

УДК 536.331 +536.71

*В. Ф. Лосев, Д. М. Лубенко, П. А. Пальянов, И. И. Шабалин***Формирование ударной волны в металле в процессе поглощения короткого импульса лазерного излучения****V. F. Losev, D. M. Lubenko, P. A. Palyanov, I. I. Shabalin***Shock Wave Generation in a Metal during Absorption of a Short Laser Pulse**

Выполнен первый этап построения численного инструментария для моделирования быстротекающих процессов в тонких металлических пленках под действием коротких мощных импульсов лазерного излучения. Для поглощения лазерного излучения металлом выбрана гиперболическая двухтемпературная модель, которая определяет, каким образом энергия лазерного импульса преобразуется в тепло решетки исследуемого металла. Движение материала описывается системой уравнений одномерной гидродинамики с малопараметрическим уравнением состояния. Построена согласованная разностная схема для совместного решения указанных выше моделей. Проведены методические расчеты по верификации кода. Профили электронной и решеточной температур сравнивались с результатами расчета других авторов, расхождение не существенное и обусловлено применением согласованной разностной схемы. Погрешности при вычислении амплитуды давления и скорости распространения ударной волны по металлу не превышают 1% от теоретических. Определены условия формирования ударной волны.

Ключевые слова: лазерный импульс, ударная волна, уравнение состояния.

DOI 10.14258/izvasu(2014)1.1-46

Мощные лазеры с ультракоротким импульсом — это важнейший инструмент научных исследований в механике деформируемого твердого тела. В результате воздействия излучения тонкий поверхностный слой облученной мишени переходит в двухтемпературное состояние, когда электронная подсистема металла сильно перегрета относительно кристаллической решетки. Продолжительность этого состояния ограничена временем релаксации 2–20 пс, в зависимости от конкретного металла. В этих условиях температура в перегретом слое может достигать тысяч градусов, а давление — десятков ГПа. Поэтому ультракороткие лазерные импульсы с успехом используются как способ генерации мощных ударных волн в материале, что позволяет выполнить верификацию

This paper presents the first stage of a tool development for numerical simulation of fast transient processes in thin metal films under short intense pulses of laser radiation. Absorption of laser radiation by metals is evaluated by hyperbolic two-temperature model which determines the laser pulse conversion into heat of metal lattice. Behavior of material under examination is described by a system of one-dimensional hydrodynamic equations with a few-parameter equation of state. The latter models use a consistent difference scheme elaborated and presented in the paper. Code verification is performed, and models are used to calculate profiles of electron and lattice temperatures. Calculation results show good agreement with results obtained by others, and slight difference is explained by the use of consistent difference scheme. Calculation errors for pressure amplitude and shock wave speed are less than 1%. Conditions of shock wave generation in metal films are outlined.

Key words: laser pulse, shock wave, equation of state.

уравнений термодинамического состояния вещества, а также, по измерениям профилей давления внутри тела, судить о волновых процессах, связанных с определяющими соотношениями. По скорости тыльной поверхности идентифицируются параметры процесса разрушения металлов [1]. Однако экспериментальные исследования достаточно дороги, поэтому прибегают к изучению поведения материалов с помощью моделирования и лишь на стадии определения конкретных констант модели используют эксперимент.

Цель работы — создание численного инструментария для исследования поведения металлов при высоких скоростях деформирования за фронтом сильной ударной волны, возникающей при поглощении ультракороткого лазерного импульса большой интенсивности.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-08-01218) и СО РАН (междисциплинарный интеграционный проект № 6).

Рассмотрим нагрев тонкой пленки металла коротким импульсом лазерного излучения. Для описания процессов, вызванных поглощением лазерного излучения, применена двухтемпературная модель [2, 3].

$$\begin{cases} c_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = \frac{\partial q_e}{\partial x} - G \cdot (T_e - T_i) + S(x, t), \\ c_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{\partial q_i}{\partial x} + G \cdot (T_e - T_i). \end{cases}$$

Потоки, следуя [4, 5], определим как

$$\begin{aligned} q_e + \tau_e \frac{\partial q_e}{\partial t} &= -K_e \frac{\partial T_e}{\partial x}, \\ q_i + \tau_i \frac{\partial q_i}{\partial t} &= -K_i \frac{\partial T_i}{\partial x}, \end{aligned}$$

здесь, T_e , T_i — температура электронов и решетки; c_e (c_i) — теплоемкость электронов (решетки); K_e и K_i — электронная и решеточная теплопроводность; G — коэффициент передачи энергии от электронов решетке; $S(x, t)$ — источник, который обычно задается в виде

$$S(x, t) = I_0 \cdot (1 - R) \cdot \exp(-x/\delta) \cdot \exp[-b \cdot (t - 2t_p)^2 / t_p^2];$$

b — постоянная; I_0 — интенсивность излучения; R — коэффициент отражения; t_p — длительность импульса; δ — толщина скин слоя; τ_e и τ_i — времена релаксации электронов и фононов.

Следует отметить, что $c_e = A_e \cdot T_e$, $K_e = K_i \cdot T_e / T_i$, A_e — константа материала, при условии, что $T_e < T_F$ температура электронов меньше температуры Ферми.

Одномерное движение сплошной среды описывалось в лагранжевой постановке следующими уравнениями баланса:

$$\begin{aligned} \rho \cdot \Delta V &= \rho_0 \cdot \Delta V_0, \quad \rho \cdot \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x}, \\ \frac{\partial E}{\partial t} + p \cdot \frac{\partial V}{\partial t} &= 0, \end{aligned}$$

которые замыкались малопараметрическим уравнением состояния [6, 7]

$$\begin{aligned} E(V, T) &= E_x(V) + c_{v,l} T + \frac{1}{2} c_{v,e0} T^2 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{2/3} \\ P(V, T) &= - \left(\frac{dE_x}{dV} \right) + \gamma_l \frac{c_{v,l} T}{V} + \frac{1}{3} \frac{c_{v,e0} T^2}{V} \left(\frac{V}{V_0} \right)^{2/3}. \end{aligned}$$

Для численного решения связанной системы уравнений гиперболической двухтемпературной модели поглощения лазерного излучения и одномерной гидродинамики с малопараметрическим уравнением состояния построена согласованная разностная схема. Проведены методические расчеты. Результаты одномерной гидродинамики сравнивались с теорети-

ческими данными по стационарному движению поршня. Погрешность в вычислении амплитуды давления и скорости распространения ударной волны не превышают 1%.

Профили электронной и решеточной температур сравнивались с результатами расчета авторов [5], расхождение несущественное и обусловлено, скорее всего, применением согласованной разностной схемы (рис. 1).

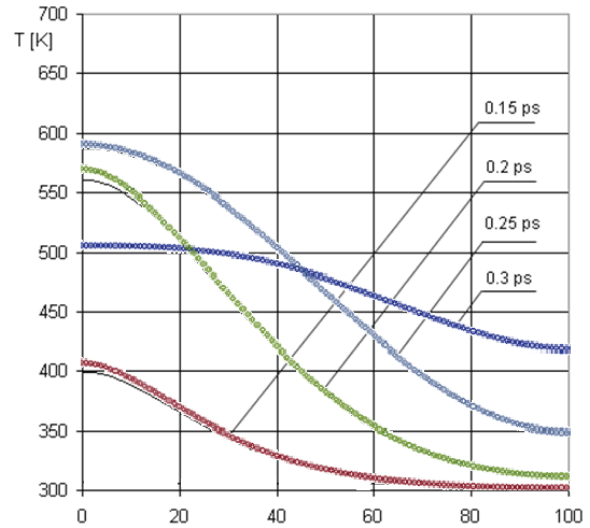


Рис. 1. Сравнение профилей электронной температуры на различные моменты времени, линии — работа [5], значки — авторский расчет

Двухтемпературная модель определяет, каким образом энергия лазерного импульса преобразуется в тепло решетки исследуемого металла. Поскольку в начале процесса поглощения формируется существенная неравновесность температур (рис. 2), необходимо было проверить, как малопараметрическое уравнение состояния [6], полученное из термодинамических соотношений, будет работать в двухтемпературном приближении. В уравнении энергии температурные члены входят аддитивным образом, поэтому тепловая энергия электронов и решетки, рассчитанная из двухтемпературной модели (левая часть уравнений) и по уравнению Ми — Грюнейзена, оказалась одинаковой. Расчеты показали, что малопараметрическое уравнение состояния работоспособно и при неравновесной температуре электронов и решетки.

Дальнейшие расчеты процесса воздействия лазерного импульса на пленку из меди показали, что получить ударную волну в данной постановке задачи невозможно. Причиной является то, что скорость распространения электронной тепловой волны — 684595,0 м/с, решеточной тепловой волны — 13945,5 м/с и объемной звуковой волны — 4178,1 м/с.

Поэтому воздействие лазерного импульса на поверхность медной пленки приводит к быстрому прогреву электронной системы по всей ее толщине (рис. 3) и за счет высокого коэффициента обмена энергией электронов с решеткой происходит «очень быстрое»

нагревание решетки по всей толщине. Причем процесс теплопередачи по «решетке» вносит незначительный вклад в перенос тепла. Гидродинамические процессы слишком медленные, чтобы оказать влияние на установление теплового равновесия.

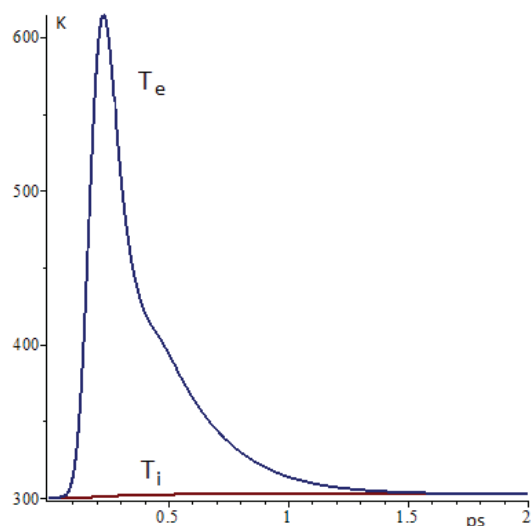


Рис. 2. Динамика поверхностной температуры электронов T_e и решетки T_i

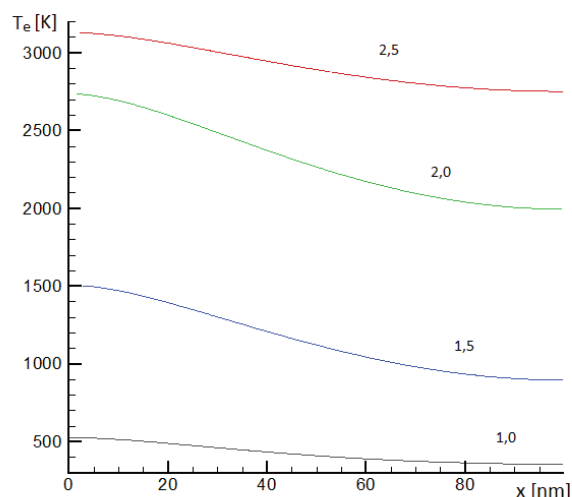


Рис. 3. Распределение электронной температуры по толщине пленки с указанием времени в пикосекундах

Анализ литературы (см., например: [8, 9]) показал, что для адекватного описания процессов формирования ударной волны необходимо учесть фазовые переходы твердое тело — жидкость и жидкость — пар. Это позволит моделировать нагревание металла в приповерхностной зоне передним фронтом импульса до температуры плавления с последующим переводом жидкого металла в пар, что приведет к вкладу энергии в узкой области вблизи по-

верхности, а не «размазыванию» энергии импульса по всей толщине пленки. Локализация энерговклада существенно повысит температуру и тепловое давление в небольшой области лазерного воздействия, а термодинамические скачки объема при фазовых переходах дадут вклад в холодное давление. Распространение области высоких давлений внутрь металлической пленки приведет к формированию ударной волны.

Библиографический список

1. Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортвов В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. — М., 1996.
2. Анисимов С.И., Капелович Б.Л., Перельман Т.Л. Электронная эмиссия с поверхности металлов под действием ультракоротких лазерных импульсов // ЖЭТФ. — 1974. — Т. 66.
3. Lin Z., Zhigilei L.V. and Celli V. Electron-phonon coupling and electron heat capacity of metals under conditions of strong electron-phonon nonequilibrium // Phys. Rev. — 2008. — B77, 075133.
4. Qiu T.Q., Tien C.L. Femtosecond laser heating of multilayer metals — I. Analysis // Int. J Heat and Mass Transfer. — 1994. — Vol. 37.
5. Majchrzak E., Poteralska J. Numerical-analysis-of-short-pulse-laser-interactions-with-thin-metal-film // Archives of foundry eng. — 2010. — Vol. 10.
6. Краус Е.И. Малопараметрическое уравнение состояния твердого тела // Вестник НГУ Сер.: Физика. — 2007. — Т. 2, вып. 2.
7. Краус Е.И. Малопараметрическое уравнение ударной адиабаты с учетом эффекта плавления // Вестник НГУ. Сер.: Физика. — 2008. — Т. 3, вып. 4.

8. Alexiades V., Autrique D. Enthalpy Model for Heating, Melting, and Vaporization in Laser Ablation // Electronic Journal of Differential Equations: UAB Conference, 19. — 2010.

9. Мажукин В. И., Шапранов А. В., Пережигин И. Е. Математическое моделирование теплофизических свойств,

процессов нагрева и плавления металлов методом молекулярной динамики // Mathematical Models & Modeling in Laser-Plasma Processes & Advanced Science Technologies. — 2012.