412, средний размер ее зерен почти в 50 раз больше, чем у углеродистой стали Ст.3. Наряду с зернами размером порядка 100 мкм, в электротехнической стали Э3412 встречаются и более крупные зерна протяженностью до 6 мм, представляющие собой, в сущности, плоские монокристаллы.

При проведении металлографических исследований установлено, что в результате пластического течения в зернах электротехнической стали образуются полосы сдвига и двойники.

Что касается перегородок из других материалов с меньшим размером зерна действительной структуры, необходимо отметить следующее. В исходной прокатанной листовой стали Ст.3 неметаллические включения, содер-

жащие карбиды глобулярной формы, имеют вид ровных пластин или протяженных цепочек и полностью повторяют форму свободной поверхности образца. После взрыва протяженные неметаллические включения деформировались волнообразно с амплитудой, не превышающей несколько десятков микрометров (рис. 5). Однако эти возмущения не выросли до макроскопических размеров и не вышли на свободную поверхность перегородки. Волнообразные деформации после взрыва наблюдались также в структурах меди, нержавеющей стали, алюминия, но все они не достигали свободных поверхностей перегородок. Отметим, что аналогичные закономерности волнообразования проявились и при компактировании микропорошка с поперечными перегородками в плоском случае.

Приведенные выше результаты показали, что поперечные перегородки из электротехнической стали имеют значительное количество дефектов в виде границ раздела и скоплений дислокаций, возникших за счет незавершенного сдвига. Причем, в отличие от других материалов (медь, алюминий), характерный пространственный размер неоднородностей в электротехнической стали соизмерим с толщиной пластины. Для выяснения причин данного явления было проведено численное моделирование ударно-волнового нагружения порошка и пластины с внутренней микроструктурой.

#### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПАКТИРОВАНИЯ МИКРОПОРОШКА С ПОПЕРЕЧНОЙ ПЕРЕГОРОДКОЙ

Рассмотрим механизм возникновения начальных возмущений в перегородке и их рост при компактировании микропорошка в ударной волне. Источником начальных возмущений в пластине являются напряжения и деформации, создаваемые скоплениями дислокаций на границах зерен. Зерна электротехнической стали имеют форму параллелепипедов, вытянутых вдоль одной из осей (оси двойника). Использование осесимметричного приближения в этом случае некорректно (при наличии осевой симметрии зерна должны быть в форме торов, радиус которых стремится к нулю при приближении к оси). Ниже исследуется задача о возникновении и росте возмущений в перегородке для плоского случая. В начальный момент времени перегородка представляет собой прямоугольную пластину, состоящую из зерен в

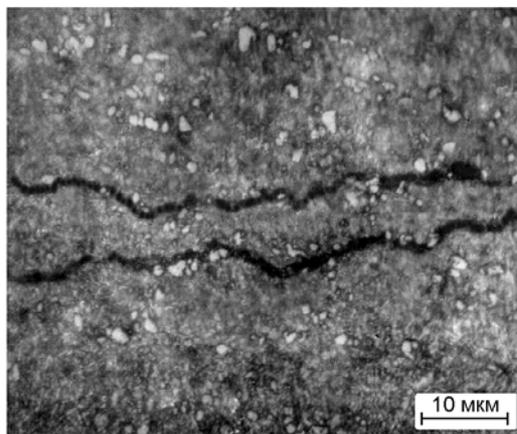


Рис. 5. Протяженные неметаллические включения в стали Ст.3

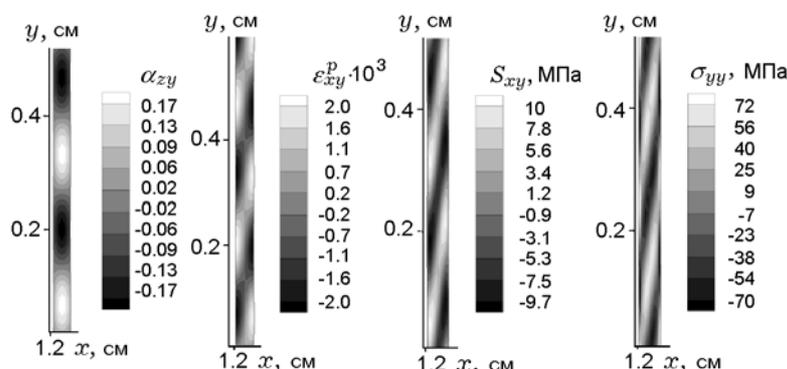


Рис. 6. Начальное распределение плотности дислокаций  $\alpha_{zy}$ , пластической деформации  $\varepsilon_{xy}^p$ , девиатора тензора напряжений  $S_{xy}$ , тензора напряжений  $\sigma_{yy}$  в пластине (перегородке)

виде прямоугольников. На границах зерен задаются скопления дислокаций, которые создают внутренние микронапряжения в перегородке. Распределение дислокаций выбиралось таким, чтобы суммарный вектор Бюргера дислокаций, приходящихся на одно зерно, равнялся нулю.

Решение задачи о компактировании медного микропорошка разбивается на два этапа. На первом определяется напряженно-деформированное состояние перегородки (пластины), создаваемое скоплениями дислокаций (рис. 6). На втором этапе решается задача о компактировании микропорошка в ампуле с поперечной перегородкой (пластиной с внутренними напряжениями и деформациями) под действием ударной волны (рис. 7). При этом в качестве начальных условий для второго этапа используется напряженно-деформированное состояние в пластине, найденное на первом этапе.

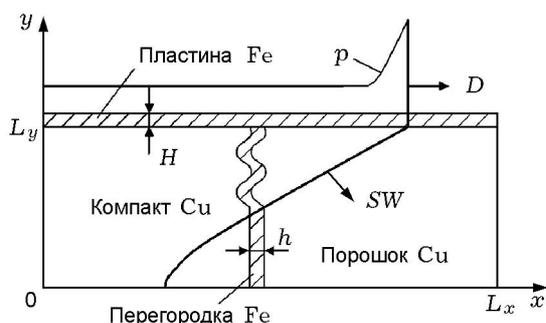


Рис. 7. Схема компактирования микропорошка, разделенного перегородкой, под действием ударной волны

### РАСЧЕТ НАЧАЛЬНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ПЕРЕГОРОДКЕ (ПЛАСТИНЕ)

Рассмотрим задачу об определении напряжений и деформаций в металлической пластине, в которой имеются дислокации, а ее поверхность свободна от напряжений. Напряжения и деформации в плоском случае находятся из системы уравнений [3]:

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} = 0,$$

$$\sigma_{xx} = -p + S_{xx}, \quad \sigma_{yy} = -p + S_{yy}, \quad \sigma_{xy} = S_{xy},$$

$$p = K \left( \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right), \quad S_{ij} = 2\mu e_{ij}^e, \quad e_{ij} = e_{ij}^e + e_{ij}^p,$$

$$e_{ij}^p = \varepsilon_{ij}^p, \quad ij = \{xx, yy, xy\},$$

$$\beta_{xx} + \beta_{yy} = 0, \quad \frac{1}{2}(\beta_{xy} + \beta_{yx}) = \varepsilon_{xy}^p, \quad (1)$$

$$\beta_{xx} = \varepsilon_{xx}^p, \quad \frac{\rho}{\rho_0} = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy},$$

$$e_{xx} = \varepsilon_{xx} - \frac{1}{3}(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}),$$

$$e_{yy} = \varepsilon_{yy} - \frac{1}{3}(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}), \quad e_{xy} = \varepsilon_{xy},$$

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x}, \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y}, \quad \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right),$$

где  $\beta_{ij}$ ,  $\varepsilon_{ij}$ ,  $\sigma_{ij}$ ,  $e_{ij}$ ,  $S_{ij}$  — компоненты тензоров пластической дилатации, деформации, напряжений, девиатора тензора деформации, девиатора тензора напряжений;  $p$  — давление;  $K$  —

модуль объемного сжатия;  $\mu$  — модуль сдвига; индекс  $e$  обозначает упругие деформации, а  $p$  — пластические.

Внутренняя микроструктура в прямоугольной пластине задавалась в виде неоднородного распределения прямолинейных дислокаций в плоскости  $(x, y)$ , параллельных оси  $z$ :

$$\begin{aligned}\alpha_{zx} &= A \sin k_x x \sin k_y y, \\ \alpha_{zy} &= A \sin k_x x \sin k_y y,\end{aligned}\quad (2)$$

где  $\alpha_{zx}$ ,  $\alpha_{zy}$  — плотности дислокаций, в которых вектор Бюргерса направлен соответственно вдоль осей  $x$  и  $y$ ;  $A = nb$ ,  $n$  — число дислокационных линий, пересекающих единичную площадку в плоскости  $(x, y)$ ,  $b$  — модуль вектора Бюргерса. Распределение дислокаций (2) моделирует поликристаллический материал, в котором дислокации концентрируются на границах прямоугольных кристаллитов размеров  $l_x = 2\pi/k_x$ ,  $l_y = 2\pi/k_y$ . Суммарный вектор Бюргерса, соответствующий плотности дислокаций (2), равен нулю. Для заданной плотности дислокаций (2) компоненты тензоров пластической дисторсии  $\beta_{ij}$  и деформации  $e_{ij}^p$  находятся из уравнений [3]

$$\begin{aligned}\frac{\partial \beta_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial \beta_{xx}}{\partial y} &= \alpha_{zx}, \quad \frac{\partial \beta_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \beta_{xy}}{\partial y} = -\alpha_{zy}, \\ e_{ij}^p &= \beta_{ij}.\end{aligned}\quad (3)$$

Подставляя (2) в уравнения (3) и интегрируя, получим деформации:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{xx}^p &= A(k_x \cos k_x x \sin k_y y + k_y \sin k_x x \cos k_y y)/k^2, \\ k^2 &= k_x^2 + k_y^2,\end{aligned}\quad (4)$$

$$\varepsilon_{xy}^p = A(k_y \sin k_x x \cos k_y y - k_x \cos k_x x \sin k_y y)/k^2.$$

Пластические деформации (4) создают в пластине неоднородное распределение внутренних микронапряжений и деформаций, которые определялись из решения системы уравнений (1) при условии, что границы пластины свободны от напряжений. Система (1) решалась численно методом установления, описанным в работе [3].

Перегородка представляла собой стальную прямоугольную пластину высотой  $L_y = 1.6$  см, толщиной  $h = 0.04$  см со следующими механическими характеристиками: модуль

объемного сжатия  $K_s = 170$  ГПа, модуль сдвига  $\mu_s = 80$  ГПа, предел текучести  $Y_s = 1.2$  ГПа. Плотность дислокаций на поверхности перегородки равна нулю, поэтому длина волны в (2) в поперечном направлении  $l_x = 2h$ , в продольном направлении —  $l_y = 6h$ . Максимальная плотность дислокаций в (2) равна  $A = 20 \text{ м}^{-1}$ , ( $n = 0.6 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-2}$ ,  $b = 3.4 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ ). На рис. 6 приведены результаты численного решения уравнений (1)–(4), показан участок пластины  $0 < y < 0.6$  см. Видно, что под действием дислокаций в пластине возникают периодические распределения напряжений и деформаций, которые и являются источником начальных возмущений при взрывном нагружении пластины в порошке.

### РАСЧЕТ НАГРУЖЕНИЯ ПЕРЕГОРОДКИ (ПЛАСТИНЫ) И ПОРОШКА УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

На втором этапе решалась плоская задача о компактировании микропорошка с поперечной перегородкой в ударной волне, создаваемой скользящей детонационной волной (рис. 7). Перегородка представляла собой пластину, напряжения и деформации в которой рассчитывались на первом этапе (см. рис. 6). Сверху микропорошок был ограничен плоской пластиной, снизу — жесткой стенкой. Расчет напряженно-деформированного состояния плоской пластины и перегородки проводился в рамках упруго-пластической модели Прандтля — Рейса.

При расчете компактирования порошка необходимо учитывать, что в эксперименте [1] перед компактированием порошок уплотняется до состояния плотной упаковки. При затекании пор в ударной волне отсутствует проскальзывание частиц порошка друг относительно друга. В данной работе рассматриваются такие нагрузки, при которых во фронте ударной волны происходят полное затекание пор и образование прочных связей между частицами порошка. Отсюда следует, что компактирование порошка в ударной волне можно описывать моделью пористого упругопластического материала, а возникающий при этом компакт — моделью Прандтля — Рейса. Соответствующие уравнения, описывающие данный процесс, приведены в работе [2].

В рассматриваемой задаче имеется несколько контактных границ: плоская пластина — порошок, перегородка — порошок, перегородка — плоская пластина. Как показы-

вает эксперимент [1], на контактных границах практически не происходит проскальзывания одного материала относительно другого. Это связано с тем, что напряжение сухого трения  $\sigma_f = fp$  при данных нагрузках [1]  $p \approx 2$  ГПа имеет величину порядка предела текучести материала. Поэтому на всех контактных границах ставилось условие идеального контакта: перемещения соответствующих точек двух контактирующих тел равны, а силы взаимодействия равны по модулю и противоположны по направлению.

Задача решалась с использованием численной схемы Уилкинса [4], которая применялась в данной работе для расчета малых деформаций. Пластические деформации находились по формулам

$$\varepsilon_{ij}^p = e_{ij}^p = e_{ij} - e_{ij}^e, \quad e_{ij}^e = \frac{S_{ij}}{2\mu}, \quad e_{ij} = \varepsilon_{ij} - \frac{1}{3}\varepsilon_{ii},$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad ij = \{xx, yy, xy\}.$$

Для расчета границы двух контактирующих тел при идеальном контакте применялся алгоритм типа предиктор — корректор. На этапе предиктор рассчитывались новое положение и скорость границы каждого тела без учета влияния второго тела. Затем на этапе корректор найденные границы корректировались с учетом условий идеального контакта. Скорость контактной границы определялась из закона сохранения импульса при неупругом соударении контактирующих ячеек со скоростями, найденными на этапе предиктор. Можно показать, что в этом случае выполняются условия идеального контакта.

Действие продуктов детонации моделировалось давлением, которое прикладывалось к верхней границе оболочки  $p(x, t)$ . Давление на фронте детонационной волны  $x = Dt$  находилось из условия Чепмена — Жуге [5]

$$p_{CJ} = \frac{2}{\gamma + 1} \rho_{ВВ} D^2, \quad (5)$$

где  $\rho_{ВВ}$  — плотность взрывчатого вещества,  $D$  — скорость детонации,  $\gamma = 3$ ,  $t$  — время. За фронтом детонационной волны давление падает в центрированной волне разрежения  $Dt/2 < x < Dt$ , к которой примыкает область  $0 < x < Dt/2$ , где давление постоянно [5]:

$$p = p_{CJ}(c/c_{CJ})^3, \quad c_{CJ} = \gamma D/(\gamma + 1),$$

$$c = \begin{cases} x/2t + D/4, & D/2 < x/t < D, \\ D/2, & x/t < D/2. \end{cases} \quad (6)$$

Численные расчеты проводились для плоского случая, геометрические и физические параметры в расчетах выбирались близкими к условиям эксперимента [1]. Длина плоской стальной пластины, ограничивающей порошок сверху, равнялась  $L_x = 6$  см, толщина  $H = 0.2$  см. Стальная пластина располагалась на высоте  $L_y = 1.6$  см и характеризовалась следующими параметрами: модуль объемного сжатия  $K_s = 170$  ГПа, модуль сдвига  $\mu_s = 80$  ГПа, предел текучести  $Y_s = 0.3$  ГПа. Пространство между верхней пластиной и осью  $x$  заполнялось медным порошком пористостью  $m_1^0 = 0.35$ , радиус пор  $a^0 = 20$  мкм. В расчетах принимались следующие характеристики меди:  $\rho_s = 8.9 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $K_s = 139$  ГПа,  $\mu_s = 46$  ГПа,  $Y_s = 0.2$  ГПа. В момент времени  $t = 0$  детонационная волна начинает распространяться вдоль поверхности пластины слева направо со скоростью  $D = 3.6$  км/с, давление продуктов детонации в точке Чепмена — Жуге определяется по формуле (5):  $p_{CJ} = 2.9$  ГПа, а в волне разгрузки — по формулам (6).

В пластину, а затем в порошок и перегородку распространяется косая ударная волна. На рис. 8 показаны результаты расчета распространения волны в микропорошке и деформации перегородки. Скорость детонационной волны значительно больше скорости ударной волны в микропорошке, поэтому после выхода детонационной волны за пределы расчетной области ударная волна в микропорошке быстро вырождается в плоскую волну, распространяющуюся вдоль оси  $y$  (см. рис. 8, а, б). В этой ударной волне происходит затекание пор в микропорошке, поэтому ее фронт размазан на толщину  $\Delta \approx D_p \tau_p$  ( $D_p$  — скорость ударной волны в микропорошке,  $\tau_p$  — характерное время затекания пор), которая в данном случае порядка 0.5 см (см. рис. 8, б). При затекании пор происходит потеря прочности в микропорошке [2] ( $S_{ij} = 0$ ). При сжатии перегородки (пластины) ударной волной пластина теряет устойчивость. Поскольку в окружающем пластину микропорошке касательные напряжения отсутствуют ( $S_{ij} = 0$ ), то ничто не препятствует росту начальных возмущений. После затекания пор прочность образовавшегося компакта

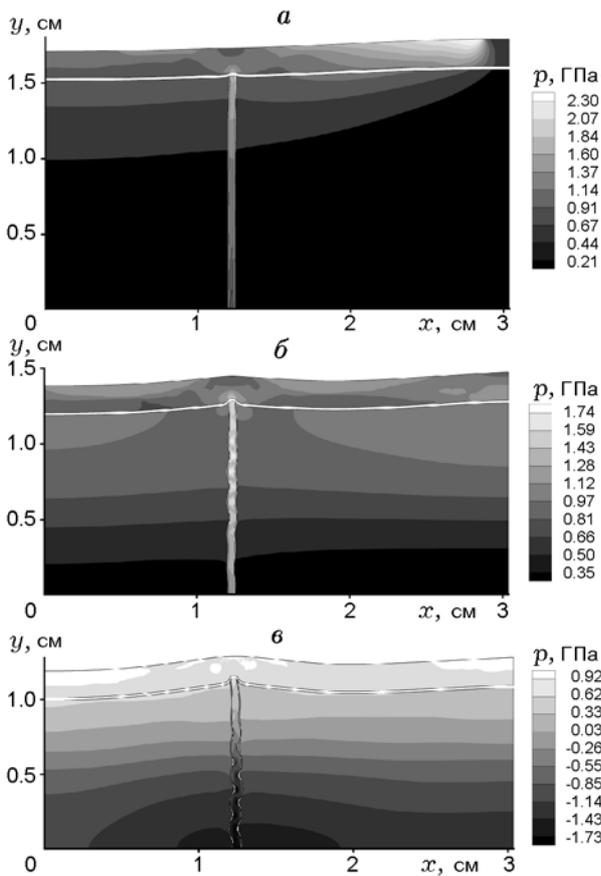


Рис. 8. Изобары, рассчитанные в моменты времени 8 (а), 24 (б), 40 мкс (в)

восстанавливается и рост возмущений прекращается. Таким образом, возмущения в перегородке нарастают только в размазанном фронте ударной волны толщиной  $\Delta$  (см. рис. 8, б).

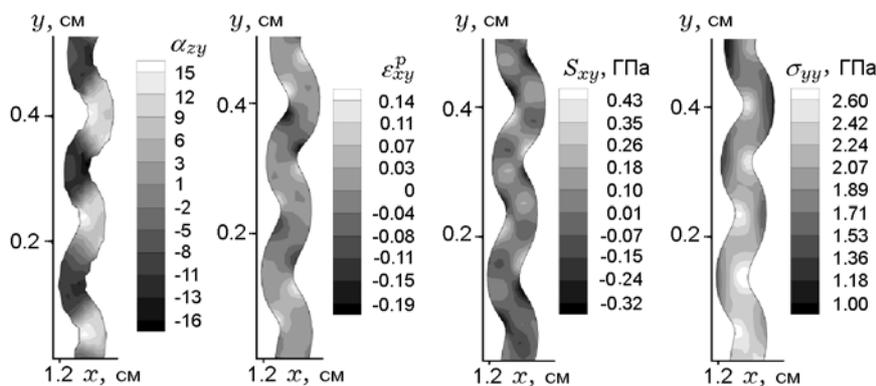


Рис. 9. Распределение плотности дислокаций  $\alpha_{zy}$ , пластической деформации  $\epsilon_{xy}^p$ , девиатора тензора напряжений  $S_{xy}$  и тензора напряжений  $\sigma_{yy}$  в пластине (перегородке) после компактирования микропорошка

Длина волны растущих возмущений должна быть больше некоторого критического значения [2, 6], в противном случае начальные возмущения затухают. Были проведены аналогичные расчеты нагружения порошка с перегородкой, в которой начальные возмущения плотности дислокаций имели вдоль оси ординат в три раза меньшую длину волны  $l_y = l_x = 2h = 0.8$  мм. Образование волн на перегородке в этом случае не обнаружено. Отметим, что в эксперименте [1] характерный средний размер зерна в электротехнической стали был в четыре раза меньше и составлял 0.24 мм. Это отличие в характерных размерах может быть связано с тем, что в реальном материале имеется распределение зерен по размерам и могут присутствовать зерна размером больше 0.6 мм.

После отражения ударной волны от нижней границы области ( $y = 0$ ) и выхода ее на верхнюю поверхность возникает волна разгрузки (см. рис. 8, в), которая распространяется обратно в образовавшийся компакт. Таким образом, процессы затекания пор в микропорошке и волнообразования в перегородке в плоском случае проходят так же, как в цилиндрическом случае, рассмотренном в работе [2]. В отличие от [2] начальные возмущения в преграде не задавались произвольно, а определялись начальным распределением дислокаций в перегородке (см. рис. 6). Рассчитанные после компактирования распределения дислокаций, деформации и напряжения в преграде приведены на рис. 9.

Сравнение с начальным распределением (см. рис. 6) показывает, что плотность дислокаций и пластическая деформация воз-

росли приблизительно на два порядка. В то же время напряжения в пластине изменились незначительно. Максимальное напряжение  $S_{xy}$  возросло лишь в четыре раза, а минимальное напряжение  $\sigma_{yy}$  уменьшилось в три раза по сравнению с начальным. Это связано с тем, что плотность дислокаций увеличивалась пропорционально пластической деформации. Пластическая деформация происходила путем скольжения дислокаций по направлению максимальных касательных напряжений, расположенных под углом  $45^\circ$  к главным осям тензора напряжений. Величина действующих напряжений  $\sigma_{yy}$  определяется волнами сжатия-разрежения, которые распространяются по пластине после нагружения ударной волной.

### ВЫВОДЫ

Результаты экспериментов и расчетов компактирования микропорошка, разделенного перегородками, в плоской и осесимметричной постановках показали, что в обоих случаях волнообразование в перегородках происходит аналогичным образом, за счет развития начальных возмущений при потере устойчивости перегородки, сжимаемой вместе с порошком. Длина волны начальных возмущений определяется характерным размером зерна, который в электротехнической стали на два порядка больше, чем в других материалах, использованных для перегородок. Поэтому развитие возмущений и волнообразование наблюда-

ются только в перегородке из электротехнической стали при ее сжатии совместно с порошком, который теряет прочность во время затекания пор. После затекания пор прочность компакта восстанавливается и возникающие в нем напряжения препятствуют дальнейшему росту возмущений.

Авторы благодарны Л. С. Соловьевой за проведение металлографических исследований.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Мали В. И., Калинин А. Н., Сергеев С. А. Исследование теплопроводности взрывных компактов медь — молибден // Физика горения и взрыва. — 2003. — Т. 39, № 1. — С. 123–127.
2. Киселев С. П., Киселев В. П. Об эффекте волнообразования при ударно-волновом компактировании порошков // ПМТФ. — 2006. — Т. 47, № 1. — С. 119–130.
3. Белай О. В., Киселев С. П. Расчет полей внутренних напряжений для плоскодеформированного состояния упругого тела с дислокациями // ПМТФ. — 2004. — Т. 24, № 6. — С. 116–123.
4. Уилкинс М. Л. Расчет упругопластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике. — М.: Мир, 1967.
5. Физика взрыва / Ф. А. Баум, Л. П. Орленко, К. П. Станюкович, В. П. Челышев, Б. И. Шехтер. — М.: Наука, 1975.
6. Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. — М.: Наука, 1973.

*Поступила в редакцию 28/IV 2009 г.*