

Дохов М.П.
Dokhov M.P.

**СМАЧИВАНИЕ ВОЛЬФРАМА И МОЛИБДЕНА ЖИДКОЙ
СУРЬМОЙ И РАСЧЕТ ИХ МЕЖФАЗНЫХ ЭНЕРГИЙ
WETTABILITY OF SOLIDS TUNGSTEN AND MOLIBDENIUM BY
MELTED STIBIUM AND THE CALCULATION OF THEIR
INTERFACIAL ENERGIES.**

В статье, используя экспериментальные значения углов смачивания, имеющиеся в литературе, проведены вычисления межфазных энергий между твердыми молибденом и вольфрамом и жидкой сурьмой. Показано, что учет температуры, при которой измерен краевой угол, вносит в величину межфазной энергии существенный вклад.

Using the experimental values of wetting angles, available in the literature, calculations of the interfacial energy between solid molybdenum and tungsten and liquid stibium. Are provided in this article it is shown that taking into account the temperature at which the contact angle is measured contributes to the value of the interfacial energy of a significant contribution.

Ключевые слова: краевой угол, поверхностная энергия, межфазная энергия, молибден, вольфрам, сурьма.

Key words: boundary angle, surface energy, interfacial energy, molybdenum, tungsten, stibium.

Дохов Магомед Пашевич – доктор технических наук, профессор кафедры технической механики и физики, ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский ГАУ, г. Нальчик
Тел. 8 928 916 7142

Dokhov Magomed Pashevich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technical Mechanics and Physics, FSBEI HE Kabardino-Balkarian SAU, Nalchik
Тел. 8 928 916 7142

Введение. В некоторых электронных приборах в качестве одного из компонентов фотокатода используется сурьма, так как соединение её с щелочными металлами обеспечивает высокий квантовый выход фотоэлектронов.

В современных приборах чаще всего применяют точечные распылители, представляющие собой шарики, закрепленные на проволочной подложке.

С целью создания надежно работающих приборов авторы [1] проводили измерение краевых углов Θ , образуемых сурьмой на

поверхностях вольфрама и молибдена. Выбор в качестве подложек этих металлов авторы объяснили необходимостью разработки технологии изготовления испарителей.

В результате своих опытов авторы установили, что сурьма смачивает вольфрам и молибден в атмосфере сухого водорода при температуре 1123К: $\Theta=57^{\circ}$ на поверхности вольфрама и $\Theta=46^{\circ}$ на поверхности молибдена.

Для расчетов межфазной энергии $\sigma_{тж}$ нами использованы поверхностные энергии твердых металлов $\sigma_{тп}$, измеренные высокоточным компенсационным методом «нулевой ползучести», в работе [2]: $\sigma_{тп}(W)=2670\text{мДж/м}^2$, $\sigma_{тп}(Mo)=2620\text{мДж/м}^2$ – при их температурах плавления. Температурные коэффициенты поверхностных энергий твердых металлов $\Delta\sigma_{тп}/\Delta T$ заимствованы также из работы [2]:

$$\begin{aligned}\Delta\sigma_{тп}/\Delta T (W) &= 0,17 \text{ мДж}/(\text{ м}^2 \text{ К}), \\ \Delta\sigma_{тп}/\Delta T (Mo) &= 0,18 \text{ мДж}/(\text{ м}^2 \text{ К}).\end{aligned}$$

Температуры плавления ($T_{пл}$) твердых вольфрама и молибдена равны соответственно: 3668К и 2893К [3].

Методика проведения расчетов. В качестве примера проведем процедуру расчета $\sigma_{тп}$ вольфрама при температуре, при которой измерен краевой угол Θ сурьмы на поверхности вольфрама по формуле:

$$\sigma_{тп} = \sigma_{тп(пл)} + (T_{пл} - T_{изм}) \cdot \Delta\sigma_{тп}/\Delta T \quad (1)$$

В формуле (1) учтено, что температурный коэффициент – отрицательный. Подставляя в (1) численные значения величин, получим

$$\sigma_{тп}(W) = 2670 + (3668 - 1123) \cdot 0,17 = 3103 \text{ мДж/м}^2.$$

Здесь и в дальнейших расчетах результаты округлены до целых чисел.

Теперь вычислим межфазную энергию между расплавом сурьмы и твердым вольфрамом. Для этого необходимо иметь величину поверхностной энергии расплавленной сурьмы.

В качестве поверхностной энергии расплавленной сурьмы $\sigma_{жп}$ при температуре плавления в расчетах межфазной энергии нами выбрано

значение $\sigma_{жп}=400 \text{ мДж/м}^2$, измеренное нами с соавторами [4]. Измерение $\sigma_{жп}$ сурьмы проводилось в кварцевом приборе в вакууме 10^{-6} Тор (чистота сурьмы составляла 99,9999%) производства Гиредмета. Для приведения $\sigma_{жп}$ к температуре, при которой измерены краевые углы, нами также использовано усредненное значение $\Delta\sigma_{жп}/\Delta T = 0,055 \text{ мДж}/(\text{м}^2\text{К})$, взятое из [5].

Для вычисления межфазной энергии между твердым вольфрамом и сурьмой воспользуемся уравнением Юнга

$$\sigma_{тж} = \sigma_{тп} - \sigma_{жп} \cos \Theta . \quad (2)$$

Подставляя в (2) численные значения величин, получим:

$$\sigma_{тж} (W) = 3103 - 378 \cdot 0,5446 = 2897 \text{ Дж/м}^2 . \quad (3)$$

Соответствующий расчет $\sigma_{тп}$ – молибдена дает следующий результат

$$\sigma_{тп} (Mo) = 2620 + (2893 - 1123) \cdot 0,18 = 2939 \text{ мДж/м}^2 . \quad (4)$$

Аналогично для $\sigma_{тж}$ между расплавом сурьмы и твердым молибденом, получим:

$$\sigma_{тж} = 2939 - 378 \cdot \cos 46^\circ = 2939 - 378 \cdot 0,6947 = 2676 \text{ мДж/м}^2 . \quad (5)$$

Нами также рассчитаны работы адгезии изученных систем. Для расчетов использовали два известных соотношения:

$$W_{A1} = \sigma_{тп} + \sigma_{жп} - \sigma_{тж} , \quad (6)$$

$$W_{A2} = \sigma_{жп} \cdot (1 + \cos \Theta) . \quad (7)$$

Обе формулы дают одинаковые результаты для одной и той же системы:

$$W_A (W) = 584 \text{ мДж/м}^2 , \quad (8)$$

$$W_A (Mo) = 641 \text{ мДж/м}^2 . \quad (9)$$

Результаты и их обсуждение. За последние 40-50 лет в литературе по межфазным явлениям накоплен большой объем экспериментальных данных, требующих теоретического обоснования. К ним можно отнести и межфазную энергию на границе «твердое тело – жидкость» (расплав). Прямого экспериментального метода измерения этой величины не

существует. Единственным способом её определения является расчет этой величины. Цель настоящей работы: восполнить этот пробел. Эта статья является продолжением нашей работы [6]. Исследованные нами тугоплавкие металлы могут применяться для улучшения свойств сплавов как добавки к ним при изготовлении различных изделий, используемых в сельскохозяйственной технике.

Выводы. 1. Проведены вычисления поверхностных энергий твердых вольфрама и молибдена при температурах, при которых измерены краевые углы сурьмы на поверхностях твердых вольфрама и молибдена.

2. Рассчитаны межфазные энергии твердых тугоплавких металлов на границе с расплавом сурьмы.

3. Вычислены также работы адгезии исследованных систем.

4. Полученные результаты подтвердили утверждение о том, что при краевом угле $\Theta < \pi/2$ межфазная энергия $\sigma_{\text{тж}} < \sigma_{\text{тп}}$, а при Θ большем $\pi/2$ $\sigma_{\text{тж}}$ больше $\sigma_{\text{тп}}$.

Литература

1. *Натапова Р.И., Казакевич З.А., Жемчужина Е.А., Тарасова А.Б.* Смачивание тугоплавких металлов расплавами теллура, сурьмы и их сплавов // Физическая химия границ раздела контактирующих фаз. Киев: Наук.думка. 1976. С.112-117.

2. *Хоконов Х.Б., Таова Т.М., Шебзухова И.Г., Кумыков В.К., Алчагиров Б.Б.* Поверхностные энергия и натяжение металлов и двойных металлических сплавов в твердом состоянии // Труды международного и междисциплинарного симпозиума «Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы» Нальчик – Ростов-на-Дону-Грозный-Шепси. Т.8. 2018. С.5-20.

3. Энциклопедия неорганических материалов. Киев:1977. Т.1. 840с., Т.2. 816с.

4. *Дохов М.П., Кипов И.Г., Афаунов М.Х., Понежев М.Х.* Влияние добавок серы на поверхностное натяжение сурьмы // Научные сообщения III Всесоюзной конференции по строению и свойствам металлических и шлаковых расплавов. Исследования шлаковых расплавов. Свердловск:1977. ч.3. С.48-50.

5. *Ниженко В.И., Флока Л.И.* Поверхностное натяжение жидких металлов и сплавов (одно - двухкомпонентные системы). М.: Металлургия, 1981. 208 с.

6. *Дохов М.П.* Смачивание молибдена и вольфрама жидкими индием, теллуrom и расчет их межфазных энергий // Известия Кабардино-Балкарского ГАУ. 2018. Т.8. №3. С.17-20.

References

1. *Natapova R.I., Kazakevich Z.A., ZHemchuzhina E.A., Tarasova A.B.* Smachivanie tugoplavkih metallov rasplavami tellura, sur'my i ih splavov // Fizicheskaya himiya granic razdela kontaktiruyushchih faz. Kiev: Nauk.dumka. 1976.S.112-117.

2. *Hokonov H.B., Taova T.M., SHEbzuhova I.G., Kумыkov V.K., Alchagirov B.B.* Poverhnostnye energiya i natyazhenie metallov i dvoynyh metallicheskih splavov v tverdom sostoyanii // Trudy mezhdunarodnogo i mezhdisciplinarnogo simpoziuma «Fizika poverhnostnyh yavlenij, mezhfaznyh granic i fazovye perekhody» Nal'chik – Rostov-na-Donu-Groznyj-SHepsi.T.8. 2018. S.5-20.

3. Enciklopediya neorganicheskikh materialov. Kiev:1977. T.1. 840s., T.2. 816s.

4. *Dohov M.P., Kipov I.G., Afaunov M.H., Ponezhev M.H.* Vliyanie dobavok sery na poverhnostnoe natyazhenie sur'my // Nauchnye soobshcheniya III Vsesoyuznoj konferencii po stroeniyu i svojstvam metallicheskih i shlakovyh rasplavov. Issledovaniya shlakovyh rasplavov. Sverdlovsk:1977. ch.3. S.48-50.

5. *Nizhenko V.I., Floka L.I.* Poverhnostnoe natyazhenie zhidkih metallov i splavov (odno - dvuhkomponentnye sistemy). M.: Metallurgiya, 1981. 208 s.

6. *Dohov M.P.* Смачивание молибдена и вольфрама жидкими индием, теллуrom и расчет их межфазных энергий // Известия Кабардино-Балкарского ГАУ. 2018. Т.8. №3. С.17-20.