

Дохов М.П.
Dokhov M.P.

**СМАЧИВАНИЕ НИКЕЛЯ ЖИДКИМИ НАТРИЕМ И КАЛИЕМ И
РАСЧЕТ ИХ МЕЖФАЗНЫХ ЭНЕРГИЙ
NICKEL WETTING WITH LIQUID SODIUM AND POTASSIUM AND
CALCULATING THEIR INTERFACIAL ENERGY**

В статье, используя экспериментальные значения углов смачивания, существующие в литературе, проведены вычисления межфазных энергий между твердым никелем и жидкими натрием и калием.

Полученные результаты показывают, что учет температуры, при которой измерен краевой угол, вносит существенный вклад в межфазную энергию между тугоплавким твердым металлом и низкотемпературной металлической жидкостью.

In the article the interphase energies between solid nickel and liquid sodium and potassium are calculated using the experimental values of the wetting angles existing in the literature

The results show that taking into account the temperature at which the contact angle is measured makes a significant contribution to the interfacial energy between the refractory and solid metal and the low-temperature metallic liquid.

Ключевые слова: угол смачивания, межфазная энергия, никель, натрий, калий.

Key words: wetting angle, interfacial energy, nickel, sodium, potassium.

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. Межфазные явления играют важную роль в процессах зарождения и роста кристаллов, выплавки, разливки, литья стали и сплавов, пайки и сварки, жидкофазного спекания или пропитки пористого тугоплавкого металла жидкой металлической связкой и т.д.

Степень смачиваемости Θ и адгезия W_A металлической связки к тугоплавкой составляющей кермета определяют многие свойства получаемого материала.

При использовании щелочных металлов как теплоносителя в случае плохого смачивания стенок теплообменника наступает пленочный режим кипения, что резко снижает теплоотвод.

Межфазная энергия между твердым телом и жидкостью определяет угол смачивания жидкостью этого тела. Однако, межфазная энергия $\sigma_{ТЖ}$ не измеряется, поэтому единственным способом определения ее величины является расчет.

Теоретическая часть. В работе [1] были изучены углы смачивания никеля расплавами натрия и калия в зависимости от температуры. Результаты измерений краевых углов авторы представили в виде эмпирических формул:

$$\theta_{Na}^{\circ} = 152 - 0,197t, \text{ при } 200-500^{\circ}\text{C}, \quad (1)$$

$$\theta_K^{\circ} = 116 - 0,392t, \text{ при } 165-400^{\circ}\text{C}. \quad (2)$$

В расчетах межфазных энергий $\sigma_{ТЖ}$ при использовании формулы (1) интервал температуры был разделен по 50°C .

При расчетах Θ по формуле (2) второе значение величины Θ вычислялось при 200°C , затем, прибавляя к 200°C по 50°C , доводили температуру до 400°C .

Для расчетов межфазных энергий нами использованы поверхностные энергии $\sigma_{рп}$ расплавов натрия и калия, приведенные в работе [2]. В связи с тем, что данные $\sigma_{рп}$ автор представил в виде таблицы, нами были вычислены температурные коэффициенты поверхностной энергии $\Delta\sigma_{рп} / \Delta T$ и затем найдены величины $\sigma_{рп}$, необходимые для наших расчетов $\sigma_{ТЖ}$. Поверхностную энергию твердого никеля $\sigma_{тп}$ и $\Delta\sigma_{тп} / \Delta T$ заимствовали из работы [3]: $\sigma_{тп}(нл) = 1920 \text{ мДж} / \text{м}^2$, $\Delta\sigma_{тп} / \Delta T = -0,50 \text{ мДж} / \text{м}^2$.

Поскольку краевые углы авторы [1] измеряли при других температурах, чем температура плавления никеля, то значения величин $\sigma_{тп}$ были приведены к температурам, при которых измерялись углы смачивания Θ .

В качестве примера проведем процедуру расчета $\sigma_{тп}$ никеля при температуре, при которой измерен краевой угол, образуемый расплавом натрия на поверхности твердого никеля. Ниже покажем методику расчета межфазной энергии в указанной системе, но сначала найдем $\sigma_{тп}$ при температуре 473 К по формуле:

$$\sigma_{III} = \sigma_{III}(nл) + [(T_{ni}(Ni) - T_{изм})] \times \Delta\sigma_{III} / \Delta T. \quad (3)$$

Заметим, что при понижении температуры поверхностная энергия твердого никеля возрастает. Подставляя в (3) численные значения, имеем

$$\sigma_{III} = 1920 + (1726 - 473) \times 0,5 = 2546 \text{ мДж} / \text{м}^2. \quad (4)$$

Здесь и в дальнейших расчетах результаты округлены до целых чисел.

Теперь вычислим межфазную энергию между никелем и натрием при данной температуре.

Воспользуемся уравнением Юнга

$$\sigma_{ТЖ} = \sigma_{III} - \sigma_{PI} \cos \Theta. \quad (5)$$

Подставляя в (5) значения величин, имеем:

$$\sigma_{ТЖ} = 2546 - 196 \cos 123^\circ = 2546 + 196 \times 0,5446 = 2653 \text{ мДж} / \text{м}^2. \quad (6)$$

Работу адгезии можно вычислить двумя тождественными формулами

$$\sigma_{ТЖ} = \sigma_{III} + \sigma_{PI} - \sigma_{ТЖ}, \quad (7)$$

$$W_A = \sigma_{PI} (1 + \cos \Theta). \quad (8)$$

Результаты, вычисленные по формулам (7) и (8), совпадают. Например, вычислив по формуле (8), получим $W_A = 89 \text{ мДж} / \text{м}^2$.

По такой же схеме проведены расчеты и для других систем при различных температурах. Результаты вычислений межфазных энергий, изученных систем, представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Результаты вычислений $\sigma_{ТЖ}$ в системе Ni-Na в зависимости от температуры

№ п/п	t°, С	Na				
		Ni				
		Θ , град	σ_{PI} , мДж/м ²	σ_{III} , мДж/м ²	$\sigma_{ТЖ}$, мДж/м ²	W_A , мДж/м ²
1.	200	123	196	2546	2653	89
2.	250	113	191	2522	2597	116
3.	300	103	187	2496	2538	145
4.	350	93	182	2472	2482	172

5.	400	83	178	2446	2424	200
6.	450	73	173	2422	2372	223
7.	500	64	169	2396	2322	243

Таблица 2 – Результаты вычислений $\sigma_{ТЖ}$ в системе Ni-K в зависимости от температуры

№ п/п	t°, C	К				
		Ni				
		$\theta,$ <i>град</i>	$\sigma_{PI},$ <i>мДж/м²</i>	$\sigma_{TI},$ <i>мДж/м²</i>	$\sigma_{TЖ},$ <i>мДж/м²</i>	$W_A,$ <i>мДж/м²</i>
1.	165	111	110	2546	2603	71;
2.	200	98	108	2546	2561	93
3.	250	78	105	2522	2500	127
4.	300	58	102	2496	2442	156
5.	350	39	99	2472	2395	176
6.	400	19	96	2446	2355	187

Результаты и их обсуждение. Из таблиц 1, 2 следует, что в системе Ni-Na смачивание, т.е. $\theta < 90^\circ$ наблюдается, начиная с 400°C , а в системе Ni-K соответствующая температура равна 250°C . С увеличением температуры значения величин σ_{TI} и $\sigma_{TЖ}$ линейно уменьшаются. Кому-то может показаться, что результаты измерений краевых углов устаревшими. Однако, это не так, поскольку в литературе до настоящего времени не вычислялись межфазные энергии с помощью уравнения Юнга, вычислялась только разность между поверхностной энергией твердого тела и межфазной энергией между твердым телом и расплавом (жидкостью).

Выводы. 1. По известным экспериментальным значениям поверхностной энергии твердого никеля при температуре плавления и его температурного коэффициента рассчитаны σ_{TI} никеля при температурах, при которых измерены краевые углы.

2. Рассчитаны межфазные энергии в системах никель-натрий и никель-калий.

3. Показано, что при $\Theta > 90^\circ$ $\sigma_{ТЖ}$ больше, чем $\sigma_{ТЛ}$, а при $\Theta < 90^\circ$, $\sigma_{ТЖ} < \sigma_{ТЛ}$.

Литература

1. Казакевич З.А., Жемчужина Е.А. Исследование смачивания никеля щелочными металлами, сплавами щелочных металлов и расплавами хлоридов щелочных металлов. / Поверхностные явления в расплавах. Киев. Наукова думка, 1968. С. 348-351.

2. Алчагиров Б.Б. Поверхностное натяжение щелочных металлов и сплавов с их участием. // Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. ТФЦ – М.: ИВТАН, 1991. № 3 (89), № 4 (90). С. 3-18.

3. 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. В.8. 2018. С. 5–20.

References

1. Kazakevich Z.A., ZHemchuzhina E.A. Issledovanie smachivaniya nikelya shchelochnymi metallami, splavami shchelochnyh metallov i rasplavami hloridov shchelochnyh metallov. / Poverhnostnye yavleniya v rasplavah. Kiev. Naukova dumka, 1968. S. 348-351.

2. Alchagirov B.B. Poverhnostnoe natyazhenie shchelochnyh metallov i splavov s ih uchastiem. // Obzory po teplofizicheskim svojstvam veshchestv. TFC – M.: IVTAN, 1991. № 3 (89), № 4 (90). S. 3-18.

3. Hokonov H.B., Taova T.M., SHEbzuhova I.G., Kумыkov V.K., Alchagirov B.B. Poverhnostnye energiya i natyazhenie metallov i dvojnyh metallicheskikh splavov v tverdom sostoyanii // Trudy mezhdunarodnogo i mezhdisciplinarnogo

simpoziuma «Fizika poverhnostnyh yavlenij, mezhfaznyh granic i fazovye perekhody», Nal'chik – Rostov-na-Donu – Groznyj – SHepsi. V.8. 2018. S. 5–20.