

УДК 539.63

С.А. Кинеловский, К.К. Маевский

МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ ПОРИСТЫХ СМЕСЕЙ, ВКЛЮЧАЮЩИХ В СВОЙ СОСТАВ ЖЕЛЕЗО, ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ¹

Для описания поведения содержащих железо смесей используется термодинамически равновесная модель, обеспечивающая хорошее соответствие эксперименту. Модель позволяет достоверно описывать ударно-волновое нагружение сплошного и пористого железа, а также смесей, включающих железо в своем составе для давлений выше 5 ГПа, используя только параметры компонентов. Проведено сравнение результатов расчетов с известными экспериментальными результатами.

Ключевые слова: ударная адиабата, пористая гетерогенная среда, термодинамическое равновесие, однотемпературное приближение, односкоростное приближение, коэффициент Грюнайзена.

Для многих задач современной науки и практики представляет большой интерес поведение пористых смесей порошковых материалов при ударно-волновом нагружении. Эти исследования важны для решения задач динамического компактирования, ударно-волнового синтеза и других взрывных технологий. Учитывая распространенность железа в природе, построение модели, достоверно описывающей ударно-волновое нагружение смесей, включающих в свой состав железо, позволяет решать указанные задачи для этого компонента.

В связи с большим разнообразием по составам и пористостям порошковых смесей, для расчета ударно-волнового воздействия на них предпочтительно использовать уравнения состояния только компонентов смеси. Для описания поведения смесей, содержащих в своем составе в качестве компонента железо, используется модель, основанная на предположении, что все компоненты смеси, включая газ в порах, при ударно-волновом нагружении находятся в термодинамическом равновесии (равенство скоростей, давлений и температур) [1, 2]. Данная модель ТЕС (thermodynamic equilibrium components) достаточно перспективна для определения параметров высокого динамического нагружения как сплошных, так и пористых материалов, а также порошков и смесей на их основе при описании поведения ударно-сжатых материалов в диапазоне давления выше 5 ГПа. Поведение конденсированных фаз моделируется, используя уравнения состояния типа Ми – Грюнайзена. Данное уравнение состояния широко применяется в решениях практических задач, при этом вид и параметры уравнения могут определяться несколькими путями [3–6].

Для решения поставленной задачи уравнения, определяющие состояние конденсированных фаз пористой смеси, записываются в предположении, что давление и внутреннюю энергию можно определить в виде

$$P(\rho, T) = P_x + P_T \quad \text{и} \quad E(\rho, T) = E_x + E_T.$$

Холодная составляющая давления P_x описывается уравнением типа уравнения Тэ-

¹ Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 13-03-00663).

та. Тогда уравнение состояния для каждого i -го компонента с текущей и начальной плотностью ρ_i , ρ_{i0} и теплоемкостью c_{vi} имеет вид

$$P = A_i((\rho_i/\rho_{i0})^n - 1) + \Gamma_i c_{vi}(T - T_0),$$

где $i = 1, 2, \dots$. Для газа используется уравнение состояния идеального газа. В рамках данной модели (в предположении, что ударная адиабата смеси существует) записываются условия динамической совместности на фронте волны: условия сохранения потока массы для каждого компонента смеси и условия сохранения потоков импульса и энергии для смеси в целом. В [1] показано, что полученных уравнений в совокупности с уравнением состояния каждого компонента достаточно для нахождения зависимостей типа $P(U)$ или $D(U)$ (P, U, D – давление, массовая и волновая скорости соответственно), которые можно трактовать как ударные адиабаты многокомпонентной смеси. Для смеси с двумя твердыми компонентами, имеющими начальные объемные доли μ_{10} и μ_{20} , можно получить следующие выражения [2]:

$$P = \frac{Z_1 + Z_2 \frac{\mu_{20}\sigma_1}{\mu_{10}\sigma_2}}{h_1 + \frac{\mu_{20}\sigma_1}{\mu_{10}\sigma_2} h_2 + \frac{(1-\mu_{10}-\mu_{20})\sigma_1}{\mu_{10}\sigma_g} h_3 - \frac{\sigma_1}{\mu_{10}}}, \quad (1)$$

где

$$Z_i = A_i \left[\left[h_i - \frac{n_i + 1}{n_i - 1} \right] \sigma_i^{n_i} + \frac{2n_i \sigma_i}{n_i - 1} h_i - 1 \right],$$

$$h_i = \frac{2}{\Gamma_i} + 1, \quad i = 1, 2; \quad h_3 = \frac{2}{\gamma - 1} + 1.$$

Здесь $\sigma_1 = \rho_1/\rho_{10}$, $\sigma_2 = \rho_2/\rho_{20}$, $\sigma_g = \rho_g/\rho_{g0}$ – степени сжатия соответствующего компонента, а ρ_g , ρ_{g0} текущая и начальная плотности газа. Учитывая равенство температур компонентов, получаем в итоге 3 уравнения для 4 переменных P , σ_1 , σ_2 , σ_g , позволяющие построить ударную адиабату смеси. Для получения уравнений, соответствующих чистому веществу, достаточно положить $\mu_{20} = 0$, тогда пористое вещество будет описываться как смесь с одним конденсированным компонентом.

Так как пористые материалы характеризуются существенным ростом температуры при динамическом воздействии, была сделана попытка рассматривать коэффициент Грюнайзена, зависящим в явном виде только от температуры [1, 2]:

$$\Gamma(T) = \frac{1}{\frac{1}{\Gamma(T_0) - \Gamma(T_\infty)} + C * (T - T_0)} + \Gamma(T_\infty), \quad (2)$$

$\Gamma(T_0)$ берется на основании известных данных при нормальных условиях. Значение коэффициента C , позволяющее описывать экспериментальные точки при средних сжатиях, определяется по промежуточному значению $\Gamma(T^*)$ при температуре $T = T^*$, асимптотическое значение $\Gamma(T_\infty)$ – соответствует максимальным сжатиям:

$$\Gamma(T) \rightarrow \Gamma(T_0) \text{ при } T \rightarrow T_0, \quad \Gamma(T) \rightarrow \Gamma(T_\infty) \text{ при } T \rightarrow T_\infty.$$

Значения параметров A , n , T^* , $\Gamma(T^*)$ и $\Gamma(T_\infty)$ модели ТЕС для материалов, использовавшихся в качестве компонентов исследуемых смесей, определялись по соответствию результатов расчета экспериментальным данным по ударно-волновому воздействию на сплошные образцы этих материалов. Эксперименталь-

ные данные, приведенные в данной работе, брались на сайте [7], а также из сборника экспериментальных данных [8]. Использовались данные о свойствах материалов при динамических нагрузках по давлению в диапазоне от 5 до 20000 ГПа. В таблице приведены значения параметров для компонентов, входящих в состав рассмотренных далее смесей (железо, углерод (алмаз), сера, медь, вольфрам, кремний).

Компонент	A , ГПа	P , г/см ³	n	c_v , Дж/кгК	$\Gamma(T_0)$	$\Gamma(T_*)$	T_* , К·10 ⁻³	$\Gamma(T_\infty)$
Fe	59,07	7,879	3,2	574	1,68	1,48	23	0,51
C	200	3,515	2,6	500	1,1	0,65	20	0,60
S	15,47	1,740	2,7	1000	1,46	0,85	23	0,50
Cu	34,83	8,930	4,0	380	1,91	1,25	23	0,51
W	101,8	19,235	3,1	140	1,61	1,35	23	0,40
Si	0,90	2,360	7,5	714	0,74	0,35	10	0,10

На рис. 1 показаны результаты расчетов ударной адиабаты железа (зависимость давления от степени сжатия $\sigma = \rho/\rho_0$).

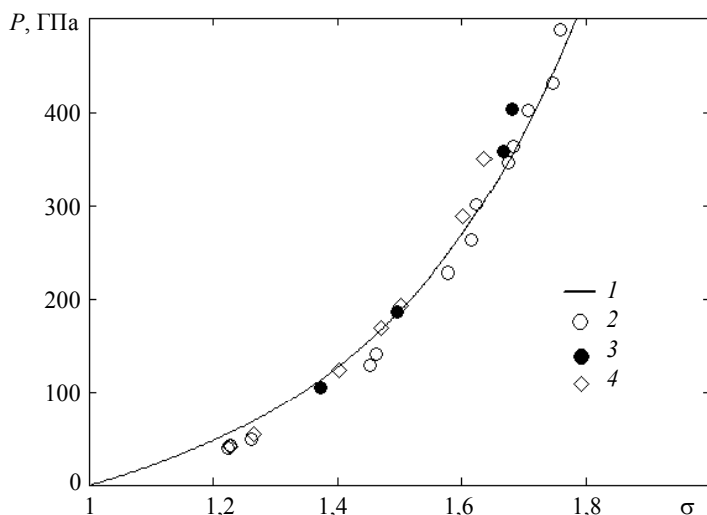


Рис. 1. Ударная адиабата сплошного железа. Расчет по модели ТЕС – 1; экспериментальные данные: 2 – [9], 3 – [10], 4 – [11]

Определенные для железа по модели ТЕС параметры позволили описать экспериментальные результаты и для сверхвысоких сжатий. Наличие расчетов состояния железа вдоль ударных адиабат по другим моделям позволяет производить сравнение с используемой моделью. Диаграмма состояний железа, на которой нанесены расчетная ударная адиабата и экспериментальные точки по динамическому сжатию сплошного железа $m = 1$ (пористость m далее определяется как отношение плотностей сплошного и пористого материалов) в области высоких давлений, приведена на рис. 2 и 3. Для сравнения приведены расчеты ударной адиабаты сплошного железа, полученные по химической модели [12] и по модели ТЕС. Сравнение проводится наложением расчетов по модели ТЕС на графики,

приведенные в [13]. Результаты расчетов, представленные на рис. 2 в координатах давление – сжатие и рис. 3 в координатах волновая – массовая скорости, демонстрируют более чем удовлетворительное (не только по качественному поведению, но и по величине динамических характеристик на ударной адиабате) совпадение расчетных результатов модели ТЕС с экспериментальными данными различных авторов в пределах точности эксперимента.

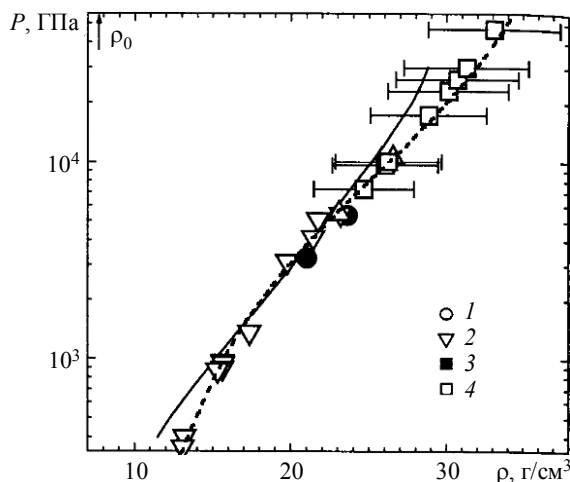


Рис. 2. Ударная адиабата сплошного железа ($m = 1$). Расчет: сплошная линия – результаты расчета [12], пунктирная линия – расчет по ТЕС, стрелка – нормальная плотность железа. Экспериментальные данные: 1 – [14], 2 – [15], 3 – [16]

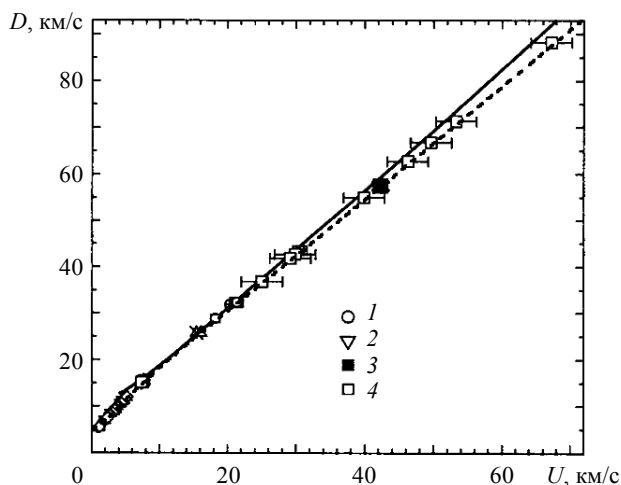


Рис. 3. Ударная адиабата сплошного железа ($m = 1$). Обозначения те же, что и на рис. 2

Достоверное описание ударных адиабат для сплошного железа при помощи рассматриваемой модели ТЕС достигается и для пористых образцов железа. Расчеты ударных адиабат пористого железа показали удовлетворительное согласие с результатами многочисленных измерений. Следует учесть, что расчеты для пористого железа проводились без использования подгонки, то есть параметры модели, определенные для сплошного материала, далее использовались для описания поведения пористых веществ без дополнительных уточнений, позволяя при этом описывать экспериментальные данные в широком диапазоне пористостей и давлений.

На рис. 4 представлена $P - \sigma$ -диаграмма пористого железа. Эти результаты показывают хорошее совпадение расчетов с экспериментальными данными для железа с пористостью $m = 1,42, 1,83, 3,28, 10$. Учет зависимости (2) коэффициента Грюнайзена от температуры при высоких динамических нагрузках пористых материалов позволил расширить диапазон достоверного описания экспериментальных данных, как по пористости, так и по давлению.

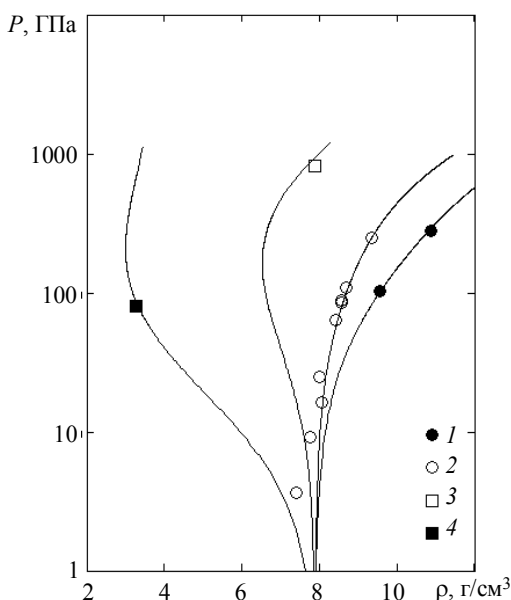


Рис. 4. Ударные адиабаты пористого железа. Расчеты по модели ТЕС с соответствующими экспериментам пористостями – сплошные линии. Экспериментальные данные: 1 – ($m = 1,42$) [9], 2 – ($m = 1,83$), 3 – ($m = 3,28$) [17], 4 – ($m = 10$) [18]

Техника мощных ударных волн позволяет получить высокие давления и температуры в сжатом веществе, в то время как область понижения плотностей со стороны конденсированных состояний оказывается недоступной для этих методов исследования [19]. Для продвижения в эту область используется метод адиабатического расширения [20]. Рассматриваемая модель позволяет описывать изэнтропы разгрузки. Система уравнений, описывающая изменение термодинамических величин вдоль изэнтропы, включает уравнение изэнтропы $dE = -PdV$ и уравнение

состояния. Уравнение изэнтропы, проходящей через точку P_{1r} , σ_1 на ударной адиабате, где σ – отношение плотностей, имеет вид [21].

$$P = P_x(\sigma) + P_{1r}(\sigma/\sigma_1)^{\gamma+1}. \quad (3)$$

Приращение массовой скорости Δu при изэнтропическом расширении из начального состояния P_1 , σ_1 , u_1 до давления P равно

$$\Delta u = \int_{P_1}^P \sqrt{-dPdV}, \quad (4)$$

где давление берется вдоль изэнтропы (3). Полная скорость частиц предварительно сжатого ударной волной вещества $u = u_1 + \Delta u$ [21].

Сравнения расчетов для сплошной меди ($m = 1$) и никеля ($m = 1$) по модели ТЕС с экспериментальными данными были показаны в [1]. На рис. 5 аналогичные результаты представлены для железа ($m = 1$). Сплошной линией показана ударная адиабата, пунктиром – изэнтропы из начальных точек 98, 154 и 193 ГПа. Из результатов, показанных на рис. 5, видно, что описание экспериментальных данных по адиабатической разгрузке сплошного железа вполне достоверно.

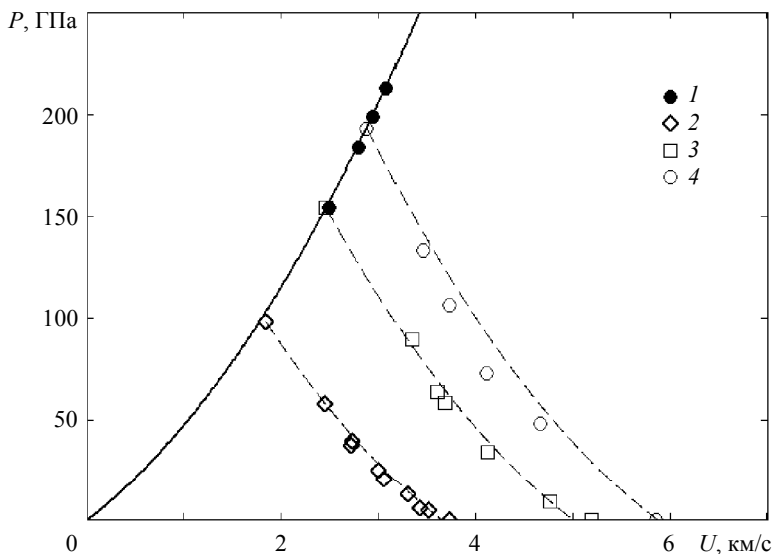


Рис. 5. Расчет по модели ТЕС: ударная адиабата, адиабатическая разгрузка сплошного железа ($m = 1$). Экспериментальные данные: 1 – [8], 2, 3 – [22], 4 – [8]

Полученные результаты показывают возможность описания в широком диапазоне сжатий как монолитного, так и пористого железа с использованием предложенной зависимости функции Грюнайзена в явном виде только от температуры.

При расчетах ударно-волнового воздействия на смеси рассматривались как пористые смеси, так и сплавы. Расчеты по сплавам можно рассматривать как тестовые, ввиду того, что для них имеется большое количество экспериментальных данных. Положив объемную долю воздуха равной 0, получаем возможность проводить расчеты для сплавов, рассматривая сплав как смесь с пористостью $m = 1$. Расчеты, выполненные для сплавов никеля с медью и железа с медью по модели

ТЕС [2], подтвердили это предположение для давлений выше 5 ГПа, при которых данная модель достоверно описывает поведение чистых веществ. На рис. 6 для сплавов железа с кремнем (массовые доли 75/25) и железа с медью (52/48) представлены расчетные и экспериментальные зависимости давления от плотности. Видно, что результаты расчета по модели ТЕС хорошо согласуются с данными, полученными на основании эксперимента.

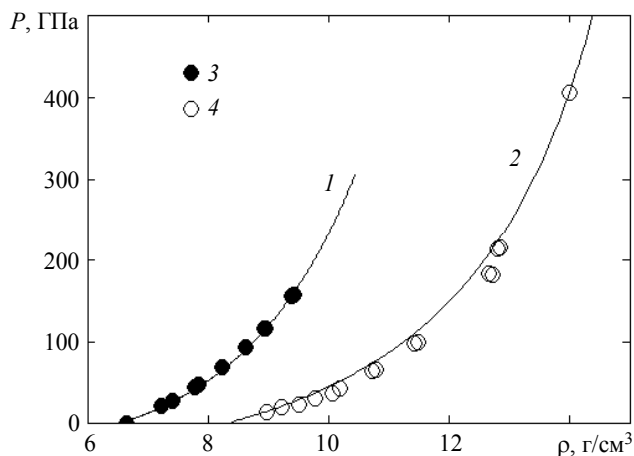


Рис. 6. Ударные адиабаты сплавов железа. Расчет по модели ТЕС: 1 – железо и кремний, 2 – железо и медь. Эксперимент: 3 – железо и кремний $\rho_{S0} = 6,648 \text{ г/см}^3$ [23], 4 – железо и медь $\rho_{S0} = 8,30 \text{ г/см}^3$ [8]

Дополняя соответствующие уравнения, несложно получить выражение, аналогичное (1) для большего количества компонентов смеси и построить ударную адиабату по модели ТЕС. Расчеты для тройных сплавов вольфрама–никеля–железа WNZh-90 и WNZh-95 приведены в [1]. Сравнение расчетных параметров по модели ТЕС для тройных сплавов, содержащих железо и кремний, с данными, полученными на основании экспериментов, показано на рис. 7. Расчет проведен для сплава железа, кремния и вольфрама с содержанием железа 79,8 %, кремния 17,8 % и вольфрама 0,4 % (средняя плотность образцов $\rho_0 = 7,016 \text{ г/см}^3$), соответственно экспериментальным данным [24]. На этом же рисунке показаны результаты расчета для ферросилиция с содержанием железа 81,3 %, кремния 17,4 % и углерода (алмаз) 1,1 % ($\rho_0 = 6,91 \text{ г/см}^3$); результаты по экспериментальным данным для которого были опубликованы в [25]. Показано, что для данных сплавов полученные результаты расчетов по модели ТЕС не противоречат данным экспериментов. Для наглядности расчет и данные, полученные на основании эксперимента, для второго сплава приведены со сдвигом по плотности

Можно отметить, что ранее в [2] смесь алмаза с ВК6 (сплав карбида вольфрама с кобальтом) рассчитывалась как трёхкомпонентная смесь и было показано удовлетворительное согласие расчетов и данных, полученных на основании экспериментов. Для этих расчетов на основании данных по массовым долям компонентов сплава и состава смеси были определены объемные доли отдельно для всех компонентов смеси (для карбида вольфрама, кобальта и конденсированной фазы алмаза).

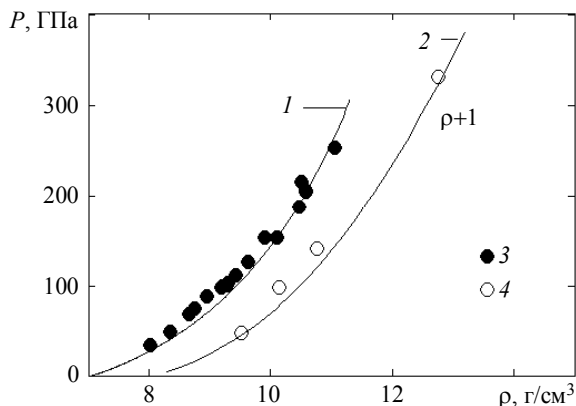


Рис. 7. Ударные адиабаты тройных сплавов железа. Расчет по модели ТЕС: 1 – железо, кремний, вольфрам; 2 – железо, кремний, углерод (алмаз). Экспериментальные данные: 3 – [24], 4 – [25]

Параметры модели, с которыми выше удалось достоверно описать поведение сплошного и пористого железа в широком диапазоне давлений, позволили определить и динамические параметры порошковых смесей на основе железа. В [5] приведены экспериментальные результаты для смеси железа и алмаза с массовыми долями 90/10, начальной плотностью смеси $\rho_{s0} = 7,00 \text{ г/см}^3$ (для данной смеси $m = 1,083$), а также для смеси железа и серы с $\rho_{s0} = 6,16 \text{ г/см}^3$, массовыми долями 90/10 и $m = 1,045$. Результаты расчета с теми же пористостями для сравнения с данными, полученными на основании эксперимента, приведены на рис. 8. Расчет и данные для второй смеси приведены со сдвигом по плотности.

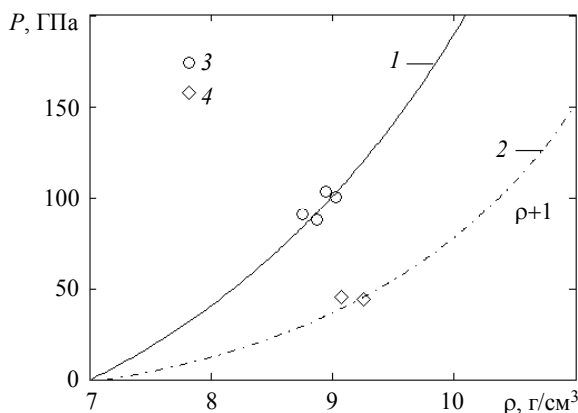


Рис. 8. Ударные адиабаты смесей железа. Расчет: 1 – железо и алмаз (90/10) с $m = 1,083$, 2 – железо и сера (90/10) с $m = 1,045$. Эксперимент [5]: 3 – железо и алмаз (90/10), 4 – железо и сера (90/10)

Таким образом, в данной работе рассмотрена достаточно простая модель расчета ударных адиабат пористых материалов, позволяющая производить достоверные расчеты для пористых смесей, одним из компонентов которых является железо. Показано, что модель адекватно описывает известные экспериментальные ре-

зультаты для сплошного и пористого железа, а также смесей и сплавов на его основе, для которых имеются экспериментальные данные. Данная модель может быть использована для подбора соотношений компонентов смеси с целью получения заданных параметров сплошных и пористых материалов при воздействии ударными волнами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кинеловский С.А., Маевский К.К. Простая модель расчета ударных адиабат порошковых смесей // ФГВ. 2011. № 6. С. 101–109.
2. Кинеловский С.А., Маевский К.К. Модель поведения смеси с различными свойствами компонентов при высокой концентрации энергии // ПМТФ. 2013. Т. 54. № 4. С. 13–21.
3. Медведев А.Б., Трунин Р.Ф. Ударное сжатие пористых металлов и силикатов // УФН. 2012. Т. 182. № 8. С. 829–846.
4. Дреннов О.Б. Динамическое нагружение твердых тел, характеризующихся отрицательным наклоном кривой плавления // ЖТФ. 2013. Т. 83. № 9. С. 43–46.
5. Титов В.М., Анисичкин В.Ф., Бордзиловский С.А., Караханов С.М., Туркин А.И. Измерение скорости звука за фронтом ударной волны в смесях железа с алмазом // ФГВ. 2004. Т. 40. № 4. С. 117–130.
6. Герасимов А.В., Паишков С.В. Численное моделирование пробития слоистых преград // Механика композиционных материалов и конструкций. 2013. Т. 19. № 1. С. 49–62.
7. База данных ударно-волновых экспериментов / ОИВТ РАН. URL: <http://www.ihed.gas.ru/rusbank/>.
8. Трунин Р.Ф., Гударенко Л.Ф., Жерноклетов М.В., Симаков Г.В. Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ / под ред. Р.Ф. Трунина. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006.
9. Альтишулер Л.В., Крупников К.К., Леденев Б.Н., Жучигин В.И., Бражник М.И. Динамическая сжимаемость и уравнения состояния железа при высоких давлениях // ЖЭТФ. 1958. Т. 34. С. 874–885.
10. Альтишулер Л.В., Кормер С.Б., Баканова А.А., Трунин Р.Ф. Уравнение состояния алюминия, меди и свинца для области высоких давлений // ЖЭТФ. 1960. Т. 38. № 3. С. 790–798.
11. Альтишулер Л.В., Кормер С.Б., Бражник М.И., Владимиров Л.А., Сперанская М.П., Фунтиков А.И. Изэнтропическая сжимаемость алюминия, меди, свинца и железа при высоких давлениях // ЖЭТФ. 1960. Т. 38. № 4. С. 1061–1073.
12. Иосилевский И.Л. Об уравнении состояния неидеальной плазмы // Теплофизика высоких температур. 1980. Т. 18. № 3. С. 447–452.
13. Грязнов В.К., Иосилевский И.Л., Фортон В.Е. Термодинамика ударно-сжатой плазмы в квазихимическом представлении // Энциклопедия низкотемпературной плазмы (под ред. В.Е. Фортова). Том приложений III-1 / Ред. А.Н. Старостин и И.Л. Иосилевский, М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004.
14. Альтишулер Л.В., Моисеев Б.Н., Попов Л.В., Симаков Г.В., Трунин Р.Ф. Сравнительная сжимаемость железа и свинца при давлениях 31–34 Мбар // ЖЭТФ. 1968. Т. 54 № 3. С. 785–789.
15. Трунин Р.Ф., Подурец М.А., Попов Л.В., Моисеев Б.Н., Симаков Г.В., Севастьянов А.Г. Определение ударной сжимаемости железа до давлений в 10 ТПа (100 Мбар) // ЖЭТФ. 1993. Т. 103. № 6. С. 2189–2199.
16. Аврорин Е.Н., Водолаза Б.К., Волошин Н.П., Куропатенко В.Ф., Коваленко Г.В., Симоненко В., Черноволюк Б.Т. Экспериментальное подтверждение оболочечных эффектов на ударных адиабатах алюминия и свинца // Письма в ЖЭТФ. 1986. Т. 43. № 5. С. 241–244.
17. Трунин Р.Ф., Медведев А.Б., Фунтиков А.И., Подурец М.А., Симаков Г.В., Севастьянов А.Г. Ударное сжатие пористого железа, меди и вольфрама и их уравнения состояния в области терапаскальных давлений // ЖЭТФ. 1989. Т. 95. С. 631–641.

18. Trunin R.F., Zhernokletov M.V., Simakov G.V., Gudarenko L.F., Gushchina O.N. Shock compression of highly porous samples of copper, iron, nickel and their equation of state / Shock Compression of Condensed Matter – 1997. Prog. Am. Phys. Society Topical Group. Amherst. Massachussets. 1998. P. 83–86.
19. Аврорин Е.Н., Водолага Б.К., Симоненко В.А., Фортков В.Е. Мощные ударные волны и экстремальные состояния вещества // УФН. 1993. Т. 163. № 5. С. 1–34.
20. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.
21. Методы исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках / под ред. М.И. Жерноклетова. Саров: ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003.
22. Жерноклетов М.В., Симаков Г.В., Сутолов Ю.Н., Трунин Р.Ф. Изэнтропы расширения алюминия, железа, молибдена, свинца и тантала // Теплофизика высоких температур. 1995. Т. 33. № 1. С. 40–43.
23. LASL Shock Hugoniot Data / Marsh P., ed. Berkeley. Univ. California Press, 1980. P. 205.
24. Compendium of shock wave data / M. van Thiel (Ed.) Livermore. Lawrence Livermore Laboratory Report UCRL-50108. 1977. P. 658.
25. Кормер С.И., Фунтиков А.Н. Исследование ударного сжатия ферросилиция и возможный состав Земли // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1965. № 5. С. 1–3.

Статья поступила 27.02.2014 г.

Kinelovskii S. A., Maevskii K. K. A BEHAVIOR MODEL FOR POROUS IRON CONTAINING MIXTURES UPON SHOCK WAVE LOADING.

Results of numerical experiments on modeling shock wave loading of solid and porous mixes and alloys containing iron in their composition as a component are presented. The model is based on the assumption that all the mixture components, including gas, are in the thermal equilibrium upon the shock wave loading. The Mie–Grüneisen type equations of state are used to describe the behavior of the condensed phases. The Grüneisen coefficient is assumed to be explicitly dependent only on temperature. This TEC model describes the behavior of solid and porous iron in a wide range of porosity and pressures. The model allows one to describe the behavior of mixtures containing iron and alloys; the alloy is considered as a nonporous mixture with the same ratio of components as in the alloy. Only the equations of state of the mixture components are used for the calculation of the shock wave effect on them.

The interest in the research of materials containing iron is associated with the widespread occurrence of iron in the nature, which makes the TEC model promising for simulating the Earth's crust, as well as for solving problems of explosive power compaction to produce materials with given properties. The calculations were conducted for mixtures and alloys of different compositions containing iron. The calculation well corresponds to the data that were received based on experiments performed by many authors. It is shown that the proposed model allows one to describe the behavior of materials containing iron in the shock wave loading using only the component parameters.

Keywords: shock adiabat, porous heterogeneous medium, thermodynamic equilibrium, one-temperature approximation, one-speed approximation, Grüneisen coefficient.

KINELOVSKII Sergey Anatolevich (Doctor of Physics and Mathematics, Prof., Lavrentyev Institute of hydrodynamics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Novosibirsk, Russian Federation)

E-mail: skin@hydro.nsc.ru

MAEVSKII Konstantin Konstantinovich (Candidate of Physics and Mathematics, Lavrentyev Institute of hydrodynamics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Novosibirsk, Russian Federation)

E-mail: konstantinm@hydro.nsc.ru

REFERENCES

1. Kinelovskii S.A., Maevskii K.K. Simple model for calculating shock adiabats of powder mixtures (2011) *Combustion, Explosion and Shock Waves*. V. 47, pp. 706–714.
2. Kinelovskii S.A., Maevskii K.K. Model of the behavior of the mixture with different properties of the species under high dynamic loads (2013) *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. V. 54, pp. 524–530.
3. Medvedev A.B., Trunin R.F. Shock compression of porous metals and silicates (2012) *Phys. Usp.* V. 55, pp. 773–789.
4. Drennov O.B. Dynamic Loading of Solids with a Negative Slope of the Melting Curve (2013) *Technical Physics*. V. 83(9), pp. 1284–1287.
5. Titov V.M., Anisichkin V.F., Bordzilovskii S.A., Karakhanov S.M., Turkin A.I. Measurement of the Sound velocity behind a Shock-Wave Front in Mixtures of Iron with Diamond (2004) *Combustion, Explosion and Shock Waves*. V. 40(4), pp. 477–488.
6. Gerasimov A.V., Pashkov S.V. Numerical Simulation of the Perforation of Layered Barriers (2013) *Composites: Mechanics, Computations, Applications. An International Journal*. V. 4(2), pp. 97–111.
7. Levashov P.R., Khishchenko K.V., Lomonosov I.V., Fortov V.E. Database on Shock-Wave Experiments and Equations of State Available via Internet. Shock Compression of Condensed Matter – 2003. Eds. M.D. Furnish, Y.M. Gupta, J.W. Forbes. Melville – New York, AIP, 2004. P. 87. (<http://www.ihed.ras.ru/rusbank/>, <http://www.ficp.ac.ru/rusbank/>).
8. Trunin R.F., Gudarenko L.F., Zhernokletov M.V., Simakov G.V. Experimental data on shock-wave compression and adiabatic expansion of condensed matter. Sarov, RFNC – VNIIEF Publ., 2006. [in Russian].
9. Al'tshuler L.V., Krupnikov K.K., Ledenev B.N., Zhuchikhin V.I., Brazhnik M.I. Dynamical compressibility and equation of state for iron under high pressure (1958) *Sov. Phys. – JETP*. V. 7, pp. 606–613.
10. Al'tshuler L.V., Kormer S.B., Bakanova A.A., Trunin R.F. Equations of state for aluminum, copper and lead in the high pressure region (1960) *Sov. Phys. – JETP*. V. 11, pp. 573–579.
11. Al'tshuler L.V., Kormer S.B., Brazhnik M.I., Vladimirov L.A., Speranskaya M.P., Funtikov A.I. The isentropic compressibility of aluminum, copper, lead at high pressures (1960) *Sov. Phys. – JETP*. V. 11(4), pp. 766–775.
12. Iosilevskiy I.L. Equation of State of the non-ideal plasma (1980) *High. Temp.* V. 18(3), pp. 447–452.
13. Gryaznov V.K., Iosilevskiy I.L., Fortov V.E. *Termodinamika udarno-szhatoy plazmy v kvazikhimicheskom predstavlenii. Entsiklopediya nizkoterperaturnoy plazmy (pod red. V.E. Fortova). Tom prilozhenii III-1. Red. A.N. Starostin i I.L. Iosilevskiy. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004. (in Russian)*
14. Al'tshuler L.V., Moiseev B.N., Popov L.V., Simakov G.V., Trunin R.F. Relative compressibility of iron and lead at pressures of 31 to 34 Mbar (1968) *Sov. Phys. – JETP*. V. 27(3), pp. 420–422.
15. Trunin R.F., Podurets M.A., Moiseev B.N., Simakov G.V., Sevast'yanov A.G. Determination of the shock compressibility of iron at pressures up to 10 TPa (100 Mbar) (1993) *Sov. Phys. – JETP*. V. 76(6), pp. 1095–1098.
16. Avrorin E.N., Vodolaga B.K., Voloshin N.P., Kuropatenko V.F., Kovalenko G.V., Simonenko V.A., Chernovoluyuk B.T. Experimental confirmation of shell effects on the shock adiabats of aluminum and lead (1986) *JETP Lett.* V. 43(5), pp. 308–311.
17. Trunin R.F., Medvedev A.B., Funtikov A.I., Podurets M.A., Simakov G.V., Sevast'yanov A.G. Shock compression of porous iron, copper, and tungsten and their equation of state in terapascal pressure range (1989) *Sov. Phys. – JETP*. V. 68(2), pp. 356–361.
18. Trunin R.F., Zhernokletov M.V., Simakov G.V., Gudarenko L.F., Gushchina O.N. Shock compression of highly porous samples of copper, iron, nickel and their equation of state. *Shock Compression of Condensed Matter – 1997. Prog. Am. Phys. Society Topical Group. Amherst, Massachussets, 1998, pp. 83–86.*

19. Avrorin E.N., Vodolaga B.K., Simonenko V.A., Fortov V.E. Intense shock waves and extreme states of matter (1993) *Phys. Usp.* V. 36(5), pp. 337–364.
20. Zel'dovich Ya.B., Raizer Yu.P. *Physics of Shock Waves and High-Temperature Hydrodynamic Phenomena*. New York, Academic, 1966.
21. *Metody issledovaniya svoystv materialov pri intensivnykh dinamicheskikh nagruzkakh* / pod red. M.I. Zhernokletova. Sarov, FGUP RFYaTs-VNIIEF, 2003. (in Russian)
22. Zhernokletov M.V., Simakov G.V., Sutulov Yu.N., Trunin R.F. Izentropy rasshireniya alyuminiya, zheleza, molibdena, svintsa i tantala (1995) *Teplofizika vysokikh temperatur*. V. 33. No. 1, pp. 40–43. (in Russian)
23. *LASL Shock Hugoniot Data* / Marsh P. (Ed.) Berkeley, Univ. California Press, 1980. P. 205.
24. *Compendium of shock wave data* / M. van Thiel (Ed.) Livermore. Lawrence Livermore Laboratory Report UCRL-50108, 1977. P. 658.
25. Kormer S.I., Funtikov A.N. Issledovanie udarnogo szhatiya ferrosilitiya i vozmozhnyy sostav Zemli (1965) *Izv. AN SSSR, Fizika Zemli*. No. 5, pp. 1–3. (in Russian)