

СЦЕНАРИИ ФОРМИРОВАНИЯ КОРОНЫ И ПЛОТНОГО КЕРНА В РАЗРЯДНОМ КАНАЛЕ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ВЗРЫВЕ ПРОВОЛОЧЕК

Ткаченко С.И.^{1,2}, Жаховский В.В.^{2,3}, Пикуз С.А.⁴, Т.А. Шелковенко⁴

¹Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Московская обл., Россия; ²Объединенный институт высоких температур, РАН, Москва, Россия, ³Университет Южной Флориды, Тампа, США ⁴Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

При МГД расчетах взрыва одиночных алюминиевых проволочек получено, что вещество, составляющее керны, длительное время находится в состоянии плотной неидеальной плазмы при температуре 1–3 эВ [1]. Только после шунтирования основной части тока короной керн переходит в двухфазное состояние жидкость–пар в процессе расширения. Однако в том случае, если шунтирование основной части тока происходит на раннем этапе взрыва, например, когда большая часть вещества проволоочки находится еще в жидком состоянии, возможен другой сценарий формирования структуры керна. В этом случае ввиду резкого падения сжимающего магнитного давления почти до нуля, вещество керна при разгрузке может по инерции проскочить в состояние растянутой жидкости с отрицательным давлением. В соответствии с молекулярно динамическими расчетами при распаде такого метастабильного состояния образуется сложная структура керна: внешняя цилиндрическая жидкая оболочка, заполненная малоплотным веществом в пенообразном состоянии. В дальнейшем пена распадается на капли, прежде чем распадается внешняя оболочка. Результаты расчетов находятся в качественном согласии с экспериментальными данными, полученными при обработке рентгеновских изображений взрывающихся проволочек [5].

МГД моделирование взрыва проволоочки

Уравнения баланса :

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \operatorname{div} \vec{V} = 0 \quad \rho \frac{d\vec{V}}{dt} = \operatorname{grad} P + \frac{1}{c} [\vec{j} \times \vec{B}]$$

$$\rho \frac{d\varepsilon}{dt} = -P \operatorname{div} \vec{V} + G_j$$

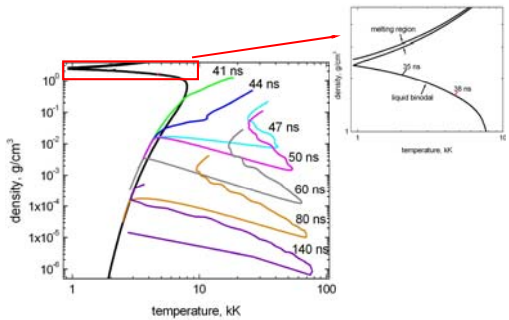
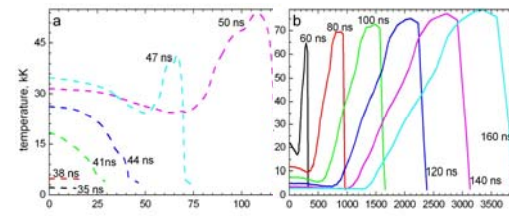
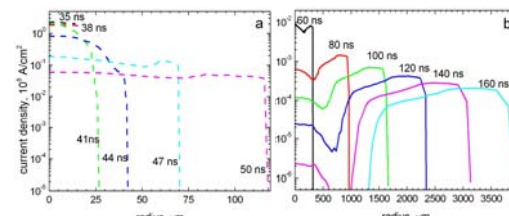
Диффузия магнитного поля

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -c \operatorname{rot} \vec{E} \quad \operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad \vec{j} = \sigma \left(\vec{E} + \frac{1}{c} [\vec{v} \times \vec{B}] \right) = \frac{c}{4\pi} \operatorname{rot} \vec{B}$$

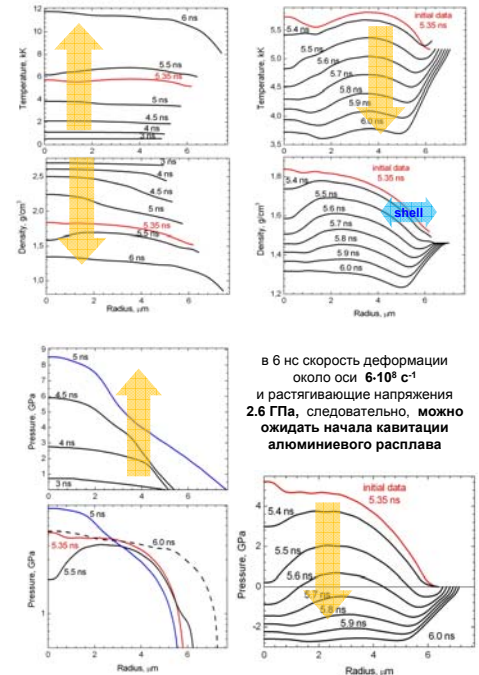
Свойства вещества [2, 3]:

$$P = P(\rho, T) \quad \varepsilon = \varepsilon(\rho, T)$$

МГД моделирование с “холодного старта”



Постоянная $dI/dt = 100 \text{ A/ns}$ $t = 0$ после $t = 5.35 \text{ ns}$



в 6 нс скорость деформации около оси $6 \cdot 10^8 \text{ s}^{-1}$ и растягивающие напряжения 2.6 ГПа, следовательно, можно ожидать начала кавитации алюминиевого расплава

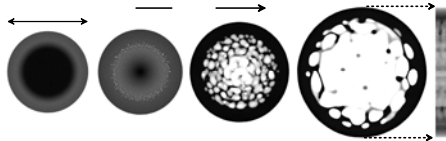
При помощи МД метода можно адекватно моделировать динамику в сильно неравновесном расплаве, включая кавитацию, формирование капель и пузырей

МД моделирование

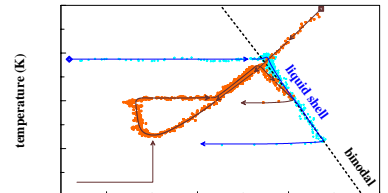
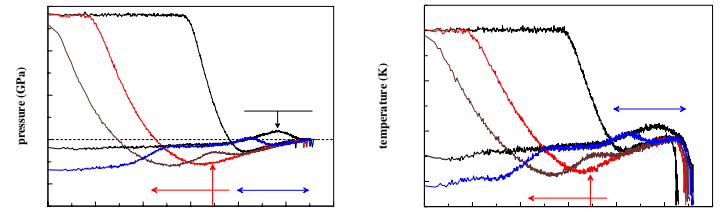
- Проведено МД моделирование алюминиевой проволоочки предварительно нагретой до условий, взятых из МГД моделирования в момент времени 5.35 нс, со следующими начальными данными: $\rho = 1.8 \text{ г/см}^3$, $T = 6 \text{ кК}$, $P = 2.6 \text{ ГПа}$

начальные размеры: $R = 200 \text{ нм}$; $L_z = 40 \text{ нм}$
 $N_{\text{atoms}} = 206 \times 10^3$; $N_{\text{CPUs}} = 2048$
 расчет длился 4 дня на суперкомпьютере Ranger в Texas Advanced Computing Center

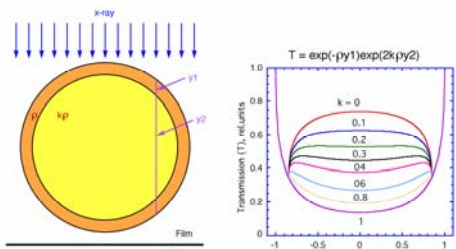
- Проведены МД расчеты для различных начальных радиусов проволоочки: 50, 100 и 200 нм. Для моделирования проволоочки с радиусом R необходимо $\sim 500 \cdot (R/100 \text{ нм})^2$ процессоров, однако результаты расчетов показывают хорошее подобие динамики расширения проволоочки с разными радиусами, т.е. результаты могут быть экстраполированы для проводников микронных размеров.



Степень потемнения пропорциональна локальной массе. Каждый пиксель представляет собой область $1 \times 1 \text{ нм}^2$, в которой может быть 0-2400 атома.

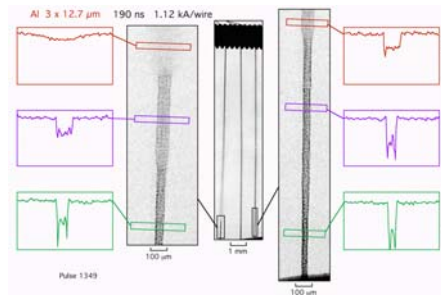


Профиль поглощения трубчатого объекта



«трубка» наполнена тем же материалом другой плотности (k_p)

Эксперимент с амплитудой тока $I_{\text{max}} = 4.5 \text{ кА}$



- S.I. Tkachenko, V.A. Gasilov, O.G. Olkhovskaya. *Mathematical Modelling*, **23**, N 3, 60-75 (2011).
- V.E. Fortov, K.V. Khishchenko, P.R. Levashov, and I.V. Lomonosov. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.* **A 415**:604 (1998).
- V.I. Oreshkin, R.B. Bakshat, A.Yu. Labetskiy, A.G. Rousskikh, A.V. Shishlov, P.R. Levashov, K.V. Khishchenko, and I.V. Glazyrin. *Tech. Phys.* **49** 843 (2004).
- V. Zhakhovskii, et al. "Molecular dynamics simulation of femtosecond ablation and spallation with different interatomic potentials", *Appl. Surf. Sci.* **255**, 9592-9596 (2009)
- Sinars D.B., Min Hu, Chandler K.M., et al. // *Phys Plasmas*. 2001. V. 8. P. 216.