
УДК 544;971,544.2,544.3

ОЦЕНКА ЭНТАЛЬПИИ СМЕШЕНИЯ РАСПЛАВОВ СИСТЕМЫ Sn-Ag-Cu ПРИ 1423 К ПО ДАННЫМ О СВОЙСТВАХ БИНАРНЫХ ПОДСИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАСТВОРОВ

© 2024 А. С. Быков, К. И. Олейник*

Институт металлургии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

**E-mail: 1007o1007@gmail.com*

Поступила в редакцию 19.08.2024 г.

После доработки 28.08.2024 г.

Принята к публикации 02.09.2024 г.

В статье рассматривается оценка энтальпии смешения ΔH_{mix} расплавов тройной системы Sn-Ag-Cu при температуре 1423 К по полученным нами ранее калориметрическим данным о тепловых эффектах смешения бинарных подсистем Ag-Cu, Ag-Sn и Cu-Sn. Для выполнения оценки ΔH_{mix} были привлечены геометрические модели Тоор'а, Kohler'а и Muggianu, в каждой из которых бинарные данные совместно обрабатываются по определенной математической процедуре. Результаты расчетов по указанным моделям представлены концентрационными зависимостями ΔH_{mix} тройной системы в форме 3D поверхностей, проекций этих поверхностей на плоскость концентрационного треугольника, а также изотерм, построенных для отдельных квазибинарных сечений. Обнаружено, что моделирование по Kohler'у и Muggianu дает незначительно различающиеся результаты, тогда как в модели Тоор'а величины теплоты смешения тройных составов заметно сдвинуты в отрицательную (экзотермическую) область. Из научной литературы известно, что правильный выбор геометрической модели зависит от принадлежности изучаемой тройной системы к «симметричному» или «асимметричному» типу. Форма имеющихся изотерм ΔH_{mix} бинарных подсистем указывает на то, что система Sn-Ag-Cu является «асимметричной». Результаты, полученные с помощью модели Тоор'а, признаны наиболее корректными, как как именно эта модель рекомендуется в литературе для описания «асимметричных» систем. Отмечены общая ограниченность всех геометрических моделей, учитывающих только двойные межчастичные взаимодействия, и целесообразность дополнительных экспериментальных исследований образования трехкомпонентных расплавов для выявления возможного вклада тройных взаимодействий в энтальпию смешения.

Ключевые слова: термодинамические свойства, энтальпия смешения, расплавы Ag-Cu-Sn, субрегулярный раствор, модель Тоор'а, модель Kohler'а, модель Muggianu

DOI: 10.31857/S0235010624050101

ВВЕДЕНИЕ

Большое значение в процессе создания новых перспективных сплавов имеет надежная справочная информация о возможности смешения выбранных компонентов [1]. Калориметрия смешения бинарных металлических систем уже является

непростой трудоемкой работой. Однако, по оценке [2], необходимый объем работы еще экспоненциально возрастает с увеличением количества компонентов, что делает экспериментальные исследования многокомпонентных сплавов трудноосуществимыми. Возникает необходимость использования комплексных расчетных методик для предсказания термодинамических свойств систем сложного состава. В свое время разными авторами было предложено несколько «геометрических» моделей для оценки термодинамических свойств, в частности энтальпии смешения ΔH_{mix} , тройных систем посредством оптимизации экспериментальных данных об образующих эти системы бинарных сплавах. Самыми распространенными из «геометрических» являются модели Тоор'а [3], Kohler'а [4] и Muggianu [5].

Ранее нами была проведена калориметрия смешения бинарных сплавов Cu-Ag, Cu-Sn, Ag-Sn при 1423 К и найденные величины ΔH_{mix} были выражены аналитическими функциями от состава в рамках квазихимического приближения модели субрегулярных растворов [6,7]. Эти результаты приведены на рис. 1 (а–в).

В указанной модели концентрационная зависимость энтальпии смешения имеет вид [8, 9]:

$$\Delta H_{\text{mix } ij} = N_i N_j (\alpha_1 N_i + \alpha_2 N_j - \alpha_3 N_i N_j), \quad (1)$$

где N_i , N_j – мольные доли компонентов i и j ; α_1 , α_2 и α_3 – параметры взаимодействия.

Значения α для рассмотренных систем были найдены методом наименьших квадратов из экспериментальных данных. Они представлены в таблице 1.

Изложенная информация открывает возможность для прогнозирования энтальпии смешения тройной системы Sn-Ag-Cu по данным о свойствах бинарных подсистем. Задача представляется актуальной. Сплавы указанной системы применяются в качестве экологически безопасных бессвинцовых припоев в изделиях радиоэлектроники и электротехнических устройствах [10–13]. Активно проводится поиск новых композиций для пайки с механическими, электрическими, термическими и технологическими свойствам, улучшенными путем добавления четвертого компонента; изучается влияние новых добавок на качество припоев [14–17]. В то же время, экспериментальные исследования тепловых эффектов смешения жидких сплавов

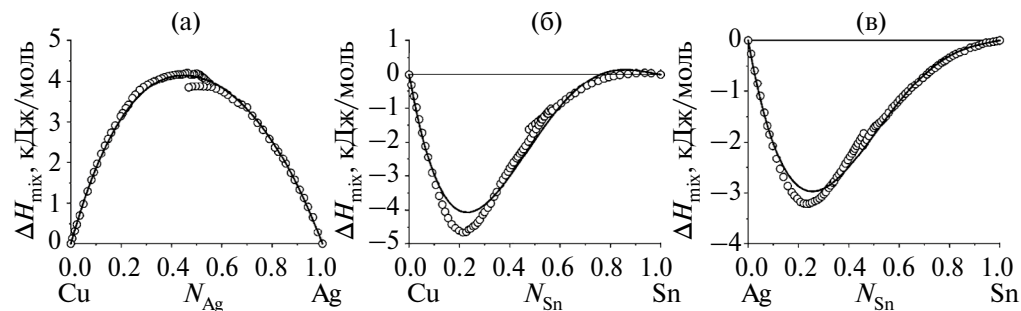


Рис. 1. Экспериментальные величины ΔH_{mix} при 1423 К (точки) и их описания квазихимическим приближением модели субрегулярных растворов (сплошные линии) для двойных систем Cu-Ag (а), Cu-Sn (б) и Ag-Sn (в) [6, 7].

Таблица 1. Параметры взаимодействия α уравнения (1), найденные для растворов Cu-Ag, Cu-Sn и Ag-Sn при 1423 К [6, 7]

Система	Параметры взаимодействия α , кДж/моль		
	α_1	α_2	α_3
Cu-Ag	22.2886	16.5122	11.8152
Cu-Sn	-41.7086	1.1556	-50.1287
Ag-Sn	-27.7075	-0.9977	-27.7079

Sn-Ag-Cu, имеющие значение для конструирования новых припоев, весьма ограничены. Известна одна публикация по калориметрии смешения тройной системы [10], но рассматриваемые в ней величины ΔH_{mix} получены при недостаточно высоких температурах и не охватывают весь концентрационный диапазон жидких сплавов.

МЕТОДИКА

Для оценки энтальпии смешения расплавов тройной системы Sn-Ag-Cu использованы три геометрические модели (Тоор, Kohler и Muggianu), различающиеся трактовкой составов бинарных подсистем, образующих трехкомпонентную композицию заданного состава. Разница в подходах изложена в [2].

Согласно [18] уравнения для расчета ΔH_{mix} расплавов тройной системы Sn-Ag-Cu в рассматриваемых моделях имеют вид:

модель Тоор'a

$$\begin{aligned} \Delta H_{\text{mix SnAgCu}} = & \frac{N_{\text{Ag}}}{(1 - N_{\text{Sn}})} \Delta H_{\text{mix SnAg}} (N_{\text{Sn}}, 1 - N_{\text{Sn}}) \\ & + \frac{N_{\text{Cu}}}{1 - N_{\text{Sn}}} \Delta H_{\text{mix SnCu}} (N_{\text{Sn}}, 1 - N_{\text{Sn}}) \\ & + (N_{\text{Ag}} + N_{\text{Cu}})^2 \Delta H_{\text{mix AgCu}} \left(\frac{N_{\text{Ag}}}{N_{\text{Ag}} + N_{\text{Cu}}}, \frac{N_{\text{Cu}}}{N_{\text{Ag}} + N_{\text{Cu}}} \right); \end{aligned} \quad (2a)$$

модель Kohler'a

$$\begin{aligned} \Delta H_{\text{mix SnAgCu}} = & (N_{\text{Sn}} + N_{\text{Ag}})^2 \Delta H_{\text{mix SnAg}} \left(\frac{N_{\text{Sn}}}{N_{\text{Sn}} + N_{\text{Ag}}}, \frac{N_{\text{Ag}}}{N_{\text{Sn}} + N_{\text{Ag}}} \right) \\ & + (N_{\text{Ag}} + N_{\text{Cu}})^2 \Delta H_{\text{mix AgCu}} \left(\frac{N_{\text{Ag}}}{N_{\text{Ag}} + N_{\text{Cu}}}, \frac{N_{\text{Cu}}}{N_{\text{Ag}} + N_{\text{Cu}}} \right) \end{aligned}$$

$$+(N_{\text{Cu}} + N_{\text{Sn}})^2 \Delta H_{\text{mix CuSn}} \left(\frac{N_{\text{Cu}}}{N_{\text{Cu}} + N_{\text{Sn}}}, \frac{N_{\text{Sn}}}{N_{\text{Cu}} + N_{\text{Sn}}} \right); \quad (26)$$

модель Muggianu

$$\begin{aligned} \Delta H_{\text{mix SnAgCu}} = & \frac{N_{\text{Sn}} N_{\text{Ag}}}{X_{\text{SnAg}} X_{\text{AgSn}}} \Delta H_{\text{mix SnAg}} (X_{\text{SnAg}}, X_{\text{AgSn}}) \\ & + \frac{N_{\text{Ag}} N_{\text{Cu}}}{X_{\text{AgCu}} X_{\text{SnAg}}} \Delta H_{\text{mix AgCu}} (X_{\text{SnAg}}, X_{\text{AgSn}}) \\ & + \frac{N_{\text{Cu}} N_{\text{Sn}}}{X_{\text{CuSn}} X_{\text{SnCu}}} \Delta H_{\text{mix CuSn}} (X_{\text{CuSn}}, X_{\text{SnCu}}), \\ X_{ij} = & (1 + N_i - N_j) / 2; \end{aligned} \quad (2B)$$

где N – мольные доли компонентов. Концентрационные зависимости энтальпии смешения двойных подсистем выражали в модельных расчетах уравнениями (1) с заменой аргументов функции $\Delta H_{\text{mix } ij} = f(N_i, N_j)$ на переменные, указанные в уравнениях (2(a–в)) для соответствующих моделей.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты определения энтальпии смешения расплавов тройной системы Sn-Ag-Cu при 1423 К, полученные с помощью моделей Тоор’а, Kohler’а и Muggianu, представлены в виде 3D поверхностей на рис. 2–4 соответственно.

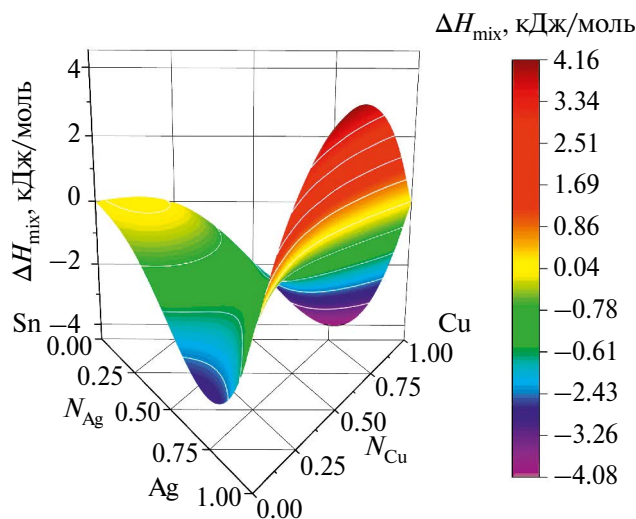


Рис. 2. Поверхность энтальпии смешения тройных расплавов Sn-Ag-Cu при 1423 К, построенная на основании экспериментальных данных о бинарных подсистемах [6, 7] при помощи модели Тоор’а.

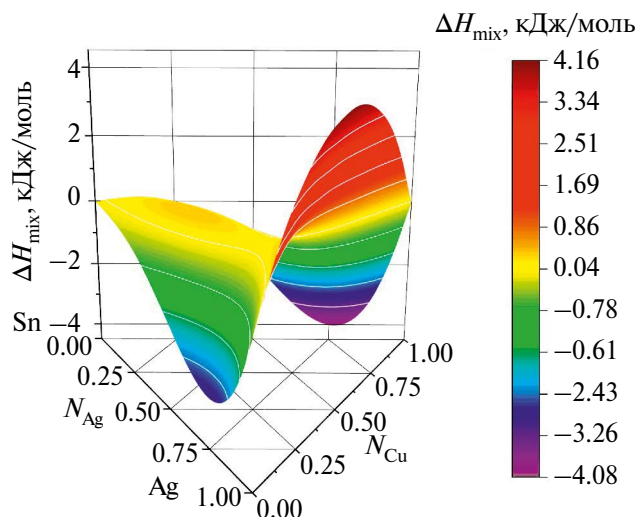


Рис. 3. Поверхность энтальпии смешения тройных расплавов Sn-Ag-Cu при 1423 К, построенная на основании экспериментальных данных о бинарных подсистемах [6, 7] при помощи модели Kohler'a.

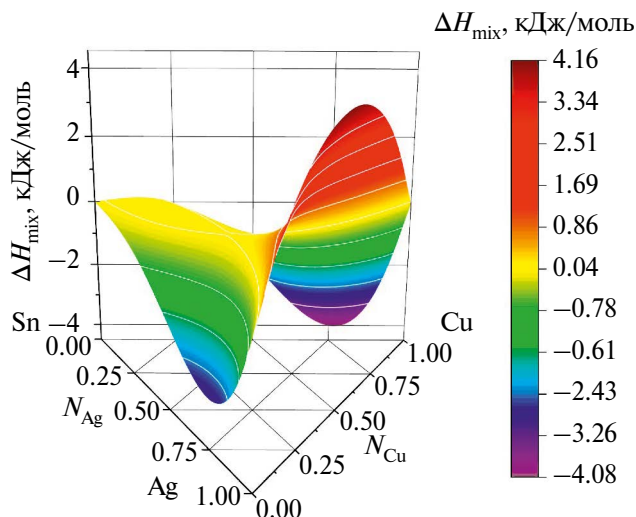


Рис. 4. Поверхность энтальпии смешения тройных расплавов Sn-Ag-Cu при 1423 К, построенная на основании экспериментальных данных о бинарных подсистемах [6, 7] при помощи модели Muggianu.

На рис. 5(а–в) показаны проекции полученных поверхностей ΔH_{mix} системы Sn-Ag-Cu на плоскость концентрационного треугольника. При анализе изображений на данном рисунке необходимо иметь в виду, что примененная здесь цветовая шкала энтальпии смешения несколько отличается от шкал, использованных на рис. 2–4.

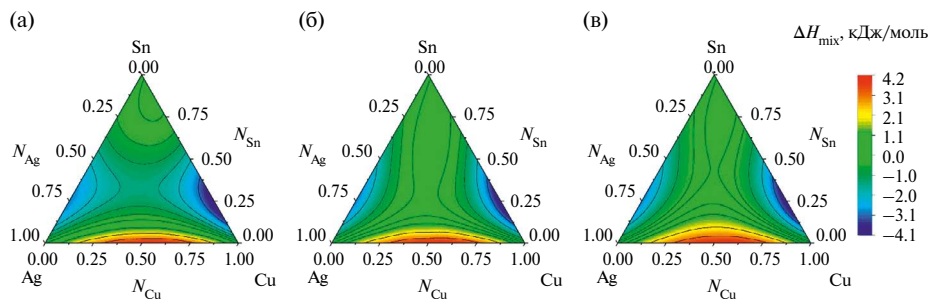


Рис. 5. Распределение величин ΔH_{mix} расплавов Sn-Ag-Cu при 1423 К по концентрационному полю тройной системы, оцененное при помощи моделей Тоор'а (а), Кохлер'а (б) и Муггиану (в).

Для еще более наглядного сравнения результатов моделирования ΔH_{mix} на рис. 5(а–в) построены разными методами изотермы энтальпии смешения тройных расплавов при 1423 К для нескольких квазибинарных сечений системы.

Из рис. 2–6 следует, что модели Кохлер'а и Муггиану дают близкие друг к другу результаты. В отличие от них, в модели Тоор'а расчетные концентрационные зависимости теплоты смешения глубже проникают в область экзотермического смешения с $\Delta H_{\text{mix}} < 0$, что может быть признаком более развитого притягивающего межчастичного взаимодействия.

Сходство результатов в моделях Кохлер'а и Муггиану еще не означает, что именно они дают верные прогнозы. Правильный выбор геометрической модели зависит от того, к какому типу – «симметричному» или «асимметричному» – относится рассматриваемая тройная система. Модель Тоор'а рекомендована для «асимметричного» типа, тогда как две остальные модели – для «симметричного» [2, 18]. Согласно [19], если в «асимметричной» тройной системе 1-2-3 компоненты 2 и 3 подобны друг другу и заметно отличаются от компонента 1, то должно проявляться сходство двойных подсистем 1-2 и 1-3. Именно эта картина наблюдается на рис. 1 с изотермами энтальпии смешения двойных сплавов, если принять, что компонентами 1, 2 и 3 являются Sn, Ag и Cu, соответственно. Таким образом, для описания ΔH_{mix} расплавов Sn-Ag-Cu лучше всего подходит модель Тоор'а.

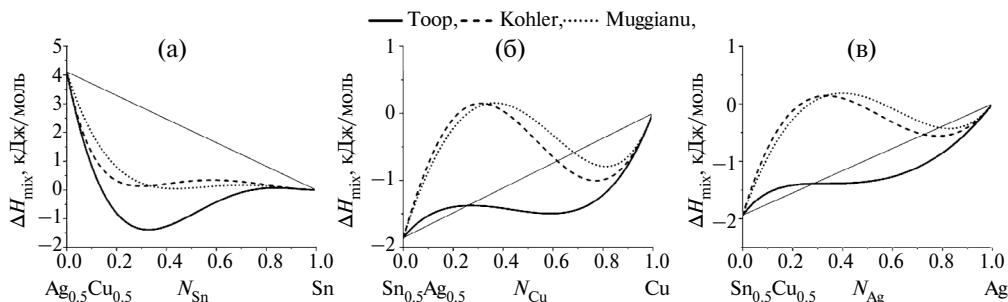


Рис. 6. Изотермы теплоты смешения тройных расплавов с $N_{\text{Ag}}/N_{\text{Cu}} = 1$ (а), $N_{\text{Sn}}/N_{\text{Ag}} = 1$ (б) и $N_{\text{Sn}}/N_{\text{Cu}} = 1$ (в) при 1423 К, построенные с помощью разных моделей.

Следует также отметить один общий недостаток всех геометрических моделей — они принимают во внимание только двойные межчастичные взаимодействия и поэтому пригодны для быстрой предварительной оценки термодинамического свойства тройной системы, особенно тогда, когда тройные взаимодействия выражены слабо или отсутствуют. Сохраняется необходимость дополнительного экспериментального исследования смешения хотя бы отдельных тройных составов для выяснения возможного вклада тройных взаимодействий в ΔH_{mix} .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании собственных экспериментальных данных о смешении двойных сплавов Ag-Cu, Ag-Sn и Cu-Sn выполнен расчет энтальпии смешения системы Sn-Ag-Cu в зависимости от состава при температуре 1423 К при помощи геометрических моделей Тоор'а, Kohler'а и Muggianu.

Для удобства сравнения концентрационные зависимости ΔH_{mix} тройных сплавов, рассчитанные тремя методами, оформлены в виде 3D поверхностей, проекций этих поверхностей на плоскость концентрационного треугольника, а также изотерм, построенных для отдельных квазибинарных сечений.

Сравнение результатов показало, что модели Kohler'а и Muggianu дают близкие друг к другу тепловые эффекты образования сплавов. В случае моделирования по Тоор'у расчетные величины ΔH_{mix} тройных сплавов указывают на более выраженное экзотермическое смешение.

Проведена классификация расплавов олово-серебро-медь по признаку симметрии, исходя из особенностей имеющих изотерм теплоты смешения бинарных подсистем. Показано, что изучаемая тройная система принадлежит к «асимметричному» типу, в котором для описания энтальпии смешения наилучшим образом подходит модель Тоор'а.

В связи с тем, что в геометрических моделях рассматриваются только двойные взаимодействия, признано целесообразным провести дополнительные экспериментальные исследования смешения хотя бы некоторых трехкомпонентных составов для установления возможного вклада тройных взаимодействий в энтальпию смешения.

Работа выполнена по Государственному заданию ИМЕТ УрО РАН с использованием оборудования ЦКП «Урал-М».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рогачев А.С. Структура, стабильность и свойства высокоэнтروпийных сплавов // Физика металлов и металловедение. 2020. 121. № 8. С. 807–841.
2. Decterov S.A. Thermodynamic database for multicomponent oxide systems // Chim. Techno Acta. 2018. 5. P. 16–48.
3. Toop G.W. Predicting ternary activities using binary data // Trans. Metall. Soc. AIME. 1965. 233. P. 850–855.
4. Kohler F. Zur berechnung der thermodynamischen daten eines ternären systems aus den zugehörigen binären systemin // Monatsh. Chem. Verw. Anderer Wiss. 1960. 91. P. 738–740.

5. Muggianu Y.M., Gambino M., Bros J. Enthalpies de formation des alliages liquides bismuth-étain-gallium à 723 K. Choix d'une représentation analytique des grandeurs d'excès intégrales et partielles de mélange // *J. Chim. Phys. Phys.-Chim. Biol.* 1975. 72. P. 83–88.
6. Олейник К.И., Быков А.С. Калориметрическое исследование образования жидких сплавов Ag–Cu–Sn. Энтальпия смешения в граничных бинарных системах Cu–Ag, Cu–Sn и Ag–Sn при 1150°C // *Расплавы*. 2019. № 5. С. 12–17.
7. Oleinik K.I., Bykov A.S. Calorimetric study of the formation of liquid Ag–Cu–Sn alloys. Enthalpy of mixing for the boundary binary Cu–Ag, Cu–Sn, and Ag–Sn systems at 1150° C // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2019. 2019. P. 131–134.
8. Sharkey R.L., Pool M.J., Hoch M. Thermodynamic modeling of binary and ternary metallic solutions // *Metall. Trans.* 1971. 2. P. 3039–3046.
9. Pool M.J., Predel B., Schultheiss E. Application of the Setaram high temperature calorimeter for the determination of mixing enthalpies of liquid alloys // *Thermochim. Acta*. 1979. 28. P. 349–358.
10. Luef C., Flandorfer H., Ipser H. Lead-free solder materials: experimental enthalpies of mixing in the Ag–Cu–Sn and Cu–Ni–Sn ternary systems // *Z. Metallkd.* 2004. 95. P. 151–163.
11. Nazeri M.F.M., Ismail A.B., Mohamad A.A. Effect of polarizations on Sn–Zn solders alloys in alkaline electrolyte // *J. Alloys Compd.* 2014. 606. P. 278–287.
12. Ho C.-Y., Tsai M.-T., Duh J.-G., Lee J.-W. Bump height confinement governed solder alloy hardening in Cu/SnAg/Ni and Cu/SnAgCu/Ni joint assemblies // *J. Alloys Compd.* 2014. 600. P. 199–203.
13. Huang M., Zhao N., Liu S., He Y. Drop failure modes of Sn–3.0Ag–0.5Cu solder joints in wafer level chip scale package // *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. 2016. 26. P. 1663–1669.
14. Shnawah. D.A., Said S.B.M., Sabri M.F.M., Badruddin I.A., Che F.X. High-reliability low-Ag-content Sn–Ag–Cu solder joints for electronics applications // *J. Electron. Mater.* 2012. 41. P. 2631–2658.
15. Amin N.A.A.M., Shnawah D.A., Said S.M., Sabri M.F.M., Arof H. Effect of Ag content and the minor alloying element Fe on the electrical resistivity of Sn–Ag–Cu solder alloy // *J. Alloys Compd.* 2014. 599. P. 114–120.
16. Elhosiny Ali H., El-Taher A.M., Algarni H. Influence of bismuth addition on the physical and mechanical properties of low silver/lead-free Sn–Ag–Cu solder // *Mater. Today Commun.* 2024. 39. 109113.
17. Zhao X., Zhao M., Cui X., Xu T., Tong M. Effect of cerium on microstructure and mechanical properties of Sn–Ag–Cu system lead-free solder alloys // *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. 2007. 17. P. 805–810.
18. Zhang R.F., Zhang S.H., He Z.J., Jing J., Sheng S.H. Miedema Calculator: A thermodynamic platform for predicting formation enthalpies of alloys within framework of Miedema's Theory // *Comput. Phys. Commun.* 2016. 209. P. 58–69.
19. Hillert M. Empirical methods of predicting and representing thermodynamic properties of ternary solution phases // *Calphad*. 1980. 4. P. 1–12.

ESTIMATION OF MIXING ENTHALPY OF THE LIQUID Sn-Ag-Cu SYSTEM AT 1423 K FROM DATA ON THE PROPERTIES OF BINARY SUBSYSTEMS USING GEOMETRIC MODELS OF SOLUTIONS

A. S. Bykov, K. I. Oleinik*

Institute of Metallurgy, Ural Branch, RAS, Yekaterinburg, Russia.

**E-mail: 1007o1007@gmail.com*

The article considers the estimation of mixing enthalpy ΔH_{mix} of the Sn-Ag-Cu ternary system melts at a temperature of 1423 K from the calorimetric data on the mixing enthalpy of binary subsystems Ag-Cu, Ag-Sn and Cu-Sn measured earlier. The geometric models by Toop, Kohler and Muggianu, where binary data is jointly processed in each case according to a specific mathematical procedure, were applied to the ΔH_{mix} assessment. The results of calculations by these models are presented by the compositional dependences of ΔH_{mix} of the ternary system in the form of 3D surfaces, projections of these surfaces onto the plane of the compositional triangle, as well as isotherms plotted for individual quasi-binary sections. It was found that modeling using the Kohler's and Muggianu's methods gives insignificantly different results, whereas the values of the mixing enthalpy of ternary compositions in the Toop's model are noticeably more immersed into the negative (exothermic) region. As it is known from the scientific literature, the right choice of a geometric model depends on whether the ternary system under study belongs to a "symmetric" or "asymmetric" type. The shape of the available ΔH_{mix} isotherms of binary subsystems indicates that the Sn-Ag-Cu system is "asymmetric". The results calculated using the Toop's model are recognized as the most correct ones, since that model is recommended in the literature for describing "asymmetric" systems. The common limitation of all geometric models, considering only binary interparticle interactions, and the advisability of extra experimental study of three-component melts formation to reveal the possible contribution of ternary interactions to the mixing enthalpy are noted.

Keywords: thermodynamic properties, mixing enthalpy, Sn-Ag-Cu melts, subregular solution, Toop's model, Kohler's model, Muggianu's model

REFERENCES

1. Rogachev A.S. Struktura, stabil'nost' i svoystva vysokoentropiynykh splavov // Fizika metallov i metallovedeniye. 2020. 121. № 8. P. 807–841.
2. Decterov S.A. Thermodynamic database for multicomponent oxide systems // Chim. Techno Acta. 2018. 5. P. 16–48.
3. Toop G.W. Predicting ternary activities using binary data // Trans. Metall. Soc. AIME. 1965. 233. P. 850–855.
4. Kohler F. Zur berechnung der thermodynamischen daten eines ternären systems aus den zugehörigen binären systemen // Monatsh. Chem. Verw. Anderer Wiss. 1960. 91. P. 738–740.
5. Muggianu Y.M., Gambino M., Bros J. Enthalpies de formation des alliages liquides bismuth-étain-gallium à 723 K. Choix d'une représentation analytique des grandeurs d'excès intégrales et partielles de mélange // J. Chim. Phys. Phys.-Chim. Biol. 1975. 72. P. 83–88.
6. Oleinik K.I., Bykov A.S. Kalorimetricheskoe issledovanie obrazovaniya zhidkih splavov Ag–Cu–Sn. Ental'piya smesheniya v granichnykh binarnykh sistemah Cu–Ag, Cu–Sn i Ag–Sn pri 1150°C // Rasplavy. 2019. 5. C. 12–17.

7. Oleinik K.I., Bykov A.S. Calorimetric study of the formation of liquid Ag–Cu–Sn alloys. Enthalpy of mixing for the boundary binary Cu–Ag, Cu–Sn, and Ag–Sn systems at 1150° C // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2019. 2019. P. 131–134.
8. Sharkey R.L., Pool M.J., Hoch M. Thermodynamic modeling of binary and ternary metallic solutions // *Metall. Trans.* 1971. 2. P. 3039–3046.
9. Pool M.J., Predel B., Schultheiss E. Application of the Setaram high temperature calorimeter for the determination of mixing enthalpies of liquid alloys // *Thermochim. Acta*. 1979. 28. P. 349–358.
10. Luef C., Flandorfer H., Ipser H. Lead-free solder materials: experimental enthalpies of mixing in the Ag–Cu–Sn and Cu–Ni–Sn ternary systems // *Z. Metallkd.* 2004. 95. P. 151–163.
11. Nazeri M.F.M., Ismail A.B., Mohamad A.A. Effect of polarizations on Sn–Zn solders alloys in alkaline electrolyte // *J. Alloys Compd.* 2014. 606. P. 278–287.
12. Ho C.-Y., Tsai M.-T., Duh J.-G., Lee J.-W. Bump height confinement governed solder alloy hardening in Cu/SnAg/Ni and Cu/SnAgCu/Ni joint assemblies // *J. Alloys Compd.* 2014. 600. P. 199–203.
13. Huang M., Zhao N., Liu S., He Y. Drop failure modes of Sn–3.0Ag–0.5Cu solder joints in wafer level chip scale package // *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. 2016. 26. P. 1663–1669.
14. Shnawah. D.A., Said S.B.M., Sabri M.F.M., Badruddin I.A., Che F.X. High-reliability low-Ag-content Sn–Ag–Cu solder joints for electronics applications // *J. Electron. Mater.* 2012. 41. P. 2631–2658.
15. Amin N.A.A.M., Shnawah D.A., Said S.M., Sabri M.F.M., Arof H. Effect of Ag content and the minor alloying element Fe on the electrical resistivity of Sn–Ag–Cu solder alloy // *J. Alloys Compd.* 2014. 599. P. 114–120.
16. Elhosiny Ali H., El-Taher A.M., Algarni H. Influence of bismuth addition on the physical and mechanical properties of low silver/lead-free Sn–Ag–Cu solder // *Mater. Today Commun.* 2024. 39. 109113.
17. Zhao X., Zhao M., Cui X., Xu T., Tong M. Effect of cerium on microstructure and mechanical properties of Sn–Ag–Cu system lead-free solder alloys // *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. 2007. 17. P. 805–810.
18. Zhang R.F., Zhang S.H., He Z.J., Jing J., Sheng S.H. Miedema Calculator: A thermodynamic platform for predicting formation enthalpies of alloys within framework of Miedema's Theory // *Comput. Phys. Commun.* 2016. 209. P. 58–69.
19. Hillert M. Empirical methods of predicting and representing thermodynamic properties of ternary solution phases // *Calphad*. 1980. 4. P. 1–12.