

4. Сравнение с экспериментом. Для проверки полученных оценочных соотношений была проведена серия экспериментов по определению времени подготовительной стадии распыления и времени собственно распыления при изменении в широком диапазоне диаметров струек и скоростей потока газа.

На фоторегистрограммах, аналогичных представленным на фиг. 2, производились следующие измерения: определялось время подготовительной стадии t_1 , считая с момента обтекания данной струйки ударной волной (0) до момента появления первого выброса воды (1); время собственно распыления t_2 определялось от момента появления первого выброса воды (1) до достижения максимального расхода воды или до разрушения струйки (2). В каждом опыте фиксировались начальный диаметр струйки и скорость фронта ударной волны, что давало возможность вычислять коэффициенты пропорциональности k_1 и k_2 в формулах (3.5) и (3.8).

Результаты измерений k_1 и k_2 в зависимости от параметра $\rho u^2 d / \sigma$ приведены на фиг. 4 и 5. Оказывается, что при значениях указанного параметра от 10^3 и выше, что соответствует скоростям потока свыше 60—70 м/сек и диаметрам струек воды свыше 1 мм, величины k_1 и k_2 меняются незначительно, что свидетельствует о правильном выборе силовых факторов при оценке времени распыления. При уменьшении скоростей потока газа и диаметров струек ниже указанных пределов величины k_1 и k_2 начинают резко возрастать, что можно объяснить увеличивающейся степенью влияния сил поверхностного натяжения в процессах деформации и разрушения струек воды. В этом случае, очевидно, предложенный механизм распыления становится несправедливым.

Опытов по непосредственному измерению времени распыления сферических капель воды не производилось, но, по-видимому, размерностные соотношения (3.5) и (3.8) справедливы и для них, с небольшим отклонением k_1 и k_2 в сторону уменьшения.

Поступила 13 XI 1962

ЛИТЕРАТУРА

1. Lane W. R. Shatter of Drops in Stream of Air. Ind Eng. Chem. 1951, 43, 6.
2. Прим Р. Дж. Разрушение водяных капель и брызг ударной волной. ИЛ., Вопросы ракетной техники, 1958, 45, № 3.
3. Волынский М. С. Изучение дробления капель в газовом потоке. ДАН СССР, 1949, т. 68, вып. 2.
4. Бухман С. В. Экспериментальное исследование распада капель. Вестн. АН Казах. ССР, 1954, № 11.
5. Magarvey R. H. and Taylor B. W. Free Fall Breakup of Large Drops. Journ. of Appl. Phys. 1956. vol. 27, No. 10.
6. Gordon. Mechanism and Speed of Breakup of Drops. Journ. of Appl. Phys. 1959, vol. 30, No. 11.
7. Dodd K. N. On the disintegration of drops in an air stream. Journ. of Fluid Mech. 1960, vol. 9.
8. Бородин В. А., Дитякин Ю. Ф., Ягодкин В. И. О дроблении сферической капли в газовом потоке. ПМТФ, 1962, № 1.
9. Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. Методы теории функций комплексного переменного. ГИФМЛ, 1958.

ТЕПЛОЕМОСТЬ ТАНТАЛА В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР 1200—2900° К

Я. А. Крафтмакер (Новосибирск)

При помощи модуляционного метода [1] определена теплоемкость тантала в интервале температур 1200—2900° К. В интервале температур 1200—2000° К для вычисления теплоемкости тантала предложена формула (1). При более высоких температурах имеет место дополнительное возрастание теплоемкости в результате образования вакансий. По полученным данным рассчитаны энергия образования и концентрация вакансий в тантале.

Изменения теплоемкости (2) тантала при высоких температурах были проведены на проволочных образцах при помощи модуляционного метода [1]. Образцы имели диаметр около 0.05 мм и длину 50—70 мм. Измерения проводились в вакууме при давлении остаточных газов не более $2 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. Данные о зависимости удельного сопротивления тантала от температуры были взяты из работы [2]. Эти данные, представленные авторами в виде таблицы, аппроксимировались квадратным трехчленом. Построение температурной шкалы осуществлялось путем измерения абсолютных значений удельного сопротивления тантала. Для этого по измеренным длине и массе образцов определялся их диаметр (плотность тантала принималась равной 16.6 г/см^3 [3]).

Вторым методом построения температурной шкалы являлся расчет температуры по мощности, подводимой к образцу (соответствующие данные приводятся в работе [2]). При температуре 2900° К оба метода определения температуры дают одинаковые результаты. При температуре 2000° К определение температуры вторым методом дает значения, которые на 20—30° больше значений, рассчитанных по удельному сопротивлению. Это различие относительно невелико и частично объясняется повышением роли теплоотдачи за счет теплопроводности. Поэтому можно считать результаты определения температуры образцов по удельному сопротивлению и излучаемой мощности практически совпадающими.

Перед измерениями образцы¹ очищались прокаливанием в вакууме [3]. Окончательная тренировка их проводилась при температуре около 2900° К и давлении остаточных газов не более $2 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. Упругость паров тантала достаточно низка [4], так что при температурах до 2900° К испарения тантала не наблюдалось. Частота модуляции температуры образцов при измерениях была около 60 гц.

Точное значение ее определялось при помощи счетчика импульсов и секундомера. В отдельных сериях измерений экспериментальные значения отступают от средней кривой не более чем на 0.5%. Результаты измерений с большинством образцов отличаются от усредненных значений не более, чем на 1%. Полученные результаты представлены на фиг. 1 (кривая 1). В интервале температур 1200—2000° К результаты измерений описываются уравнением

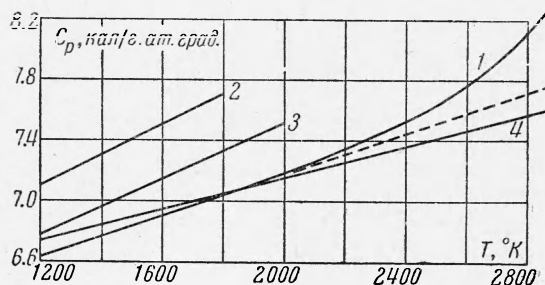
$$C_p = 5.82 + 0.00068 T \text{ кал / г-ат. град} \quad (1)$$

При температурах выше 2000° К имеет место дополнительное возрастание теплоемкости вследствие образования вакансий. На фиг. 1 представлены также данные, полученные путем определения теплосодержания тантала при высоких температурах [5—7]; здесь 1—данные автора, 2—Магнус, Гольцман [5] (экстраполяция), кривая 3—Егер, Веенстра [6] и кривая 4—Хох, Джонстон [7]. Недавние измерения теплосодержания тантала [7] проведены при температурах до 3000° К. Дополнительное теплосодержание, связанное с образованием вакансий, составляет при этой температуре около 1% (по измерениям автора). Поэтому и эффект образования вакансий в работе [7] не наблюдался. В то же время при температурах ниже 2000° К данные работы [7] хорошо согласуются с результатами описываемых здесь непосредственных измерений теплоемкости; экстраполяция последних к комнатным температурам дает значения теплоемкости, близкие к измеренным в работе [8].

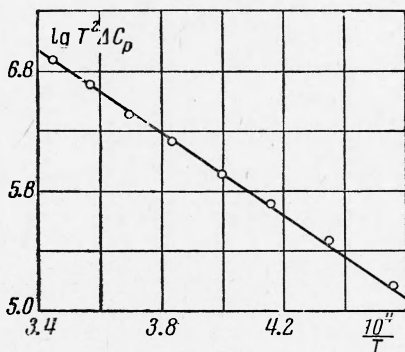
Результаты измерений теплоемкости при высоких температурах позволяют рассчитать энергию образования и концентрацию вакансий в кристаллической решетке.

Таким образом, было изучено образование вакансий в бромистом серебре [9—11], алюминии и свинце [12], натрии и калии [13], вольфраме [14]. Существенное возрастание теплоемкости при высоких температурах было обнаружено также у графита, молибдена и тантала [15]. Но недостаточная точность измерений в последней работе, составлявшая $\pm 5\%$, не позволила надежно установить связь между возрастанием теплоемкости и образованием вакансий в случае молибдена и тантала. Исходя из представления о малых значениях концентрации вакансий даже вблизи точки плавления, авторы этой работы считают, что образование вакансий не объясняет полностью возрастания

¹ Автор пользуется возможностью поблагодарить Н. Н. Михайлова за предоставление образцов тантала.



Фиг. 1



Фиг. 2

теплоемкости при высоких температурах. Однако, правомерность использования результатов калориметрических измерений для изучения образования вакансий подтверждается тем, что найденные таким образом значения энергии образования вакансий хорошо согласуются со значениями энергии активации самодиффузии и во многих случаях с теоретически рассчитанными значениями энергии образования вакансий.

При помощи экстраполяции результатов наших измерений из области температур ниже 2000°K (пунктирная прямая на фиг. 1) была определена добавочная теплоемкость, связанная с образованием вакансий. Эта теплоемкость должна описываться выражением

$$\Delta C_p = \frac{u^2}{RT^2} A \exp \frac{-u}{RT} \quad (2)$$

Здесь u — энергия образования вакансий, $A \exp(-u/RT)$ концентрация вакансий при данной температуре.

На фиг. 2 представлен график зависимости $\lg T^2 \Delta C_p = f(T^{-1})$, по которому определялась энергия образования вакансий. Определенное таким образом значение энергии образования вакансий в тантале составляет 67 ккал/г-ат , что незначительно отличается от значения, найденного расчетным путем [16,17]. Значение энергии образования вакансий согласуется также с энергией активации самодиффузии [18] и составляет приблизительно одну треть теплоты испарения [4]. Концентрация вакансий в тантале описывается выражением $s = 230 \exp(-67000/RT)$ и при температуре плавления составляет 0.8%. Добавочное теплосодержание тантала в результате образования вакансий составляет в точке плавления 0.54 ккал/г-ат .

Автор благодарен П. Г. Стрелкову за внимание к работе и ряд ценных замечаний и А. А. Исакову за помощь при измерениях.

Поступила 27 XII 1962

ЛИТЕРАТУРА

1. Крафтмахер Я. А. Модуляционный метод измерения теплоемкости. ПМТФ, 1962, № 5
2. Malter L., Langmuir D. B. Resistance, emissivities and melting point of tantalum. Phys. Rev., 1939, vol. 55, No. 8.
3. Ниобий и тантал. Сб. статей под ред. Колчина О. П. М., ИЛ, 1960.
4. Дэшман С. Научные основы вакуумной техники. М., ИЛ, 1950.
5. Magnus A., Holzmann H. Untersuchungen über die spezifische Wärmen von Tantal, Wolfram und Beryllium zwischen 100 und 900°C Ann. Phys., 1929, 5 Folge, B. 3, H. 5.
6. Jaeger F. M., Veenstra W. A. The exact measurement of the specific heats of solid substances at high temperatures. Rec. trav. chim. Pays — Bas, 1934, vol. 53, No 6.
7. Hoch M., Johnston H. L. A high temperature drop calorimeter. The heat capacities of tantalum and tungsten between 1000° and 3000°K . J. Phys. Chem., 1961, vol. 65, No 5.
8. Clusius K., Losa C. G. Die Atom — und Elektronenwärme des Tantals zwischen 10° und 273°K , Z. Naturforsch., 1955, B. 10A, H. 12.
9. Chisty R. W., Lawson A. W. High temperature specific heat of AgBr. J. Chem. Phys., 1951, vol. 19, No 4.
10. Kanzaki H. Lattice defects in silver bromide. Phys. Rev., 1951, vol. 81, No 5.
11. Pochapsky T. E. Heat capacity and thermal diffusivity of silver bromide. J. Chem. Phys., 1953, vol. 21, No 9.
12. Pochapsky T. E. Heat capacity and resistance measurements for aluminium and lead wires. Acta Met., 1953 vol. I, No. 6.
13. Carpenter L. G. Some properties of sodium and potassium near their melting point. J. Chem. Phys., 1953, vol. 21, No 12.
14. Крафтмахер Я. А., Стрелков П. Г. Энергия образования и концентрация вакансий в вольфраме. ФТТ, 1962, т. 4, вып. 8.
15. Rasor N. S., McClelland J. D. Thermal properties of graphite, molybdenum and tantalum to their destruction temperatures. Phys. Chem. Sol., 1960, vol. 15, No. 1, 2.
16. Осипов К. А. Расчет предельных значений энергии активации различных процессов в твердых металлах. ДАН СССР, 1958, т. 121, № 4.
17. Осипов К. А. Об энергии образования вакансий в твердых металлах ДАН СССР, 1958, т. 121, № 5.
18. Eager R. L., Langmuir D. B., Self—diffusion of tantalum. Phys. Rev., 1953, vol. 89, N 4.