

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ УДАРНЫХ ВОЛН В ГЕТЕРОГЕННЫХ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ СРЕДАХ

С.А. Медин, А.Н. Паршиков

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

Аннотация

Проведено численное моделирование структуры ударных волн, распространяющихся в гетерогенных средах, состоящих из двух компонент – твердого и жидкого металлов. В качестве твердого металла выбран вольфрам, в качестве жидкого – литий и свинец. Рассмотрены два вида гетерогенных сред, в которых твердый материал образует решетку, ячейки которой заполнены жидким металлом, или жидким металл содержит изолированные твердые металлические включения. Задача решается в двумерной постановке в термо-вязко-упруго-пластическом приближении. Термодинамические свойства описываются уравнением Грюнайзена и адиабатой Гюгонио. Проведенные расчеты показывают, что структура ударной волны определяется динамическим и тепловым взаимодействием компонент. Проанализированы физические эффекты, влияющие на релаксацию полей гидродинамических параметров к установившимся значениям.

COMPUTER SIMULATION OF THE SHOCK-WAVE STRUCTURE FOR HETEROGENEOUS TWO-COMPONENTS MEDIA

Computer simulation of shock wave structure is performed for heterogeneous media composed of the two components, solid and liquid metals. The modeling is based on thermal viscous elastic plastic approximation. The Mie-Gruneisen equation of state with Hugoniot describes the thermodynamic properties of the materials. The heterogeneous 2D media is presented by a continuous skeleton and by localized inclusions, which both are taken as solid metal (tungsten) and liquid metal (lead or lithium). Behavior of solid and liquid components in shock front and in the relaxation zone behind the shock is described. It is revealed that the shock structure is determined by dynamic and thermal interaction of the components. The influence of scale factor (period of heterogeneity) on hydrodynamic parameters relaxation is analyzed.

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование ударно-волновых процессов в неоднородных и гетерогенных средах (пористых материалах, композитах и др.) представляет интерес для создания новых технологий производства конструкционных материалов и разработки новых методов защиты объектов от импульсных воздействий. С теоретической точки зрения численное моделирование ударно-волнового нагружения пористых и гетерогенных сред позволяет развивать и тестировать методы расчета ударных адиабат этих сред по известным уравнениям состояния, полученным для сплошных компонент. В данной работе рассматриваются двухкомпонентные гетерогенные среды, состоящие из двух различных материалов, один из которых находится в твердом состоянии, а второй – в жидком состоянии.

Экспериментальным и расчетным исследованиям в пористых и гетерогенных материалах посвящена обширная литература (см. монографию [1]). Авторами данной работы проведено численное моделирование ударно-волнового нагружения гетерогенных упруго-пластических сред [2] и пористых материалов [3]. Были получены данные о структуре ударной волны, распространяющейся в таких средах. Структура ударной волны имеет характерные особенности, обусловленные дифракцией ударной волны на неоднородностях и релаксацией параметров неоднородностей к стационарным значениям.

На рис. 1 представлена характерная структура ударной волны в пористом вольфраме $\rho_0/\rho_{00} = 1.882$ с регулярным ортогонально-цепочечным расположением пор. Расчет проведен для плоской пористой пластины ($x > 0$), ударяющейся о жесткую стенку ($x = 0$) со скоростью $U_p = 2000$ м/с. Пунктирные вертикальные

линии разделяют расчетную область на четыре зоны: I – зона невозмущенного течения; II – фронт ударной волны, в котором происходит сжатие среды до максимального давления; III – зона релаксации, в которой наблюдаются затухающие пульсации гидродинамических переменных; IV – зона установившихся значений гидродинамических переменных.

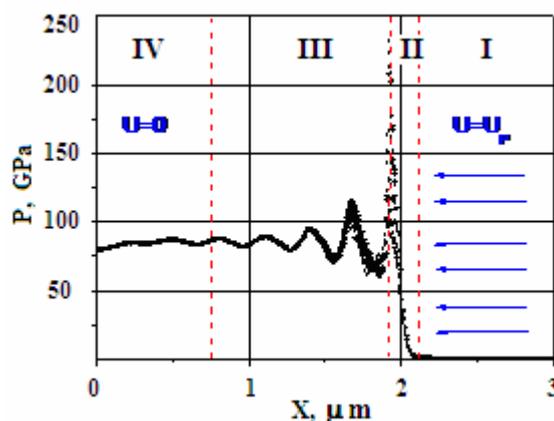


Рис. 1. Структура ударной волны в пористом вольфраме ($\rho_0/\rho_{00} = 1.882$, $U_p = 2000$ м/с). I – зона невозмущенного течения, II – фронт ударной волны, III – зона релаксации, IV – зона покоя

В профилях других гидродинамических параметров выделяются аналогичные зоны. Характерные размеры зон релаксации в общем случае различны для профилей давления, температуры и скорости. В частности в пористых материалах длина зоны динамической релаксации (затухания пульсаций давления) строго пропорциональна шагу пористой решетки, в то время как зона тепловой релаксации (для температуры) не

совпадает с зоной динамической релаксации. При малой теплопроводности материала (или большом шаге решетки) однородное распределение температуры устанавливается позднее, чем заканчивается динамическая релаксация. Наблюдается взаимное влияние процессов динамической и тепловой релаксации. В случае многокомпонентной среды каждая из компонент среды может иметь собственные распределения давления, температуры и скорости. В этом случае отсутствует динамическое, тепловое и скоростное равновесие между компонентами.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для моделирования применялся метод SPH, использующий решение задачи распада разрыва в расчете взаимодействия частиц. Вычислительный алгоритм детально рассмотрен в [4]. Расчёт температуры производился по уравнению состояния НОМ [5]. Решалась плоская двумерная задача удара плоского образца из гетерогенного материала о жёсткую стенку. В качестве жидкой составляющей компоненты для гетерогенной среды были выбраны жидкие свинец и литий. В качестве твердой компоненты был выбран вольфрам. Характеристики материалов приведены в таблице.

Вещество	Свинец	Литий	Вольфрам
ρ_0	11350	534	19300
C_V	130	4400	140
λ	35.3	84.7	174
$\alpha \times 10^6$	29.1	56	4.59
K	42.353	11.8	300
G	0	0	155
$\eta \times 10^3$	2.6	0.53	0
C_a	2580	4760	4029
S_{av}	1.26	1.065	1.237
Y_0	0	0	2.4

Неоднородность среды задавалась включением в несущую фазу (скелет) цепочки восьмиугольных включений примесной фазы. Каждый восьмиугольник примесной фазы содержал 120 SPH-частиц и был окружён 136 частицами несущей фазы, что составляло элементарную квадратную ячейку размером 16×16 частиц. Отношение объемных долей несущей фазы и примеси составляет в этом случае $136:120 = 1.13$, т.е. близкую к единице величину. Элементарная квадратная ячейка имеет площадь $l \times l$. Расчетная область ограничена единичным слоем высотой l с жесткими горизонтальными и вертикальной левой стенками и имеет начальную протяженность от соударяемой жесткой стенки до свободной поверхности $L = 32l$, т.е. содержит 32 элементарных ячейки. На рис. 2 показан фрагмент расчётной области в начальный момент времени. Число SPH-частиц для области протяженностью L составляет 8192. Размер элементарной ячейки среды принимался различным с целью исследовать влияние на характер релаксации масштабного фактора: $l \times l = 0.16 \times 0.16$ мкм ($L = 5.12$ мкм), $l \times l = 1.6 \times 1.6$ мкм ($L = 51.2$ мкм) и $l \times l = 16 \times 16$ мкм ($L = 512$ мкм). В расчете на каждом шаге по времени запоминаются значения термодинамических и кинематических параметров для каждой SPH-частицы, что позволяет построить профиль давления, температуры и скорости после прохождения ударно-волнового фронта по материалу.



Рис. 2. Схема расчётной области

Моделируемый образец материала в момент времени $t=0$ приобретает скорость $U_p = 2000$ м/с в направлении начала координат. Ударно-волновой фронт при этом движется от жесткой стенки к свободной поверхности, слева направо со скоростью $U_s - U_p$.

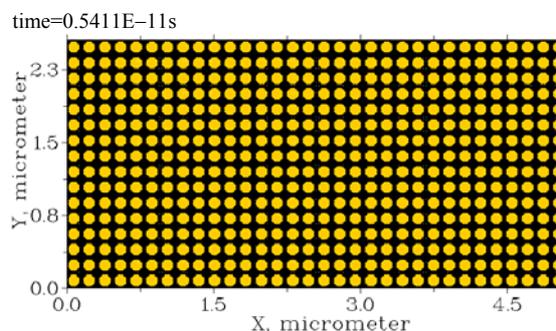


Рис. 3. Моделируемый слой двухкомпонентного образца шириной $L = 5.12$ мкм, состоящий из несущей фазы и включений. Размер ячейки $l \times l = 160 \times 160$ нм

Условия на горизонтальных жестких стенках, ограничивающих единичный слой (рис.2), эквивалентны периодическому повторению этого слоя вдоль оси y . Таким образом, численное моделирование единичного слоя (рис.2) эквивалентно моделированию образца произвольной протяженности, образованного периодическим повторением единичного слоя вдоль оси y (рис. 3).

Производилось моделирование двух вариантов гетерогенной среды: «тяжелая» несущая фаза + «легкие» включения и «легкая» несущая фаза + «тяжелые» включения.

3. ТВЕРДАЯ НЕСУЩАЯ ФАЗА С ЖИДКИМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ

Рассмотрим удар о жесткую стенку твердого вольфрама, содержащего включения жидкого лития, $l = 0.16$ мкм. Скорость удара равна $U_p = 2000$ м/с. На рис.4–6 представлены расчетные профили давления, скорости и температуры. Ширина ударного фронта (рис.4) составляет примерно 0.2 мкм, а зона релаксации давления примерно 2 мкм. Зона релаксации скорости (рис. 5) несколько меньше и составляет 1.5 мкм. В распределении скорости явно выражена скоростная неравновесность компонент. Профиль температуры существенно отличается от профилей давления и скорости (рис.6). Практически отсутствуют пульсации температуры, а зона фронта сильно размыта и составляет около 0.5 мкм.

Имеет место тепловое равновесие между компонентами. На рис.7–9 приведены профили давления скорости и температуры для образца из вольфрамового скелета и свинцовых включений.

Более тяжёлые включения с примерно на порядок большим акустическим импедансом привели к тому, что ширина фронта сократилась, а протяжённость зоны релаксации давления и скорости возросла.

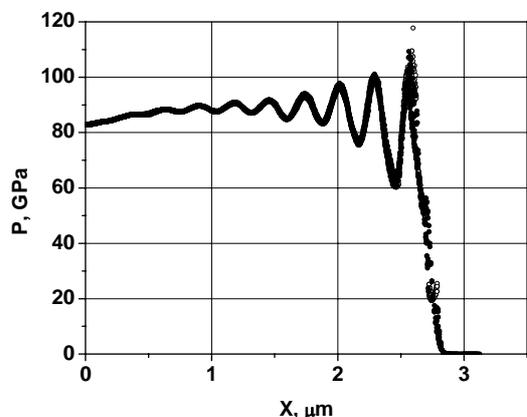


Рис. 4. Профиль давления в вольфраме, содержащем изолированные литиевые включения ($l=0.16$ мкм) в момент времени $t=1$ нс (● – вольфрам, о – литий)

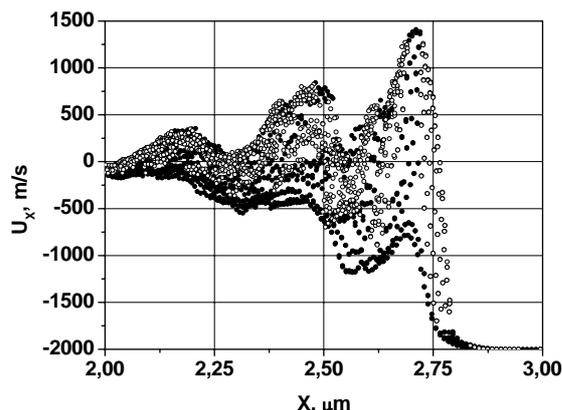


Рис. 5. Профиль скорости в вольфраме, содержащем изолированные литиевые включения ($l=0.16$ мкм) в момент времени $t=1$ нс (● – вольфрам, о – литий)

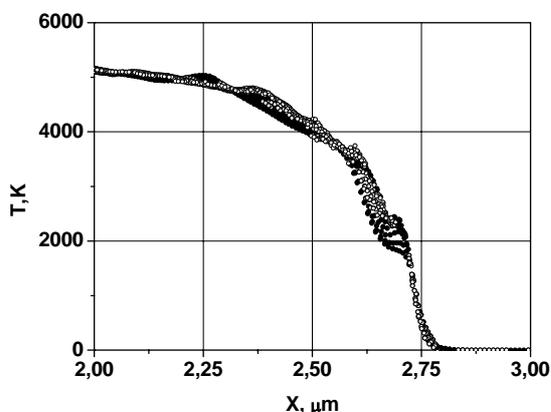


Рис. 6. Профиль температуры в вольфраме, содержащем изолированные литиевые включения ($l=0.16$ мкм) в момент времени $t=1$ нс (● – вольфрам, о – литий)

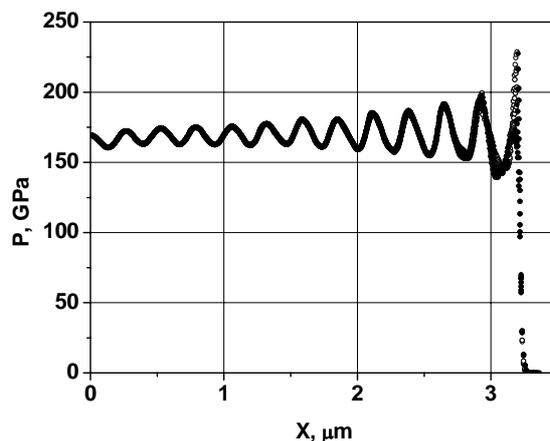


Рис. 7. Профиль давления в вольфраме, содержащем изолированные включения свинца ($l=0.16$ мкм) на момент времени $t=1$ нс (● – вольфрам, о – свинец)

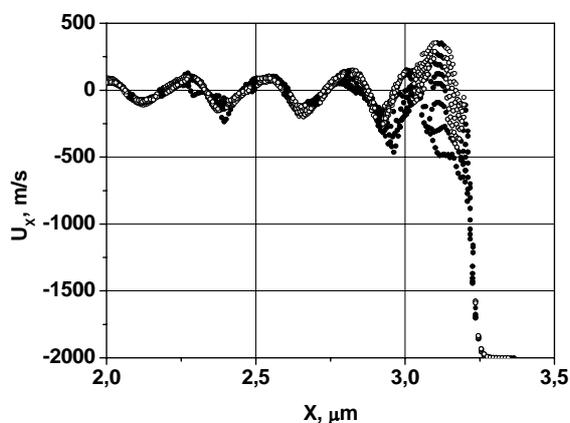


Рис. 8. Профиль скорости в вольфраме, содержащем изолированные включения свинца ($l=0.16$ мкм) на момент времени $t=1$ нс (● – вольфрам, о – свинец)

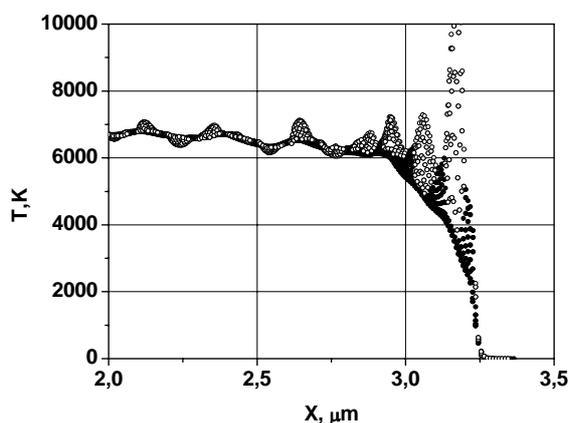


Рис. 9. Профиль температуры в вольфраме, содержащем изолированные включения свинца на момент времени ($l=0.16$ мкм) на момент времени $t=1$ нс (● – вольфрам, о – литий)

При этом примерно вдвое увеличилась установившаяся величина давления. Скоростная неравновесность стала незначительной. В профиле температуры появились пульсации, а также температурная неравновесность компонент, что можно объяснить низкой теплопроводностью свинца. Установившееся значение температуры возросло, что может быть связано с более низкой теплоемкостью свинца. Но качественно структура зон релаксации не изменилась. Кинематика поля

течения для материала, содержащего включения жидкого лития в твердом вольфраме, показана на рис. 10. Включения лития деформируются во фронте ударного импульса, приобретают подковообразную форму и разрушаются в зоне релаксации на более мелкие включения.

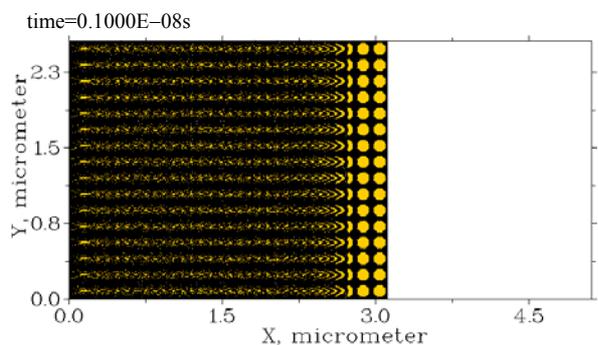


Рис. 10. Характер течения вольфрама, содержащего изолированные литиевые включения ($l=0.16$ мкм) в момент времени $t=1$ нс

Расчёты, проведенные для несущей фазы без прочности ($Y_0=0$), показали незначительные отличия от приведенных расчётов. Можно с уверенностью утверждать, что эффекты прочности (в данных вычислительных экспериментах) мало влияли на релаксацию полей давления, скорости и температуры.

4. ЖИДКАЯ НЕСУЩАЯ ФАЗА С ТВЕРДЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ

Рассмотрим теперь среду, состоящую из жидкой литиевой несущей фазы с упруго-пластическими включениями вольфрама. Характер течения такой среды (рис. 11) отличается от течения упруго-пластической несущей фазы с включениями жидкого лития, показанного на рис.10. Включения вольфрама не разрушаются и приобретают серповидную форму, противоположного предыдущему случаю направления лучей.

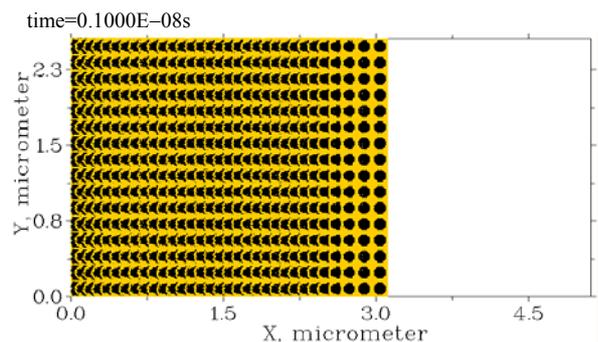


Рис. 11. Характер течения лития, содержащего вольфрамовые включения ($l=0.16$ мкм) в момент времени $t=1$ нс

На рис. 12–14 представлены результаты расчёта удара о жесткую стенку слоя лития, содержащего изолированные включения твердого вольфрама. В таком материале ширина фронта увеличивается в 3–4 раза по сравнению с образцом с твердым скелетом и жидкими включениями, пульсации давления за фронтом импульса практически отсутствуют. Как видно из рис. 12, где показан профиль давления для двух моментов времени, профиль близок к стационарному.

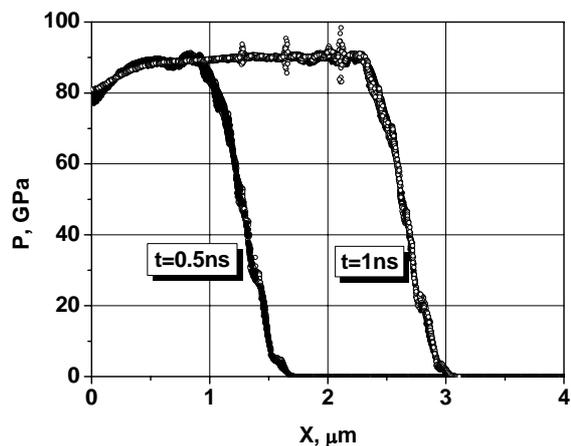


Рис. 12. Профиль давления в литии, содержащем изолированные включения вольфрама ($l=0.16$ мкм) в моменты времени $t=0.5$ нс и $t=1$ нс (● – вольфрам, ○ – литий)

Во фронте импульса (в отличие от среды с «легкими» включениями в «тяжелой» фазе) наблюдается значительное скольжение компонент (рис.13). Можно видеть, что вольфрамовые включения тормозятся медленнее, чем жидкий литий, в литии возбуждается пульсирующее возвратное течение, о чем свидетельствуют положительные пульсации скорости во фронте. Колебаний скорости за фронтом не наблюдается.

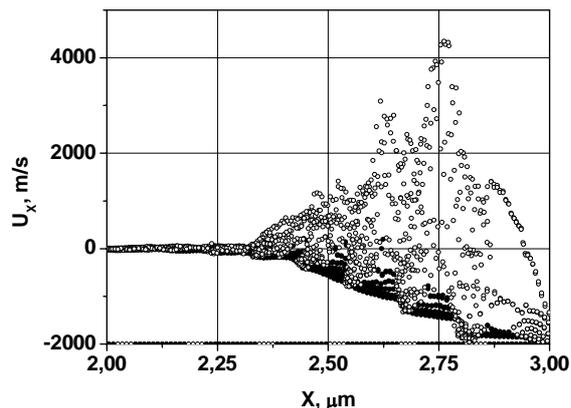


Рис. 13. Профиль скорости в литии, содержащем изолированные включения вольфрама ($l=0.16$ мкм) в момент времени $t=1$ нс (● – вольфрам, ○ – литий)

Скорость части несущей фазы во фронте при этом направлена от жесткой стенки и достигает величины 4000 м/с, что вдвое выше скорости соударения со стенкой. Чтобы детально показать структуру распределения скорости и температуры между включениями и несущей фазой, эти параметры показаны на рис. 13 и рис. 14 в малом масштабе, только для зоны релаксации, а не всего ударяющегося о жесткую стенку образца. Сравнение профилей давления, скорости и температуры в вольфраме, содержащем включения лития (см. рис.4–6) с профилями давления, скорости и температуры в литии, содержащем включения вольфрама, показывают качественное различие в процессах релаксации для обоих материалов. В первом случае за ударным фронтом имеется зона релаксации, во втором случае релаксация происходит в ударном фронте, имеющем большую протяженность.

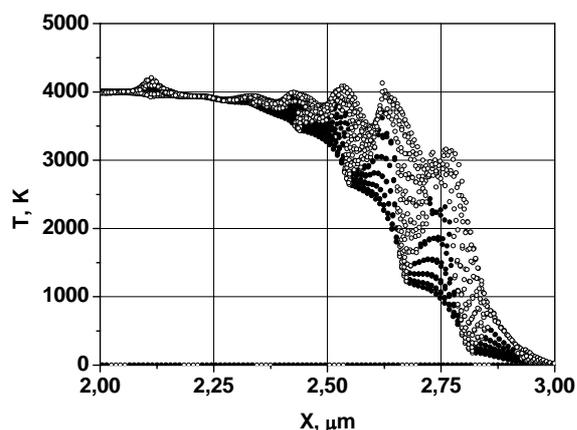


Рис. 14. Профиль температуры в литии, содержащем изолированные включения вольфрама ($l=0.16$ мкм) в момент времени $t=1$ нс (● – вольфрам, о – литий).

Температура также приобретает стационарное значение во фронте, примерно равное значению на рис.6. Таким образом, релаксационные процессы завершаются уже во фронте импульса, имеющем протяженность около 0.6 мкм. Причину такого различия в отклике материалов на ударное нагружение можно объяснить скоростной неравновесностью между составляющими второй материал компонентами. Этот вывод подтверждается анализом расчета удара о жесткую стенку слоя свинца, содержащего изолированные включения твердого вольфрама. Профили давления (рис.15), скорости (рис. 16) и температуры (рис.17) для такого материала схожи с профилями давления (см. рис.5), скорости (см. рис.6) и температуры (см. рис.7) для вольфрама, содержащего включения свинца.

Таким образом, если нагружаемая ударным импульсом среда состоит из свинца и вольфрама, то релаксационные процессы за фронтом импульса протекают схожим образом, независимо от того, какой из материалов является несущей фазой.

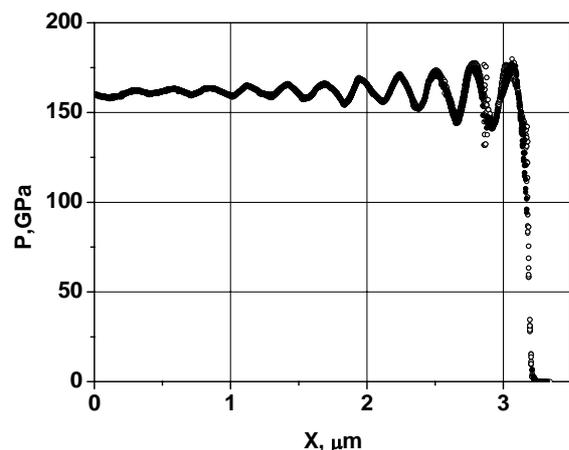


Рис. 15. Профиль давления в свинце, содержащем изолированные включения вольфрама ($l=0.16$ мкм) в момент времени $t=1$ нс (● – вольфрам, о – свинец)

5. МАСШТАБНЫЙ ФАКТОР

Как было установлено в [3] для пористого металла, при различных масштабах неоднородности построенные вдоль безразмерной координаты x/L профили давления мало изменяются, но зона релаксации темпе-

ратуры чувствительна к изменению масштаба неоднородности. Расчеты показали, что это имеет место и для гетерогенных сред. На рис. 18 и рис. 19 приведены результаты расчётов удара слоя лития с включениями вольфрама о жесткую стенку при разных масштабах неоднородности.

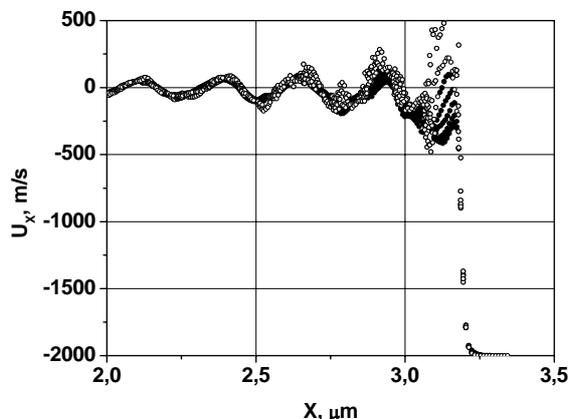


Рис. 16. Профиль скорости в свинце, содержащем изолированные включения вольфрама ($l=0.16$ мкм) в момент времени $t=1$ нс (● – вольфрам, о – свинец)

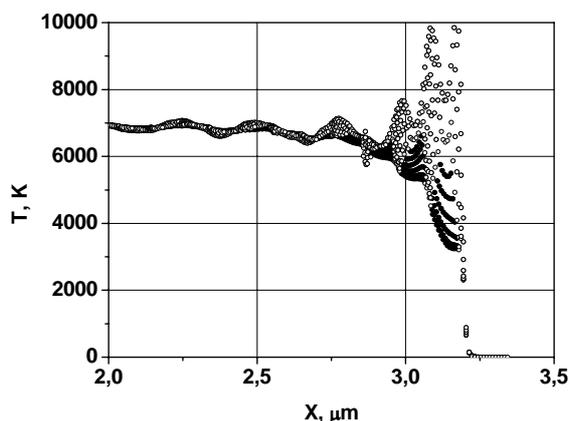


Рис. 17. Профиль температуры в свинце, содержащем изолированные включения вольфрама ($l=0.16$ мкм) в момент времени $t=1$ нс (● – вольфрам, о – свинец)

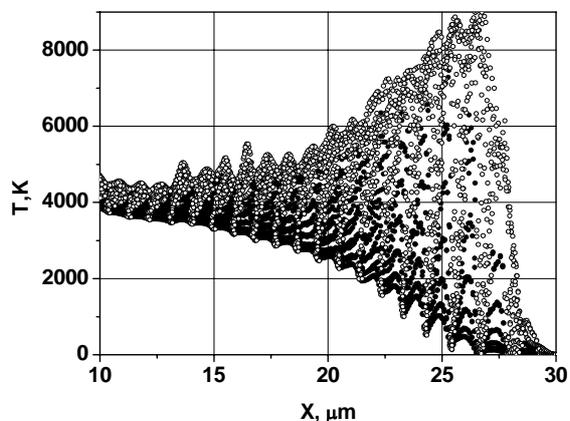


Рис. 18. Профили температуры в литии, содержащем изолированные включения вольфрама ($l=1.6$ мкм) в момент времени $t=10$ нс (● – вольфрам, о – литий)

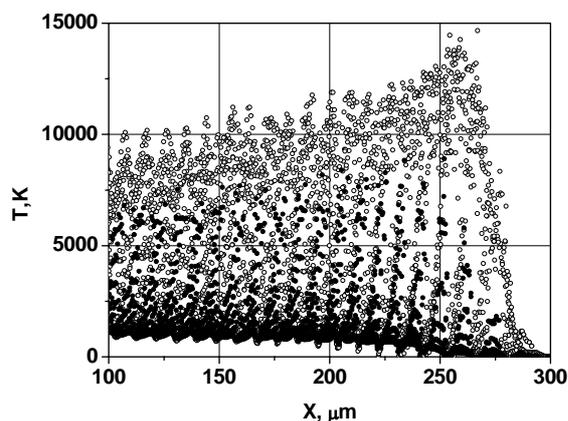


Рис. 19. Профили температуры в литии, содержащем изолированные включения вольфрама ($l=16$ мкм) в момент времени $t=100$ нс (● – вольфрам, ○ – литий)

При субмикронных размерах неоднородностей среды ($l=0.16$ мкм) механизм теплопроводности обеспечивает выравнивание температур компонент вблизи фронта ударной волны. Как следует из рис. 6, 9, 14 и 17, при любом сочетании металлов для несущей фазы и включений, зона тепловой релаксации мала. При размерах ячейки в $l=1.6$ мкм (рис.18) зона тепловой релаксации охватывает уже значительную часть образца за ударным фронтом, а при $l=16$ мкм (рис.19) релаксация поля температур незначительна. При этом наблюдается сильная температурная неравномерность компонент.

Аналогичная картина релаксации поля температур наблюдается при ударе о жесткую стенку слоя свинца, содержащего вольфрамовые включения (рис. 20 и рис. 21). Проведенные расчеты подтверждают ранее сделанный в [3] вывод о влиянии масштабного фактора на зону тепловой релаксации.

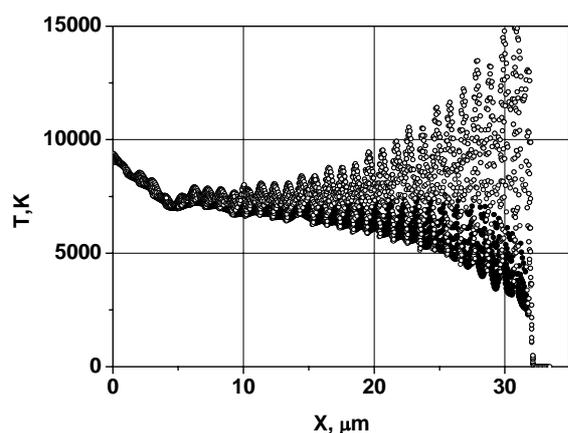


Рис. 20. Профили температуры за фронтом УВ в свинце, содержащем изолированные включения ($l=1.6$ мкм) в момент времени $t=10$ нс (● – вольфрам, ○ – свинец)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Численное моделирование распространения ударных волн в металлических гетерогенных средах выполнено для материалов двух типов:

- твердая решетка с жидкими включениями (W/Li или W/Pb),
- жидкость с твердыми включениями (Li/ W или Pb/W).

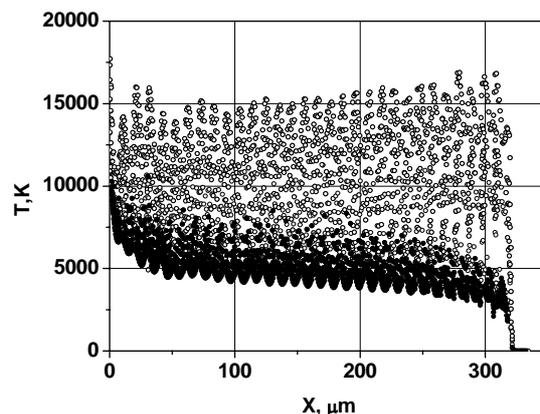


Рис. 21. Профили температуры за фронтом УВ в свинце, содержащем изолированные включения вольфрама ($l=16$ мкм) в момент времени $t=100$ нс (● – вольфрам, ○ – свинец)

Структура ударной волны в материалах первого типа имеет узкий фронт шириной порядка периода решетки и протяженную зону релаксации. Для пары компонент W/Li в зоне релаксации наблюдается скоростная неравномерность.

В материалах второго типа скоростная неравномерность является доминирующим фактором в формировании структуры ударной волны. Для пары Li/W скольжение жидкой фазы относительно твердых включений существенно увеличивает ширину фронта, так что релаксация параметров среды к установившимся значениям завершается в ударном фронте.

При вариации масштаба решетки распределения давления и скорости в ударной волне сохраняют подобие в продольном направлении. При субмикронных величинах периода решетки имеет место тепловое равновесие между компонентами среды. При больших значениях периода решетки возникает температурная неравномерность с пульсирующим пространственно неоднородным полем температур.

Работа выполнена при поддержке межсекционной программы фундаментальных исследований Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления Российской академии наук «Интегрированные модели физической механики»; руководитель программы академик Д.М. Климов.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- ρ_0 – начальная плотность сплошного вещества, кг/м³
- C_V – удельная теплоемкость при постоянном объеме, Дж/(кг·К)
- λ – теплопроводность, Вт/(м·К)
- α – коэффициент линейного теплового расширения, К⁻¹
- K – изотермический модуль объемного сжатия, ГПа
- G – модуль сдвига, ГПа
- η – динамическая вязкость, Па·с
- Y_0 – предел текучести, ГПа
- C_a, S_a (м⁻¹) – коэффициенты ударной адиабаты

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каннель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортов В.Е., Ударно-волновые явления в конденсированных средах. – М.; «Янус-К», 1996.

2. Kanel G.I., Ivanov M.F., and Parshikov A.N., Computer simulation of the heterogeneous materials response to the impact loading, *Int. J. Impact Eng.* **17**, 445 (1995).
3. Паршиков А.Н., Медин С.А., Релаксационные процессы при ударно-волновом нагружении пористых материалов / Физика экстремальных состояний вещества-2007, Черно-голова, 2007.
4. Parshikov A.N., Medin S.A., Smoothed Particle Hydrodynamics Using Interparticle Contact Algorithms *J. Comput. Phys.* **180**, 358 (2002)
5. Мейдер Ч. Численное моделирование детонации.- М.; Мир, 1985.