

05.1;05.2;12

©1994

ДИНАМИКА ЛАЙНЕРОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ МЕГАГАУССНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В.В.Прут, С.А.Шубаев

При исследовании сжатия веществ магнитным полем в Θ -пинче [1] и Z -пинче [2] выяснилось значительное влияние на динамику лайнера реологических свойств металла, а это означает, что сжатие лайнеров магнитным полем можно рассматривать как метод исследования высокоскоростной деформации металла. Непрерывная фоторегистрация и дискретная рентгеновская регистрация размеров лайнера, точное измерение тока и, следовательно, магнитного давления в схеме Z -пинча, дают более точную по сравнению с Θ -пинчем информацию о динамике лайнера. Безуспешные попытки применить для описания наших экспериментальных результатов ряд известных реологических моделей [3] привели к необходимости разработки модели, учитывающей механизм пластической деформации.

Экспериментальная техника и результаты

Проведены многочисленные эксперименты по деформированию медных и алюминиевых трубок магнитным полем проходящего по ним тока. Для получения различных режимов деформации изменялись начальные размеры трубок, частота и амплитуда тока. Большинство опытов проведено по сжатию трубок во внешнем коаксиальном токопроводе; трубки имели начальный внешний диаметр 4–8 мм и толщину стенки от 0.25 до 1 мм. Длина деформируемой части трубки 24–30 мм. Источником тока служила конденсаторная батарея [4] емкостью 186 мкф и рабочим напряжением 25–40 кВ. Частота и амплитуда тока варьировались изменением напряжения, индуктивности токопровода и отключением части секций. Амплитуда тока в большинстве экспериментов 0.8–3 Ма, период 10–16 мкс.

Зависимость внешнего диаметра трубки от времени измерялась фоторегистрации в режиме щелевой развертки с подсветкой трубки импульсной лампой. Временное разрешение фоторегистратора 10 нс, пространственное, приведенное к трубке, — 15 мкм. В каждом опыте производилась однократная рентгеновская съемка трубки в выбранный момент времени в направлении, перпендикулярном оптиче-

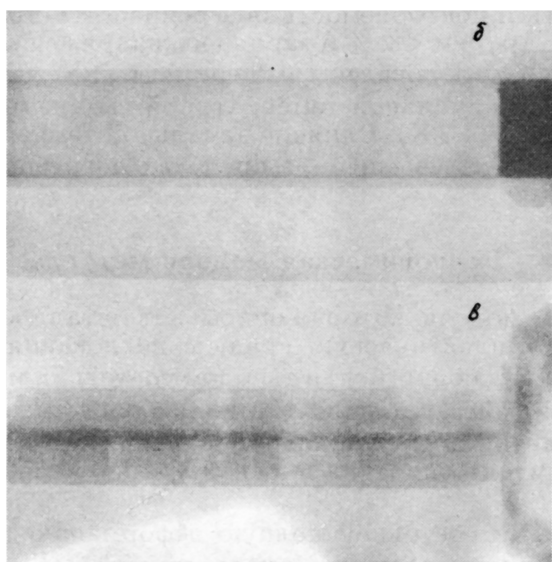
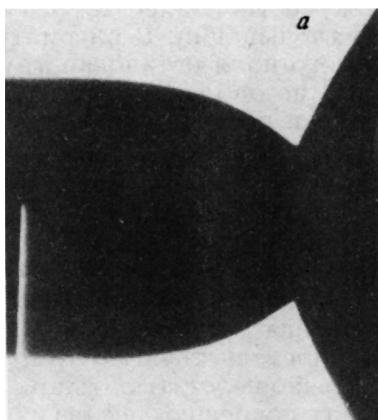


Рис. 1. *a* — фоторазвертка сжатия алюминиевой трубки, *б* и *в* — рентгенограммы трубки в начальном состоянии и вблизи момента кумуляции.

ской оси фоторегистратора. Для съемки использовался импульсный рентгеновский источник [5] с длительностью излучения ~ 15 нс и эффективной жесткостью ~ 100 кэВ. Нерезкость рентгеновского изображения, определяемая фокусом источника, составляла в наших экспериментах 10 по радиусу трубки и 40 мкм вдоль оси трубки.

На рис. 1 показана типичная фоторазвертка и рентгенограммы сжатия алюминиевой трубки. В начале сжатия всегда имеется стадия задержки, когда трубка не деформируется при напряжениях, значительно превосходящих стати-

ческий предел текучести. Далее трубка одномерно сжимается до полного схлопывания. В рассматриваемой области давлений магнитного поля остановки трубки из-за пластической диссипации не наблюдается. Измерения диаметра сжимающейся трубки по рентгеновским снимкам (рис. 1, б, в) дают результаты как совпадающие, так и различающиеся с фоторегистрацией. Расчеты показывают, что "рентгеновский" диаметр становится меньше "оптического", когда скин-слой трубки нагревается до температуры кипения. С этого момента на фоторазвертке видна оболочка из непрозрачного пара, движущегося по инерции и отстающего от трубки, ускоряющейся магнитным полем. Однако рентгеновские снимки свидетельствуют о том, что испарившаяся масса мала и ее можно не учитывать при расчете динамики трубки. В пределах погрешностей регистрации сжатия однородность и повторяемость обеспечивается при различии в толщине трубки $< 2\%$ и зарядного напряжения (амплитуды тока) $< 1\%$. Проведены эксперименты по сжатию трубок с различной начальной температурой: комнатной, жидких азота и гелия (4.2 К). Влияние начальной температуры оказалось несущественным — в пределах погрешностей измерения $R(t)$.

Реологическая модель металла

Примем модель, которая описывает металл как изотропную упруго-пластическую среду с дислокациями (движущимися, рождающимися) в твердом состоянии и как вязкую среду в жидком состоянии. Начиная с работ [6,7] предложен ряд вариантов дислокационных моделей, предназначенных в основном для описания плоской ударно-волновой деформации [8].

В твердом состоянии полную деформацию представляем в виде суммы пластической и упругой деформаций; для упругой деформации применяем закон Гука со статическим модулем сдвига. Пластическую деформацию представляем как независимое движение прямолинейных отрезков дислокаций. Принимая для скорости дислокации зависимость $v = \gamma F/l$, где l — длина прямолинейного отрезка дислокации; а F — действующая на него сила, и усредняя уравнение Орована, записанное в трехмерном виде; с учетом изотропии среды получаем для скорости деформации: $\dot{\epsilon}_{ik}^p = \gamma n b^2 \sigma_{ik} / 4$, здесь σ_{ik} — девиатор тензора напряжений, b — модуль вектора Бюргенса, n — плотность дислокаций. В модели необходимо задать величину коэффициента γ и уравнение для плотности дислокаций. Для γ выбираем про-

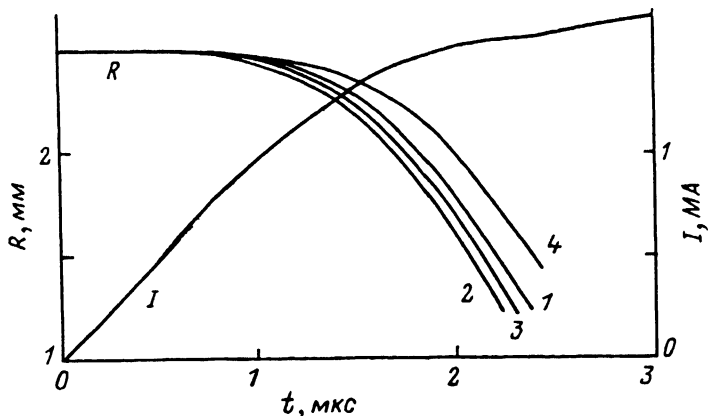


Рис. 2. Временные зависимости внешнего радиуса трубки для нескольких параметров модели (медь, начальный диаметр 2.5 мм, толщина стенки 0.5 мм, ток 1.6 Ма, период 15.6 мкс): 1 — эксперимент и расчет при $\alpha = 10$ кбар, $\beta = 10^{-5}$; 2 — расчет по модели идеальной жидкости; 3, 4 — расчет с параметрами $\alpha = 10$ кбар и $\beta = 10^{-6}, 10^{-4}$.

стую зависимость, обеспечивающую согласование с экспериментальными данными при низких напряжениях и приближение скорости дислокации к скорости звука при высоких напряжениях: $\gamma = c/b\sqrt{I}(1 - \exp(-\sqrt{I}/\alpha))$, здесь c — сдвиговая скорость звука, I — второй инвариант тензора напряжений, α — параметр модели. Полагаем, что энергия образования дислокаций пропорциональна энергии, диссипируемой при пластической деформации: $n = \beta\sigma_{ik}\dot{\epsilon}_{ik}^p/Gb^2$; здесь G — модуль сдвига, β — параметр модели (вероятность рождения дислокации). В жидком состоянии считаем среду вязкой жидкостью. При численных расчетах использовалась система магнито-гидродинамических уравнений в лагранжевых переменных в цилиндрических координатах.

Начальная плотность дислокаций принималась равной 10^6 см^{-2} , величина, характерная для металлов; ее варьирование на порядок величины не влияет на результаты. Рис. 2 иллюстрирует влияние параметров α и β на расчетные зависимости радиуса трубки от времени и согласование с экспериментальными результатами. Совокупность наших результатов описывается при значении параметров: $\alpha = 10$ кбар и $\beta = 10^{-5}$ для меди, $\alpha = 3$ кбар и $\beta = 10^{-4}$ для алюминия.

Список литературы

- [1] Бочаров Ю.Н., Кривошеев С.И., Кручинин А.И., Титков В.В., Шнеерсон Г.А. В кн.: Сверхсильные магнитные поля. М., 1984. С. 77-82.
- [2] Матвеев В.В., Медведева И.В., Прут В.В., Суслов П.А., Шibaев С.А. // Письма в ЖЭТФ. 1984. Т. 39. В. 5. С. 219-222.
- [3] Прут В.В. Программа-расчет деформации вязкопластической металлической трубки магнитным полем. ИАЭ — 3055, М., 1979. 20 с.
- [4] Матвеев В.В., Прут В.В., Суслов П.А., Удалов А.М., Шibaев С.А. Генератор импульсных токов с энергией 150 кДж и током 5 Ма. ИАЭ — 3533, М., 1982. 11 с.
- [5] Знатнов Е.В., Королев В.Д., Матвеев В.В., Прут В.В., Смирнов В.П., Черненко А.С. // ПТЭ. 1985. N 1. С. 183-187.
- [6] Taylor J.W. // J. Appl. Phys. 1965.V. 36.N 10. P. 3146-3158.
- [7] Gilman J.J. // Applied Mechanics Rewiews. V. 21. N 8. P. 767-775.
- [8] Канель Г.И. // ПМТФ. 1982. N 2. С. 105-110.

Российский научный центр
"Курчатовский институт"
Москва

Поступило в Редакцию
16 марта 1994 г.