

Расчет высокоскоростного столкновения металлических образцов методом конечных объемов на подвижной сетке.

Ериклинцев Илья Витальевич, Козлов Сергей Александрович

Институт автоматизации проектирования РАН

erik.lite@gmail.com

Высокоскоростной удар, как метод экспериментального исследования состояний вещества при высоких и сверхвысоких давлениях (> 10 ГПа) и энергиях применяется достаточно давно, первые эксперименты были проведены еще Зельдовичем [1]. Основная идея состоит в том чтобы, измерить параметры ударных волн, которые возникают при ударе снаряда в мишень и по ним восстановить давление, плотность и удельную внутреннюю энергию сразу за фронтом волны. Получаемые в результате состояния зависят от свойств используемых материалов и скорости удара.

Детальное изучение динамики процесса крайне затруднено в связи с тем, что характерное время столкновения составляет несколько микросекунд, а так же с труднодоступностью для наблюдения самой зоны столкновения. Помимо этого экспериментально наблюдается развитие неустойчивостей границы мишени и снаряда [2]. Численное моделирование в данной ситуации является основным способом исследовать процесс в динамике.

Мы используем в качестве математической модели процесса модель идеальной жидкости. В такой модели свойства материалов полностью описываются уравнением состояния в виде $p = p(\rho, e)$, где p – давление, ρ – плотность, а e – удельная внутренняя энергия. Данные зависимости сильно различаются для различных металлов и должны описывать состояние вещества в широком диапазоне значений термодинамических параметров (в том числе жидкую и газообразную фазу, плазму). Для данной задачи были использованы широкодиапазонные уравнения состояния, полученные и экспериментально проверенные Фортовым, Ломоносовым и др. [3].

В данной работе мы детально исследуем процесс столкновения двух бесконечно широких металлических пластин конечной толщины. Первая пластина находится в состоянии покоя и упирается левой границей в твердую стенку. Вторая пластина расположена непосредственно вблизи от правого края первой пластины и имеет скорость $V = 470$ м/с направленную на столкновение. Первая пластина состоит из стали, вторая из свинца. Толщина первой пластины $d_{steel} = 3$ мм, а второй $d_{lead} = 2$ мм.

Для моделирования данной задачи важно отслеживать положение границы раздела веществ и свободной границы снаряда, что приводит к необходимости использовать соответствующие методы. Нами использовался метод конечных объемов на подвижной сетке, узлы которой всегда располагаются точно на отслеживаемых границах. Высокий порядок метода по пространству достигался с помощью MOOD реконструкции описанной в работе[4].

После столкновения возмущение начинает распространяться от места столкновения в виде двух ударных волн сжатия в каждой из пластин. На Рис. 1. показан профиль плотности в момент $t = 0.3$ мкс и обозначены значения температуры, давления и скоростей среды и звука за фронтом каждой волны. Получаем, что для волны сжатия в стали скорость составляет приблизительно $D_{Steel} = 4776$ м/с, а для волны сжатия в свинце $D_{Lead} = 1967$ м/с.

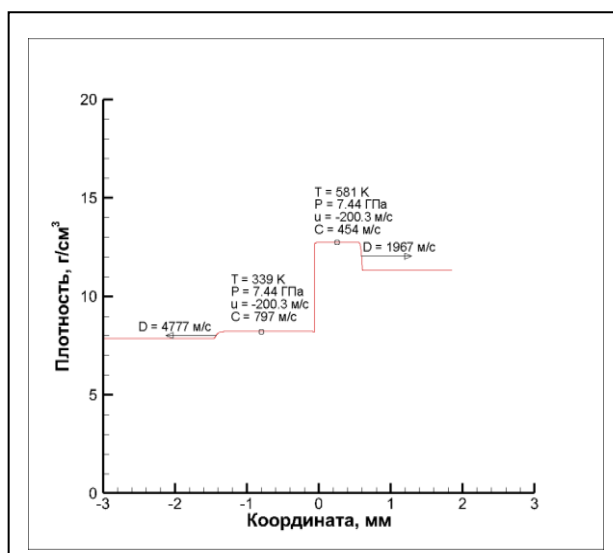


Рис.1. Профиль плотности и некоторые параметры за фронтом ударных волны в момент времени 0.3 мкс .

Также были проведены расчеты с медной мишенью. Мы имели возможность расположить виртуальные датчики в некоторых точках среды, в которых во время расчета записываются интересующие нас показатели (значение давления, скорости среды). В данном исследовании мы использовали датчики, помещенные в ячейках, которые в начальный момент времени были расположены:

- В мишени на глубине 1.5 мм от поверхности соударения
- В ударнике на глубине 1.0 мм от поверхности соударения

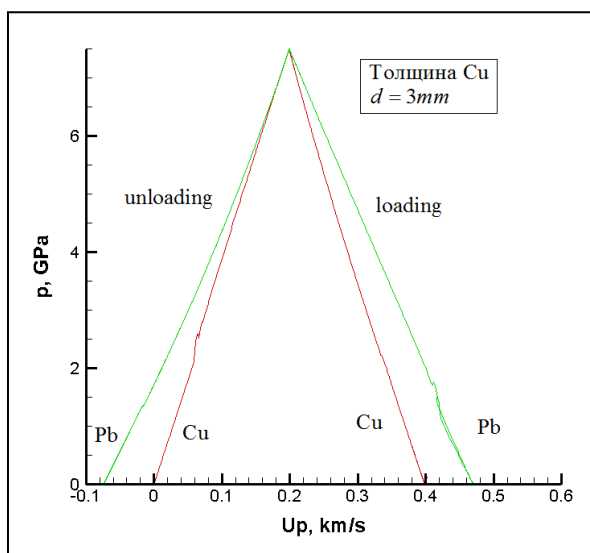


Рис.2. На графике приведены кривые нагрузки и кривые разгрузки, полученные по данным с датчиков в меди и свинце в ходе расчета. Расчет проводился до времени 2 мкс, толщина медной мишени равнялась 3мм, свинцового ударника 2мм..

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-11-00719.

Список публикаций:

[1] Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. // М.: Наука, 1966.

- [2] Mikhailov A. L., *Hydrodynamic instabilities in solid media - from the object of investigation to the investigation tool.* // *Phys. Mesomech.* **10**, 265–274 (2007).
- [3] Fortov V. E., Lomonosov I. V. *Equations of State of Matter at High Energy Densities.* // *Plasma Phys.* **007**, 122–130 (2010).
- [4] S. Clain, S. Diot, and R. Loubere. *A high-order finite volume method for systems of conservation laws - Multi-dimensional Optimal Order Detection (MOOD).* *Journal of Computational Physics*, 230:4028–4050, 2011.