

УДК 532.612.3:691

DOI: 10.18384/2310-7251-2020-1-90-101

РАСЧЁТ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ НЕПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ ПЛАВЛЕНИЯ

Сыроватко Ю. В.

Государственное учреждение «Институт охраны почв Украины», Днепропетровский филиал

52071, Днепропетровская область, пос. Опытный, ул. Научная, д. 65А, Украина

Аннотация. Целью статьи является разработка метода расчёта поверхностного натяжения расплавленных непереходных металлов.

Процедура и методы исследования. В основу предложенного метода положена модель, предполагающая, что изменение поверхностной энергии растекающейся по подложке капли расплавленного металла соответствует работе, производимой весом капли и электрохимическим взаимодействием. Для рассчитанных значений поверхностного натяжения расплавленных металлов получены статистические и электрохимическая поправки. Статистические поправки основаны на расчете отклонения значений поверхностного натяжения расплавленных металлов от значений, аппроксимированных регрессионными кривыми. Электрохимическая поправка учитывает изменение поверхностного натяжения расплавленных металлов вследствие скапливания атомов возле поверхности капли.

Результаты проведённого исследования. Найдены расчётные значения поверхностного натяжения расплавленных металлов, удовлетворительно совпадающие с экспериментальными данными.

Практическая значимость заключается в возможности применения данного метода для расчёта поверхностного натяжения непереходных металлов, значения которого сложно измерить экспериментально.

Ключевые слова: поверхностное натяжение, расплавленный металл, лежащая капля, радиус растекания капли, атомный номер металла, радиус атома, электрические заряды

CALCULATION OF SURFACE TENSION OF NON-TRANSITION METALS AT MELTING TEMPERATURES

Yu. Syrovatko

*Public Institution "Soil Protection Institute", Dnipropetrovsk Branch
ul. Nauchnaya 65A, 52071 Opytnyi, Dnipropetrovsk region, Ukraine*

Abstract. Purpose. We have developed a method for calculating the surface tension of molten non-transition metals.

Methodology and Approach. The proposed method is based on the model assuming that the change in surface energy of a drop of molten metal spreading on the substrate corresponds to the work performed by the drop weight and electrochemical interaction. For the calculated values

of surface tension of molten metals, statistical corrections and electrochemical correction are obtained. Statistical corrections are based on the calculation of deviation of the molten metals' surface tension from the values approximated by regression curves. The electrochemical correction takes into account the change in the surface tension of molten metals due to accumulation of atoms near the surface of the drop.

Results. The calculated values of the surface tension of molten metals are found, in agreement with the experimental data.

Practical relevance. The obtained results make it possible to use this method for calculating the surface tension of non-transition metals, the values of which are difficult to measure experimentally.

Keywords: surface tension, molten metal, sessile drop, drop spreading radius, atomic number of metals, atom radius, electric charges.

Введение

Для создания композиционных материалов используются твёрдая фаза – наполнитель и жидкая связка. Жидкая фаза должна смачивать всю поверхность наполнителя, внедриться в его поры, и после затвердевания создать прочную связь между наполнителем и матрицей. Поэтому смачивающая способность жидкой фазы является основным признаком для создания композиционных материалов [1; 2]. Классическая теория описывает процессы, происходящие на межфазных границах, посредством величин поверхностного натяжения жидкой фазы, краевых углов смачивания и адгезионных свойств веществ [3; 4; 5]. Теоретические вычисления поверхностного натяжения расплавленных металлов осуществляли ещё более века назад. Были разработаны статистически-электронный и молекулярно-термодинамический методы. Теоретический расчёт поверхностного натяжения проводили такие авторы, как А. Х. Брегер, А. А. Жуковицкий, К. Хуанг, Г. Вили, Р. Стреттон, Н. Д. Лянг, В. Коэн, Р. А. Крайч [6], С. И. Попель, С. Н. Задумкин [7] и др. Были созданы электронная теория поверхностной энергии металлов, плазменная теория, молекулярно-статистические теории. При расчёте поверхностной энергии использовалось приближение свободного электронного газа, квазиклассическое приближение, или статистический метод Томаса-Ферми. Были произведены расчёты поверхностной энергии металлов с помощью приближения сильной связи, а также модельно-термодинамические расчёты. Большинство из перечисленных методов дают хорошее совпадение теоретически рассчитанных значений коэффициентов поверхностного натяжения с найденными экспериментально. Однако эти методы базируются в основном на решении сложных электростатических, электрохимических или термодинамических задач нахождения поверхностных энергий веществ, а также на использовании для этих целей сложных квантово-механических моделей. В результате наличия громоздких выкладок отсутствует простота решения заданных задач, что усложняет практическое применение данных расчётов.

Целью данной работы являлась разработка метода расчёта поверхностного натяжения жидких непереходных металлов при температуре плавления, упрощающего решение указанных задач. Предложенный метод вычисления основан

на влиянии гравитационной силы на каплю металла, растекающуюся по твёрдой подложке. Однако, кроме гравитационных сил, на формирование поверхностных сил натяжения влияют также электрохимические силы, существующие между атомами расплавленного металла. В свою очередь, имеют значение размеры атомов, атомный вес металлов и количество электронов в атомах. Поэтому учёт всех вышеперечисленных факторов является неотъемлемой частью данного метода.

Основные теоретические положения

Рассмотрим растекание капли расплава по твёрдой подложке на начальной стадии, когда ещё нет взаимодействия с подложкой и можно предположить, что на каплю действует только гравитационная сила, то есть сила веса. Начальный этап растекания происходит по оценкам [8] за очень короткое время 0,05–0,50 с, за которое теплообмен с окружающей средой будет незначительным. Растекание капли расплава по поверхности подложки является неравновесным процессом. Кинетические неравновесные процессы, происходящие при охлаждении расплава исследованы в работах [9; 10; 11]. На начальной стадии растекания капли расплава степень удалённости системы от положения равновесия можно считать малой, что допускает использование линеаризованных уравнений и позволяет пренебречь остыванием капли.

Предположим, что при растекании капли часть сил поверхностного натяжения расплава производит работу, равную потенциальной энергии жидкой капли в поле силы тяжести, а вторая составляющая поверхностного натяжения создаёт поверхностную энергию капли, которая формирует кривизну лежащей капли. Также предположим, что чем больше масса капли, тем больше первая составляющая натяжения и тем меньше кривизна. Возьмём такую массу капли, при которой вся сила поверхностного натяжения будет компенсировать силу тяжести, и таким образом вторая составляющая будет практически равна нулю, то есть кривизна будет минимальной.

В этом случае согласно [8] растекающаяся капля имеет высоту центра тяжести:

$$h_0 = \frac{m}{2\rho\pi r^2}, \quad (1)$$

где m – масса капли, ρ – плотность расплава, r – радиус растекания капли по подложке.

При растекании капли работу совершает сила веса в расчёте на единицу длины периметра [8]:

$$f_g = \frac{m^2 g}{2\rho\pi^2 r^4}. \quad (2)$$

Отождествим работу силы веса с увеличением поверхностной энергии капли $\Delta E = \sigma(\pi r^2 - \pi d^2)$ [12], где σ – поверхностное натяжение жидкой фазы, d –

начальный диаметр капли до растекания. Начальный диаметр капли легко вычислить по формуле $d = \sqrt[3]{\frac{6m}{\pi\rho}}$. В результате имеем:

$$\Delta E = \sigma\pi(r^2 - d^2) = f_g\pi r^2. \quad (3)$$

В процессе растекания капли в каждый последующий момент времени будет непрерывно изменяться высота капли и контактный угол между подложкой и каплей. Согласно [13], для фиксированного момента времени справедливы следующие соотношения:

$$\sigma(1 - \cos\theta) = \frac{\rho gh^2}{2}, \quad (4)$$

$$h = rtg\left(\frac{\theta}{2}\right), \quad (5)$$

где θ – контактный угол, h – высота капли.

Согласно (1), высоту капли можно выразить через высоту её центра тяжести как

$$h = 2h_0 = \frac{m}{\rho\pi r^2}. \quad (6)$$

$$\text{Тогда } \sigma(1 - \cos\theta) = \frac{gm^2}{2\rho\pi^2 r^4}, \quad \frac{m}{\rho\pi r^3} = tg\left(\frac{\theta}{2}\right).$$

Используя данные равенства и тригонометрические тождества:

$$\cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{1 + \cos\theta}{2}, \quad 1 + tg^2\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{1}{\cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right)},$$

получим для поверхностного натяжения следующее выражение:

$$\sigma = \frac{g(\rho^2\pi^2 r^6 + m^2)}{4\rho\pi^2 r^4}. \quad (7)$$

Подставив (7) в (3), получим уравнение:

$$\rho^2\pi^2 r^8 - \rho^2\pi^2 r^6 d^2 - m^2 r^2 - m^2 d^2 = 0. \quad (8)$$

Данное уравнение удобно решить как трансцендентное в виде:

$$\rho^2\pi^2 r^8 - m^2 d^2 = \rho^2\pi^2 r^6 d^2 + m^2 r^2.$$

Отыскав таким образом r , можно найти искомое σ из формулы (7).

Следует отметить, что данный метод можно применять только для капли определённой массы. В реальном эксперименте, при растекании капли с массой, превышающей некоторую определённую величину, силы поверхностного

Таблица 1 / Table 1

Плотность, радиус растекания, поверхностные натяжения σ , σ_a и σ_n , электрохимическая поправка $\Delta\sigma$, окончательные значения σ_k и экспериментальные значения σ_e металлов

Density, spreading radius, surface tensions σ , σ_a and σ_n , electrochemical correction $\Delta\sigma$, final σ_k values and experimental σ_e values of metals

	ρ , г/см ³	r , м	σ , Н/м	σ_a , Н/м	σ_n , Н/м	$\Delta\sigma$, Н/м	σ_k , Н/м	σ_e , Н/м [7]
Al	2,5	0,0080	0,400	0,459	0,573	0,071	0,645	0,860
Ag	9,3	0,0051	0,606	0,596	0,592	0,301	0,893	0,910
Pb	10,6	0,0049	0,638	0,546	0,476	0,039	0,515	0,470
Bi	9,8	0,0050	0,614	0,486	0,373	0,024	0,397	0,390
Na	0,9	0,0111	0,278	0,263	0,257	0,031	0,288	0,208
Sn	7,0	0,0056	0,550	0,500	0,480	0,036	0,516	0,580
Au	17,3	0,0042	0,764	0,753	0,813	0,119	0,932	1,170
Cu	8,4	0,0053	0,600	0,687	0,811	0,200	1,011	1,350
K	0,8	0,0115	0,265	0,204	0,143	0,017	0,160	0,102
Li	0,5	0,0135	0,230	0,223	0,198	0,072	0,270	0,406
Mg	1,6	0,0091	0,333	0,348	0,393	0,085	0,477	0,580
Ca	1,3	0,0098	0,313	0,271	0,252	0,078	0,331	0,337
Sr	2,3	0,0081	0,378	0,302	0,267	0,063	0,329	0,285
Ba	3,3	0,0072	0,429	0,316	0,251	0,057	0,308	0,224
Ga	6,1	0,0059	0,532	0,558	0,626	0,078	0,704	0,715
In	7,0	0,0056	0,550	0,514	0,506	0,005	0,512	0,556
Tl	11,2	0,0048	0,647	0,561	0,493	0,025	0,518	0,462
Zn	6,6	0,0057	0,538	0,617	0,727	0,067	0,794	0,806
Cd	8,0	0,0054	0,584	0,565	0,580	0,046	0,626	0,642

натяжения капли уже не будут удерживать гравитационные силы, и капля будет беспрепятственно растекаться. Поэтому в наших расчётах мы использовали наиболее оптимальную массу капли 0,6 г, следуя рекомендациям автора монографии [14]. Плотность металлов при температуре плавления была найдена из справочных материалов¹. Значения плотности, рассчитанных значений σ и радиусов растекания капли приведены в таблице 1.

Расчёт статистических поправок для поверхностного натяжения

Далее учтём, что значения поверхностного натяжения металлов зависят от размеров атома. Если размеры атомов меньше некоторого значения, то расстояния между атомами уменьшаются и, следовательно, увеличиваются силы поверхностного натяжения [6]. Если же атомы имеют большие размеры, силы поверхностного натяжения уменьшаются. Следует отметить, что изменение поверхностного натяжения зависит также от заполненности электронных уровней атомов и, следовательно, от атомных номеров. Для того, чтобы рассчитать поправки к полученным значениям поверхностного натяжения, учитывающие данные факторы, построим регрессию рассчитанных значений поверхностного

¹ Зиновьев В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. Справочник. М.: Металлургия, 1989. 384 с.

натяжения от величины N_a/r_a атомов (N_a – атомный номер, r_a – радиус атома, умноженный на 10^{10}) (рис. 1).

Из рис. 1 видно, что зависимость поверхностного натяжения металлов от величин N_a/r_a имеет некоторый разброс значений. Далее предложим корректирующую поправку для значений поверхностного натяжения расплавленных металлов. Величину данной поправки составляет разность между значениями поверхностного натяжения σ и σ_1 , которые лежат на кривой регрессии (рис. 1):

$$\sigma_1 = -0,0001 \left(\frac{N_a}{r_a} \right)^2 + 0,0159 \left(\frac{N_a}{r_a} \right) + 0,2039. \quad (9)$$

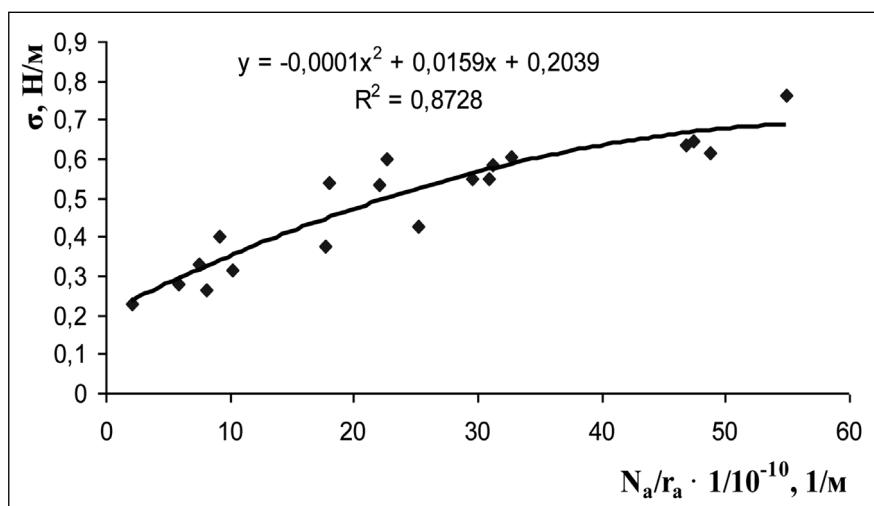


Рисунок 1 / Figure 1

Регрессионная зависимость поверхностного натяжения σ металлов от величины N_a/r_a .

Regression dependence of the surface tension σ of metals on the value of N_a/r_a .

Источник: составлено автором.

Для того, чтобы получить значения поверхностного натяжения с учётом данной поправки, необходимо к величинам σ прибавить значение $\sigma - \sigma_1$:

$$\sigma_a = \sigma + (\sigma - \sigma_1), \quad (10)$$

где σ_a – поверхностное натяжение с учётом атомных номеров и радиусов атомов. Величина $\sigma - \sigma_1$ в (10) может принимать как положительный, так и отрицательный знак в зависимости от текущих значений σ .

Далее построим зависимость полученных значений σ_a от плотности металлов и повторим ту же самую операцию (рис. 2).

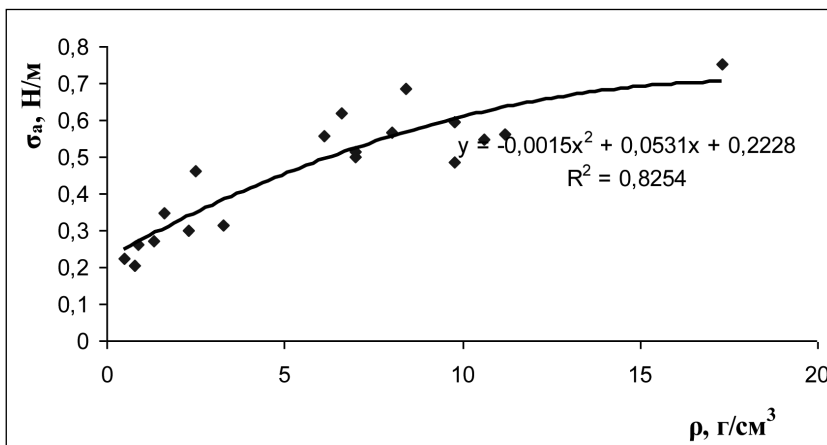


Рисунок 2 / Figure 2

Регрессионная зависимость поверхностного натяжения σ_a металлов от плотности.

Regression dependence of the surface tension σ_a of metals on density.

Источник: составлено автором.

Как видно из рис. 2, значения поверхностного натяжения σ_2 , лежащие на кривой, будут равны:

$$\sigma_2 = -0,0015\rho^2 + 0,0531\rho + 0,2228. \quad (11)$$

Прибавим разницу $\sigma_a - \sigma_2$ к величине σ_a и получим значение поверхностного натяжения σ_n с учётом плотности металлов

$$\sigma_n = \sigma_a + (\sigma_a - \sigma_2). \quad (12)$$

Предварительно рассчитанные значения σ , значения σ_a , σ_n для 19-ти элементов приведены в таблице 1.

Расчёт электрохимической поправки

Расчёт электрохимических поправок производился в системе СГС. После вычисления данные величины переводили в систему СИ. На поверхности капли образуются некомпенсированные электрические заряды ионизированных атомов расплава, которые создают электрическое поле.

Предположим, что вследствие различной ориентации дипольных и трипольных моментов атомов поле действует на разные атомы неодинаково. В этом случае можно рассматривать атомы расплава, которые сильнее взаимодействуют с электрическим полем как псевдорастворённые атомы, а остальные атомы можно рассматривать как растворитель.

Вследствие действия поля формируется распределение псевдорастворённых атомов, аналогичное распределению Больцмана [10]:

$$\exp\left(1 - \frac{\omega(x)}{kT}\right) \approx 1 - \frac{\omega(x)}{kT}, \quad (13)$$

где $\omega(x)$ – энергия, которую имеет атом в связи с наличием поверхности капли, от которой он находится на расстоянии x , k – константа Больцмана, T – температура. Псевдорастворённые атомы скапливаются в приповерхностном слое капли. Вследствие этого концентрация атомов возле поверхности превышает концентрацию атомов в глубине расплава ($N'/V > N/V$), где N' – число атомов возле поверхности в объёме V , N – число псевдорастворённых атомов в глубине расплава в объёме V . Пусть $C = N/N'$. Из [15] для коэффициента поверхностного натяжения получим:

$$d\sigma = \frac{1}{v} dC \int_0^{\infty} \omega(x) dx. \quad (14)$$

Так как $\omega(x) = ez\varphi = \frac{e^2 z^2}{x}$ [15], где e – заряд электрона, z – валентность, φ – потенциал, то:

$$d\sigma = \frac{e^2 z^2}{v} dC \int_0^{\infty} \frac{dx}{x}. \quad (15)$$

Поскольку $\ln x$ расходится при границах интегрирования указанных в (15), их следует заменить на реальные. Так, поскольку речь идёт о лежащей капле на подложке, нижнюю границу интегрирования нужно сопоставить с некоторой усреднённой величиной, близкой к поверхности капли. Для этого параметра можно использовать радиус Дебая $1/\chi$. Верхнюю границу интегрирования можно заменить на расстояние, равное единице длины (в системе СГС 1 см), что в сравнении с $1/\chi$ практически соответствует ∞ . Радиус Дебая равен [15]:

$$1/\chi = \sqrt{\frac{kTV_K}{e^2 z^2 4\pi N_K}} \quad (16)$$

где N_K – общее число частиц в капле, V_K – объём капли.

Тогда, произведя интегрирование $d\sigma$ и dC , получим:

$$\sigma = \frac{1}{v} C e^2 z^2 (\ln 1 - \ln(1/\chi)) = \frac{1}{v} C e^2 z^2 \ln(\chi) = \frac{1}{v} C e^2 z^2 (-\ln(1/\chi)). \quad (17)$$

Отметим, что под знаком логарифма стоит безразмерная величина, численно равная $1/\chi$.

Далее рассмотрим величину C . В нашем приближении на расстоянии того же радиуса Дебая используем соотношение, описывающее распределение атомов аналогичное распределению Больцмана. Тогда можно записать для расстояния, равного радиусу Дебая $1/\chi$, соотношение [15]:

$$N' = N \exp\left(-\frac{e^2 z^2}{(1/\chi)kT}\right). \quad (18)$$

Далее, поскольку $N' > N$, то есть атомы движутся против градиента концентрации, нужно изменить знак в показателе экспоненты. Выполнив данную замену и разложив экспоненту до первого члена, получим:

$$N' = N \left(1 + \frac{e^2 z^2}{(1/\chi)kT} \right). \quad (19)$$

Второй член в (19) значительно больше единицы, и поэтому её можно опустить. Тогда величину C можно представить с достаточно высокой степенью приближения как:

$$C = N / N' = \frac{(1/\chi)kT}{e^2 z^2}. \quad (20)$$

Подставив данное соотношение в (17), для электрохимической поправки $\Delta\sigma$ получим:

$$\Delta\sigma = \frac{1}{\nu} (1/\chi)kT (-\ln(1/\chi)). \quad (21)$$

Данную величину необходимо прибавить к найденной в (12) $\sigma_{\text{н}}$; тогда получим окончательную величину поверхностного натяжения $\sigma_{\text{к}}$. Значения электрохимических поправок $\Delta\sigma$, окончательные значения $\sigma_{\text{к}}$ и экспериментальные значения [7] $\sigma_{\text{э}}$ представлены в таблице 1.

Из приведённых на рис. 3 и в табл. 1 результатов видно, что рассчитанные значения поверхностного натяжения для исследуемых металлов удовлетворительно согласуются с экспериментальными ($R^2 = 0,92$).

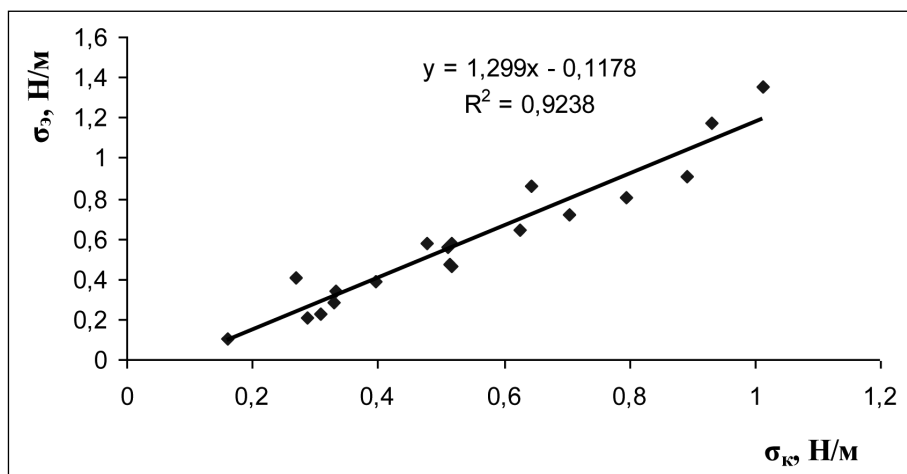


Рисунок 3 / Figure 3

Регрессионная зависимость экспериментальных $\sigma_{\text{э}}$ от вычисленных значений поверхностного натяжения $\sigma_{\text{к}}$.

Regression dependence of experimental $\sigma_{\text{э}}$ on the calculated values of surface tension $\sigma_{\text{к}}$.

Источник: составлено автором.

Следовательно, описанный в данной работе алгоритм нахождения величины поверхностного натяжения можно применять на практике. Следует отметить, что масса 0,6 г не для всех расплавов будет той массой капли, при растекании которой первая составляющая поверхностного натяжения будет равна макси-

мальному поверхностному натяжению расплава. Поэтому в расчётах при данной массе присутствует допустимая ошибка.

Таким образом, алгоритм расчёта поверхностного натяжения для однокомпонентного непереходного расплавленного металла состоит в следующем:

1. Зная плотность металла при температуре плавления, массу капли расплава и начальный диаметр капли, найденный из этих величин, найти путём графического решения уравнения (8) радиус растекания капли r .
2. Подставив все вышеперечисленные значения в (7), найти σ .
3. По регрессионным формулам (9) – (12) рассчитать значения σ_a и σ_n .
4. По формуле (21) рассчитать электрохимическую поправку $\Delta\sigma$, зная радиус атома, валентность, температуру плавления, массу капли и молярную массу металла.

Так как переходные металлы имеют незаполненный d-уровень, находящийся во внутренней части электронного облака, силы отталкивания между атомами увеличиваются. При этом уменьшается плотность металлов и значения поверхностного натяжения, вычисленные данным методом, будут заниженными. Поэтому расчёт поверхностного натяжения переходных металлов можно вести тем же методом при большей массе капли.

Заключение

Предложенный метод расчёта поверхностного натяжения непереходных металлов основан на предположении, что работа, производимая весом капли, растекающейся по подложке, и процессами, связанными с электрохимическим взаимодействием, соответствует изменению поверхностной энергии капли.

Используя регрессионные зависимости поверхностного натяжения от величин атомного радиуса, атомного номера и плотности металлов, получены статические поправки для величин поверхностного натяжения непереходных металлов.

Рассчитаны электрохимические поправки для найденных значений поверхностного натяжения, которые возникают вследствие действия электрического поля некомпенсированных электрических зарядов ионизированных атомов расплава, возникающих на поверхности капли.

Используя данный метод расчёта, можно найти значения поверхностного натяжения таких непереходных металлов как, например, франций и радий, которые сложно измерить экспериментально.

Статья поступила в редакцию 10.12.2019 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Суховая Е. В., Сыроватко Ю. В. Особенности растворения квазикристаллических сплавов-наполнителей $Al_{65}Co_{20}Cu_{15}$ и $Al_{72}Co_{18}Ni_{10}$ в процессе пропитки композиционных материалов латунной связкой // Металлофизика и новейшие технологии. 2019. Т. 41. № 9. С. 1171–1185.
2. Суховая Е. В., Сыроватко Ю. В. Структурообразование границ раздела в композиционных материалах, армированных квазикристаллическим сплавом-наполнителем Al-Co-Cu // Адгезия расплавов и пайка материалов. 2014. Т. 47. С. 58–65.

3. Королев Е. В., Гришина А. Н., Пустовгар А. П. Поверхностное натяжение в структурообразовании материалов. Значение, расчет и применение // *Строительные материалы*. 2017. № 1-2. С. 104–108.
4. Придатко А. В., Миронюк А. В., Свицерский В. А. Анализ подходов к математическому описанию характеристик материалов с повышенной гидрофобностью // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2015. Т. 5. № 5(77). С. 30–41.
5. Galimzyanov B. N., Mokshin A. V. Surface Tension of Water Droplets upon Homogeneous Droplet Nucleation in Water Vapor // *Colloid Journal*. 2017. Vol. 79. No. 1. P. 26–34.
6. Поверхностные явления в расплавах и возникающих из них твердых фазах / Еременко В. Н., Рыков В. И., Антоненко Т. И., Ниженко В. И. Кишинев: Штиинца, 1974. 270 с.
7. Попель С. И. Поверхностные явления в расплавах. М.: Металлургия, 1994. 432 с.
8. Павлов В. В., Попель С. И. Кинетическое сопротивление растеканию и его доля в общем балансе сил // *Адгезия расплавов и пайка материалов*. 1978. № 3. С. 3–13.
9. Гладков С. О. О динамике роста кристаллов в локально неоднородном и неравновесном расплаве // *Расплавы*. 2016. № 5. С. 434–440.
10. Gladkov S. O. Model Description of Crystal Growth in Inhomogeneous Media // *Doklady Physics*. 2004. Vol. 49. No. 2. P. 82–85.
11. Gladkov S. O. On the Theory of Crystal-Surface Growth near a Crystallization Point // *Doklady Physics*. 2004. Vol. 49. No. 11. P. 634–637.
12. Бородин С. А. Исследование процесса растекания капли жидкости, наносимой на поверхность подложки // *Компьютерная оптика*. 2005. № 28. С. 66–68.
13. Матюхин С. И., Флоренков К. Ю. Форма капель жидкости, помещенных на твердую горизонтальную поверхность // *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2013. Т. 15. № 3. С. 292–304.
14. Кунин Л. Л. Поверхностные явления в металлах. М.: Металлургиздат, 1955. 304 с.
15. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Статистическая физика. М.: Наука, 1975. 583 с.

REFERENCES

1. Sukhovaya E. V., Syrovatko Yu. V. [Peculiarities of Dissolution of Quasi-crystalline Al₇₂Co₁₈Ni₁₀ and Al₆₅Co₂₀Cu₁₅ Fillers during Impregnation of Composites with a Brass Binder]. In: *Metallofizika i noveishie tekhnologii* [Metallophysics and Advanced Technologies], 2019, vol. 41, no. 9, pp. 1171–1185.
2. Sukhovaya E. V., Syrovatko Yu. V. [Interface structure formation of the composites reinforced with a Al–Co–Cu quasi-crystalline filler]. In: *Adgeziya rasplavov i paika materialov* [Adhesion of melts and soldering of materials], 2014, vol. 47, pp. 58–65.
3. Korolev E. V., Grishina A. N., Pustovgar A. P. [Surface Tension in Structure Formation of Materials. Significance, Calculation, and Application]. In: *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials], 2017, no. 1-2, pp. 104–108.
4. Pridatko A. V., Mironyuk A. V., Sviderskii V. A. [Analysis of approaches to mathematical description of the characteristics of materials with high hydrophobicity]. In: *Vostochno-Evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii* [Eastern-European Journal of Enterprise Technologies], 2015, vol. 5, no. 5 (77), pp. 30–41.
5. Galimzyanov B. N., Mokshin A. V. Surface Tension of Water Droplets upon Homogeneous Droplet Nucleation in Water Vapor. In: *Colloid Journal*, 2017, vol. 79, no. 1. pp. 26–34.
6. Eremenko V. N., Rykov V. I., Antonenko T. I., Nizhenko V. I. *Poverkhnostnye yavleniya v rasplavakh i vznikayushchikh iz nikh tverdykh fazakh* [Surface phenomena in melts and in solid phases arising from melts]. Chisinau, Shtiintsa Publ., 1974. 270 p.

7. Popel' S. I. *Poverkhnostnye yavleniya v rasplavakh* [Surface phenomena in melts]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1994. 432 p.
8. Pavlov V. V., Popel' S. I. [Kinetic resistance to spreading and its share in the overall balance of forces]. In: *Adgeziya rasplavov i paika materialov* [Adhesion of melts and soldering of materials], 1978, no. 3, pp. 3–13.
9. Gladkov S. O. [Revisiting the dynamics of crystal growth in local inhomogeneous and in equilibrium melt]. In: *Rasplavy* [Melts], 2016, no. 5, pp.434–440.
10. Gladkov S. O. Model Description of Crystal Growth in Inhomogeneous Media. In: *Doklady Physics*, 2004, vol. 49, no. 2, pp. 82–85.
11. Gladkov S. O. On the Theory of Crystal-Surface Growth near a Crystallization Point. In: *Doklady Physics*, 2004, vol. 49, no. 11, pp. 634–637
12. Borodin S. A. [The study of the process of the spreading of liquid droplets deposited on the surface of the substrate]. In: *Komp'yuternaya optika* [Computer optics], 2005, no. 28, pp. 66–68.
13. Matyukhin S. I., Florenkov K. Yu. [Shape of liquid drops on solid horizontal surface]. In: *Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy* [Condensed Matter and Interphases], 2013, vol. 15, no. 3, pp. 292–304.
14. Kunin L. L. *Poverkhnostnye yavleniya v metallakh* [Surface phenomena in metals]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1955. 304 p.
15. Landau L. D., Lifshits E. M. *Statistical Physics*. London, Pergamon Press, 1958.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Сыроватко Юлия Владимировна – кандидат физико-математических наук, специалист-спектрометрист Государственного учреждения «Институт охраны почв Украины», Днепропетровский филиал;
e-mail: yu.syrovatko@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Yuliya V. Syrovatko – PhD in Physical and Mathematical Sciences, spectrometer specialist, Public Institution ‘Soil Protection Institute’, Dnipropetrovsk Branch;
e-mail: yu.syrovatko@gmail.com

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Сыроватко Ю. В. Расчёт поверхностного натяжения непереходных металлов при температурах плавления // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. 2020. № 1. С. 90–101.
DOI: 10.18384/2310-7251-2020-1-90-101

FOR CITATION

Syrovatko Yu. V. Calculation of surface tension of non-transition metals at melting temperatures. In: *Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics*, 2020, no. 1, pp. 90–101.
DOI: 10.18384/2310-7251-2020-1-90-101