

ПЛАВЛЕНИЕ ИЗОТРОПНОГО ГРАФИТА ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРЕВЕ

А. М. Князьков, А. И. Савватимский

В работе описываются эксперименты по импульсному нагреву графита (единицы микросекунд) с регистрацией электросопротивления жидкого углерода. Подтверждено, что нагрев в воде при атмосферном давлении не позволяет получить и исследовать жидкий углерод, в лучшем случае достигается начало области жидкого состояния. Нагрев в сапфировых трубках приводит к возникновению импульсного давления (вплоть до десятка кбар) после упора расширяющегося графита в стенку трубок. Это растущее давление (в течение единиц микросекунд) позволяет исследовать жидкое состояние углерода в ограниченном объеме. Изохорный нагрев привел к возможности измерения удельного электросопротивления жидкого углерода при высоких удельных энергиях (до ~ 32 кДж/г) и высоких давлениях. Такого рода измерения крайне затратны при стационарных исследованиях.

Ключевые слова: изотропный графит, изохорный нагрев, плавление.

Нагрев импульсом тока имеет важнейшее преимущество (перед импульсным лазерным нагревом) в объемном тепловыделении, что позволяет более точно измерять удельные свойства вещества (плотность, электросопротивление, введенную энергию). Эксперименты показали, что импульсный нагрев током при повышенном давлении обеспечивает плавление графита за короткое время эксперимента (микросекунды). Преимущества этих экспериментов состоят: во-первых, в быстром нагреве (что не позволяет расплавленному жидкому образцу изменить форму за время нагрева); во-вторых при размещении образцов в диэлектрических толстостенных трубках создаются изохорные условия нагрева (на короткое время эксперимента) при высоком импульсном давлении. Ранее итоговые результаты по исследованию жидкого углерода импульсным методом опубликованы в [1].

Учреждение Российской академии наук Объединенный институт высоких температур РАН, 125412, Москва, Ижорская ул., д.13, корп.2, ОИВТ РАН; e-mail: komitet@iht.mpei.ac.ru

Для исследования образцов графита и карбидов металлов построена импульсная конденсаторная установка, генерирующая импульс тока 5–20 кА при рабочем напряжении 5–20 кВ. В силовой схеме установки использованы дисковые малоиндуктивные балластные резисторы (0.2–0.8 Ом), формирующие импульс тока. Пуск установки обеспечивается включением первого водородного тиратрона ТГИ1-1000/25, обрыв греющего тока (шунтирование) обеспечивается включением второго тиратрона ТГИ1-1000/25. Срабатывание обоих тиратронов производится от одного импульсного генератора Г5-63 через усилительные каскады. Такая простая схема позволяет гибко варьировать величину греющего тока путем изменения напряжения зарядки конденсатора (емкость 6 мкФ) от 3 до 15 кВ. Общее время нагрева (до обрыва тока) составляло 2–10 мкс.

Регистрация всех параметров проводилась с использованием цифрового осциллографа Tektronix TDS-3000B. Величина греющего тока измерялась монитором тока (Pearson Probe) 110А, чувствительностью 0.1 В/А. Причем монитор устанавливался в высоковольтную цепь тока, так как он не требует электрической связи с землей силовой схемы. В первых контрольных опытах было измерено электросопротивление при плавлении и теплота плавления никеля (проволока диаметром 0.15 мм). Были получены результаты, совпадающие с прежними измерениями [2], выполненными без применения цифровой техники.

Исследование плавления графита проводилось на образцах плотного (2 г/см^3) изотропного графита японского производства. От блока графита алмазной резкой нарезались тонкие стержни ($0.3 \times 0.3 \text{ мм}$) длиной 15 мм. Эти образцы размещались в кварцевых и сапфировых капиллярных трубках, таким образом, что отношение внутреннего объема трубки V_T к начальному объему графита V_G составляло $V_T/V_G = 1.4 - 2$. Достаточно плотное расположение графита в трубке обеспечивало, с одной стороны, отсутствие шунтирующего разряда вдоль образца, а с другой, – обеспечивало возникновение давления при упоре расширяющегося твердого графита в стенку трубки (как известно, графит можно расплавить только при давлении выше 0.10–0.12 кбар). Расчет введенной удельной энергии E , поглощенной единицей массы графита (джоулево тепловыделение), производился по измеренному току I и напряжению U , с учетом индуктивности образца:

$$E(t) = \int_0^t \frac{I^2(t)R(t)}{m} dt,$$

где m – масса образца; I – ток; $R(t)$ – электрическое сопротивление, которое рассчитывалось по формуле $R(t) = [U(t) - L(dI/dt)]/I(t)$, U – напряжение на образце; L –

индуктивность образца. Суммарная погрешность измерения удельной введенной энергии E не превышала 5%. Начальное электросопротивление – 1250 мкОм.

В данной работе представлены результаты измерения свойств плотного изотропного графита вплоть до жидкого состояния (рис. 1).

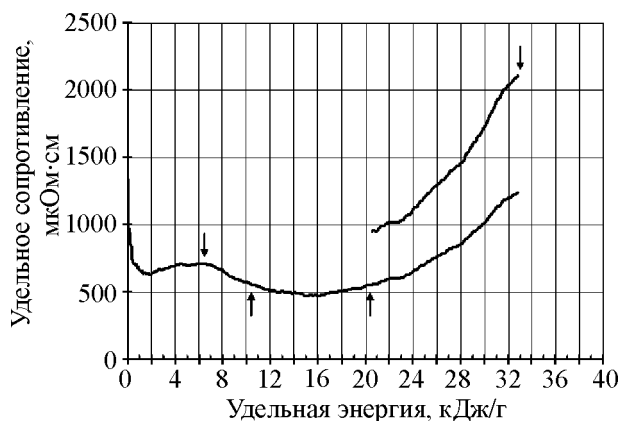


Рис. 1: Удельное электросопротивление ρ^0 , отнесенное к исходным размерам (нижняя кривая), и с учетом расширения ρ (верхняя кривая) в зависимости от удельной введенной энергии (кДж/г).

Левая нижняя стрелка отмечает начало плавления (10.5 кДж/г), а правая нижняя – окончание плавления (20.5 кДж/г). Эти величины получены в прежних работах при импульсном нагреве графита [3, 4]. Правая верхняя стрелка указывает момент разрушения сапфировой трубки при импульсном нагреве графита в сапфировом капилляре. Наблюдается рост удельного электросопротивления ρ с учетом расширения жидкого углерода (верхняя кривая) до 2000 мкОм·см выше точки плавления для невысокого уровня давлений (предположительно 10–20 кбар) при введенной удельной энергии вплоть до 32 кДж/г.

Полученные результаты (рост ρ после плавления) согласуются с экспериментами М. Тогайа [5], выполненными при миллисекундном импульсном нагреве током при статическом давлении около 20 кбар.

Авторы благодарны завлаб. к.ф.-м.н. В.В. Милявскому (ОИВТ РАН) за предоставленный для исследования блок графита марки MF-307 производства Nippon Techno-Carbon Co.,Ltd.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант N 07-08-00070-а).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] A. I. Savvatimskiy, J. Phys.: Condens. Matter **20**, 114112 (2008).
- [2] В. Н. Коробенко, А. И. Савватимский, Теплофизика высоких температур **28**, 914 (1990).
- [3] А. И. Савватимский, Успехи физических наук **173**(12), 1371 (2003).
- [4] A. I. Savvatimskiy, Measurements of the melting point of graphite and the properties of liquid carbon (a review for 1963-2003). Carbon **43**(6), 1115 (2005).
- [5] M. Togaya, Phys. Rev. Lett. **79**, 2474 (1997).

По материалам 3 Всероссийской молодежной школы-семинара “Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики”, Москва, ФИАН, октябрь 2009 г.

Поступила в редакцию 28 декабря 2010 г.