

Електропровідність розплавів Sn–Ag–Cu з нанорозмірними керамічними домішками

Ю. Плевачук, О. Ткач, М. Дуфанець,
В. Повержук

*Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. Кирила і Мефодія, 8, Львів, Україна, 79005
e-mail: yuriy.plevachuk@lnu.edu.ua*

Експериментально досліджено вплив нанорозмірних керамічних домішок на електропровідність сплаву на основі Sn–Ag–Cu у широкому температурному інтервалі твердого і рідкого станів. Результати досліджень виявили, що електропровідність є дуже чутливою навіть до невеликої кількості домішкових елементів. Встановлено, що додавання керамічних наночастинок SiO₂, TiO₂, ZrO₂ та Al₂O₃ знижує абсолютні значення електропровідності. Експериментальні криві залежності електропровідності від температури апроксимовано поліномом другого ступеня. Результати пояснено зростанням кількості кристалічних дефектів, які є центрами розсіювання електронів провідності в металах, і зумовлюють зниження електропровідності при додаванні нанорозмірних керамічних домішок.

Ключові слова: Sn–Ag–Cu, електропровідність, безсвинцеві припої, керамічні наночастинок, розплави, високі температури.

1. Вступ

Сплави на основі Sn, зокрема, потрібної системи Sn–Ag–Cu (SAC), використовують як безсвинцеві припої в електронній промисловості, а тому є предметом інтенсивних досліджень. Одним із перспективних шляхів покращення властивостей таких припоїв є синтез нанокомпозитних матеріалів, у яких нанорозмірні частинки, введені в базовий об'ємний матеріал (матрицю), дають змогу керувати властивостями в широкому діапазоні фізико-хімічних параметрів. Тому вивчення впливу нанорозмірних частинок (металів в об'ємних і нанорозмірних формах, керамічних або карбонових нанотрубок) на фізичні та механічні властивості базових металевих сплавів стало особливо актуальним [1,2]. Тенденція до зменшення розмірів спаїв у мікроелектроніці підвищує вимоги до надійності припоїв, якої можна досягнути у нових нанокомпозитних матеріалах внесенням керамічних наночастинок. Однією з найбільш поширених процедур покращення механічних властивостей металів і металевих сплавів є додавання до базових (матричних) сплавів наночастинок оксидів. Наприклад, нанорозмірні домішки γ -Fe₂O₃ і ZnO зміцнюють мікроструктуру нанокомпозитних

сплавів системи Sn–Ag–Cu [3, 4], змочуваність покращувалася з додаванням нано- γ -Fe₂O₃ та покритих Ni графенових нанопластинок [5], а міцність покращувалася з додаванням нано γ -Fe₂O₃ і нано ZnO [3, 4]. У праці [6] показано, що нанорозмірні домішки Al підвищують опір до повзучості сплавів Sn–Ag–Cu. Авторами [7] досліджено вплив незначних домішок керамічних наночастинок (SiO₂, TiO₂, ZrO₂) на мікроструктуру та механічні властивості паяних з'єднань Cu/Sn_{94,56}Ag_{4,14}Cu_{1,29}+0,5 мас.% НЧ/Cu та Cu/Sn_{94,56}Ag_{4,14}Cu_{1,29}+1,0 мас. % НЧ/Cu. Показано, що в такому випадку їхня мікроструктура покращується, оскільки сповільнюється зростання міжповерхневого інтерметалічного шару. Крім того, невеликі (до 1 мас. %) домішки керамічних наночастинок (Al₂O₃, SiO₂, TiO₂, ZrO₂, SnO₂) підвищують мікротвердість і міцність під час розтягування припою, а також міцність на зсув паяного шва. Це пов'язано зі зменшенням швидкості росту інтерметалічних сполук (ІМС) та зменшенням розміру зерна ІМС в об'ємі, а також зменшенням середнього розміру шару ІМС на межі припій/підкладка. Однак деякі дослідження показали, що подальше зростання кількості керамічних наночастинок у матриці припою (понад 1 мас. %) призводить до зменшення позитивних ефектів у припоях. Припускалося, що відбувається агломерація наночастинок і зменшення їхньої поверхневої енергії як в матриці припою, так і в інтерфейсному шарі припій/підкладка. На відміну від численних теоретичних та експериментальних досліджень механічних характеристик, структурно-чутливі теплофізичні та електрофізичні властивості евтектичних сплавів на основі Sn вивчені недостатньо. Тому отримання даних про поведінку електропровідності сплавів потрібної системи Sn–Ag–Cu в широкому інтервалі температур, дослідження впливу неметалевих наночастинок на поведінку структурно-чутливих теплофізичних властивостей цих сплавів є особливо актуальними як з погляду фундаментальної науки, так і для практичних застосувань, оскільки сприятимуть отриманню нових функціональних матеріалів шляхом синтезу нанокompatитних матеріалів, у яких нанорозмірні частинки, введені в базовий об'ємний матеріал (матрицю), дають можливість керувати його властивостями у широкому діапазоні фізико-хімічних та механічних параметрів.

2. Експериментальна частина

Зразки виготовляли з чистих компонентів Ag, Cu та Sn (CHEMPUR, Feinchemikalien und Forschungsbedarf GmbH, 99,999 %), наважених з точністю до 10⁻⁴г методом індукційної плавки в дуговій печі в захисній атмосфері високочистого аргону, додатково очищеної преплавлюванням титанового гетера, використовуючи невитратний вольфрамовий електрод. Гомогеність сплавів досягалася декількаразовим переплавлюванням, а хімічний склад визначали методом X-променевого аналізу фаз. Досліджували як об'ємні зразки, так і у вигляді стрічок, виготовлені методом швидкого загартування. Вміст домішок у зразках становив 0,5 мас. %. Вимірювання електропровідності проводили за допомогою чотириточкового методу під час нагрівання та охолодження в інтервалі від кімнатної температури до приблизно 650 К. Методика дослідження електропровідності та деталі експерименту описано в [8, 9]. Похибка визначення електропровідності не перевищувала 2 %.

3. Результати та обговорення

Залежність електропровідності від температури $\sigma(T)$ сплаву $\text{Sn}_{94,56}\text{Ag}_{4,14}\text{Cu}_{1,29}$ з керамічними домішками вимірювали в режимах нагрівання й охолодження протягом декількох циклів з різною швидкістю. Встановлено, що швидкість нагрівання й охолодження помітно не впливала на поведінку електропровідності. Температурна залежність електропровідності дослідженого базового сплаву представлено на рис. 1. Електропровідність всіх сплавів в твердому стані поступово зменшується під час нагрівання.

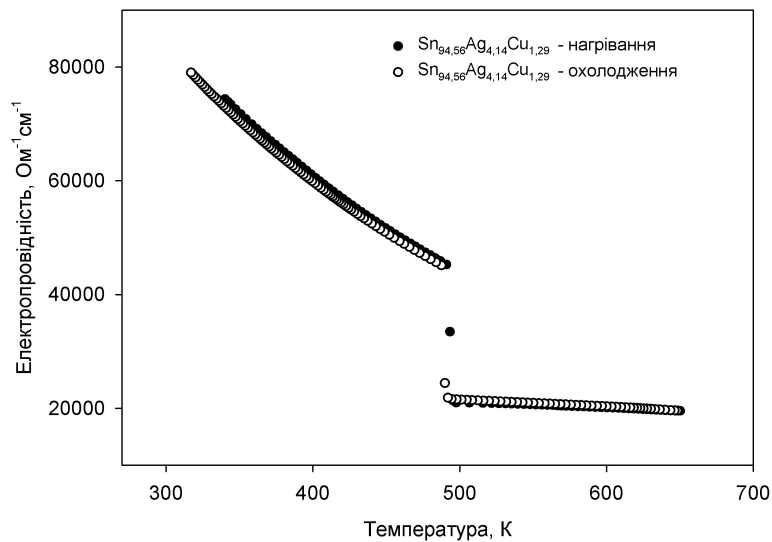


Рис. 1: Залежність електропровідності від температури сплаву $\text{Sn}_{94,56}\text{Ag}_{4,14}\text{Cu}_{1,29}$

Як видно з рис. 1, в інтервалі температур між кімнатною T_R та плавлення T_m криві нагрівання та охолодження сплаву $\text{Sn}_{94,56}\text{Ag}_{4,14}\text{Cu}_{1,29}$ без домішок мають однаковий нахил і практично збігаються. У ділянці плавлення-кристалізації спостерігається гістерезис кривих $\sigma(T)$. Гістерезис між кривими нагрівання та охолодження відображає ступінь термодинамічної рівноваги між рідкою та твердою фазами, що мають однакові хімічні потенціали. Рівноважний процес кристалізації можливий лише тоді, коли швидкість охолодження прямує до нуля. Оскільки реальний процес кристалізації є нерівноважним, то твердий розчин, що утворюється, є неоднорідним за складом. Як показано в роботі [10], процеси плавлення і кристалізації металевих сплавів не завжди є зворотними, оскільки плавлення однокомпонентних сплавів та багатокомпонентних відбувається по-різному. Плавлення перших супроводжується порушенням стабільності кристалічної ґратки, а других – полягає в розчиненні тугоплавких фаз у рідині, що утворюється. Тому, на відміну від рівноважної кристалізації, за якої процеси можуть розглядатися як зворотні лише тоді, коли во-

ни відбуваються в рівновазі, невірноважна кристалізація неминуче призводить до відхилення від рівноваги, що, своєю чергою, призводить до зростання температури плавлення. Таким чином, поява тугоплавких фракцій, а також гравітаційна ліквідація призводять до перегріву сплаву вище від ліквідусу. Залежність електропровідності від температури $\sigma(T)$ можна представити рівнянням:

$$\sigma(T) = \sigma_R + a_S(T - T_R) + b_S(T - T_R)^2, \quad (1)$$

де σ_R – електропровідність за кімнатної температури. Значення коефіцієнтів a_S , b_S для кривих охолодження представлено в табл. 1.

Табл. 1: Коефіцієнти поліномів рівняння (1) в інтервалі $T_R - T_m$

| Хімічний склад, ат.% | σ , Ом ⁻¹ ·см ⁻¹ | a_S , Ом ⁻¹ ·см ⁻¹ ·К ⁻¹ | b_S , Ом ⁻¹ ·см ⁻¹ ·К ⁻² |
|---|---|---|---|
| Sn _{94,56} Ag _{4,14} Cu _{1,29} | 83399 | -273 | 0,3731 |
| Sn _{94,56} Ag _{4,14} Cu _{1,29} +TiO ₂ | 91098 | -418 | 0,5972 |
| Sn _{94,56} Ag _{4,14} Cu _{1,29} +SiO ₂ | 85092 | -369 | 0,6158 |
| Sn _{94,56} Ag _{4,14} Cu _{1,29} +ZrO ₂ | 81347 | -335 | 0,6772 |
| Sn _{94,56} Ag _{4,14} Cu _{1,29} +Al ₂ O ₃ | 75067 | -253 | 0,3603 |

У разі додавання нанорозмірних керамічних домішок (рис. 2–5) спостерігається збільшення розходження між кривими нагрівання та охолодження. Крім того, в сплавах Sn_{94,56}Ag_{4,14}Cu_{1,29}+SiO₂, Sn_{94,56}Ag_{4,14}Cu_{1,29}+TiO₂, Sn_{94,56}Ag_{4,14}Cu_{1,29}+ZrO₂ спостерігається різний нахил кривих нагрівання та охолодження.

При досягненні температури плавлення T_m кожного зразка спостерігається різке зниження електропровідності, яке свідчить про початок плавлення. У рідкому стані електропровідність знижується з підвищенням температури, а криві $\sigma(T)$ описуються виразом:

$$\sigma(T) = \sigma_m + a_m(T - T_m) + b_m(T - T_m)^2, \quad (2)$$

де σ_m – електропровідність за кімнатної температури T_m . Деякий розкид точок на кривих $\sigma(T)$ розплавів є помітнішим, ніж у твердому стані, що пояснюється поступовими структурними перетвореннями в певному температурному діапазоні. Коефіцієнти виразу (2) a_m , b_m подано в табл. 2.

Табл. 2: Коефіцієнти поліномів рівняння (2) в інтервалі $T_m - 650$ К

| Хімічний склад, ат.% | σ_m , Ом ⁻¹ ·см ⁻¹ | a_m , Ом ⁻¹ ·см ⁻¹ ·К ⁻¹ | b_m , Ом ⁻¹ ·см ⁻¹ ·К ⁻² |
|---|---|---|---|
| Sn _{94,56} Ag _{4,14} Cu _{1,29} | 21610 | -9,8605 | -0,0174 |
| Sn _{94,56} Ag _{4,14} Cu _{1,29} +TiO ₂ | 21865 | -9,2451 | -0,0203 |
| Sn _{94,56} Ag _{4,14} Cu _{1,29} +SiO ₂ | 23034 | -8,156 | 0,6843 |
| Sn _{94,56} Ag _{4,14} Cu _{1,29} +ZrO ₂ | 19129 | -6,3533 | -0,0371 |
| Sn _{94,56} Ag _{4,14} Cu _{1,29} +Al ₂ O ₃ | 16806 | -11,6745 | 0,0432 |

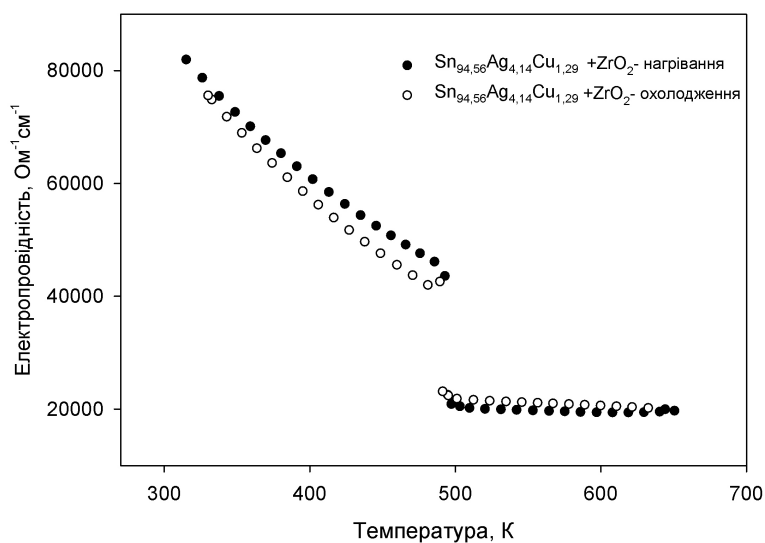


Рис. 2: Залежність електропровідності від температури сплаву $\text{Sn}_{94,56}\text{Ag}_{4,14}\text{Cu}_{1,29}$ з нанорозмірними домішками ZrO_2

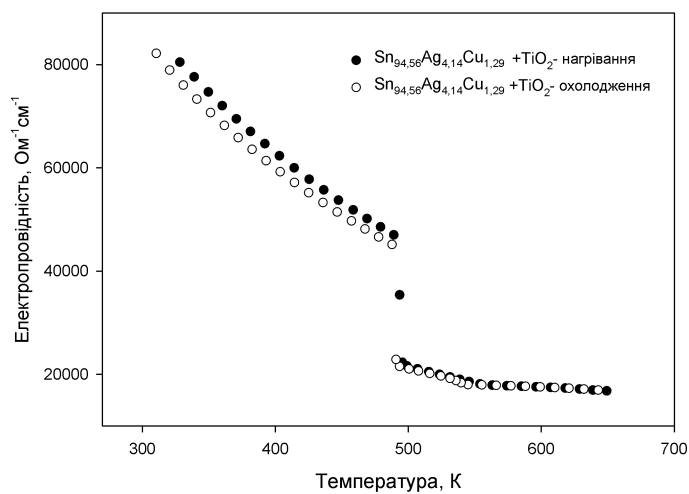


Рис. 3: Залежність електропровідності від температури сплаву $\text{Sn}_{94,56}\text{Ag}_{4,14}\text{Cu}_{1,29}$ з нанорозмірними домішками TiO_2

Як видно з рис. 6, додавання керамічних домішок приводить до зменшення електропровідності як у твердому, так і в рідкому станах, що можна пояснити наявністю додаткових центрів розсіяння електронів.

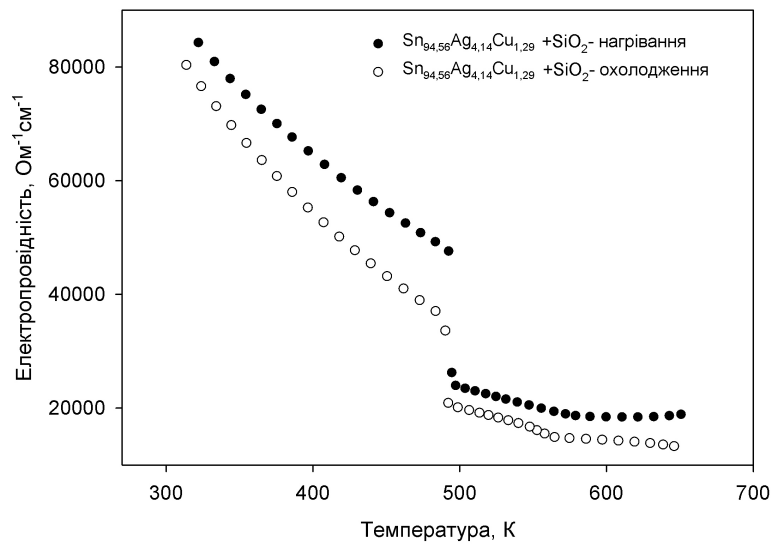


Рис. 4: Залежність електропровідності від температури сплаву Sn_{94.56}Ag_{4.14}Cu_{1.29} з нанорозмірними домішками SiO₂

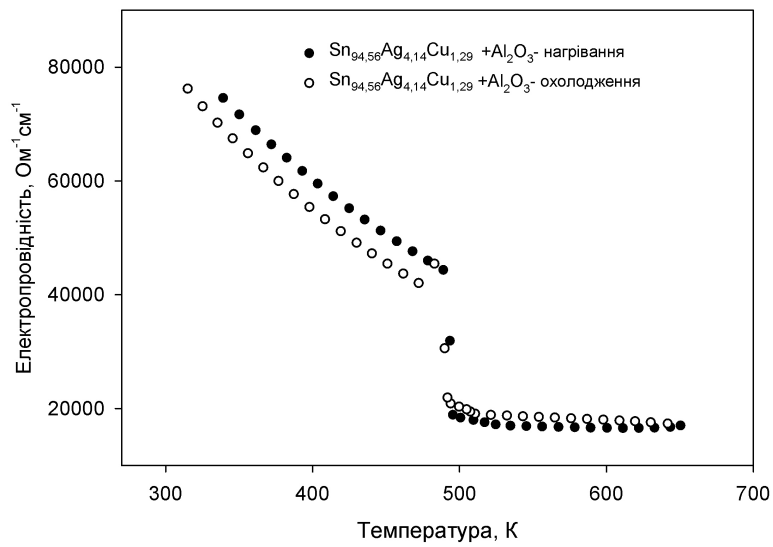


Рис. 5: Залежність електропровідності від температури сплаву Sn_{94.56}Ag_{4.14}Cu_{1.29} з нанорозмірними домішками Al₂O₃

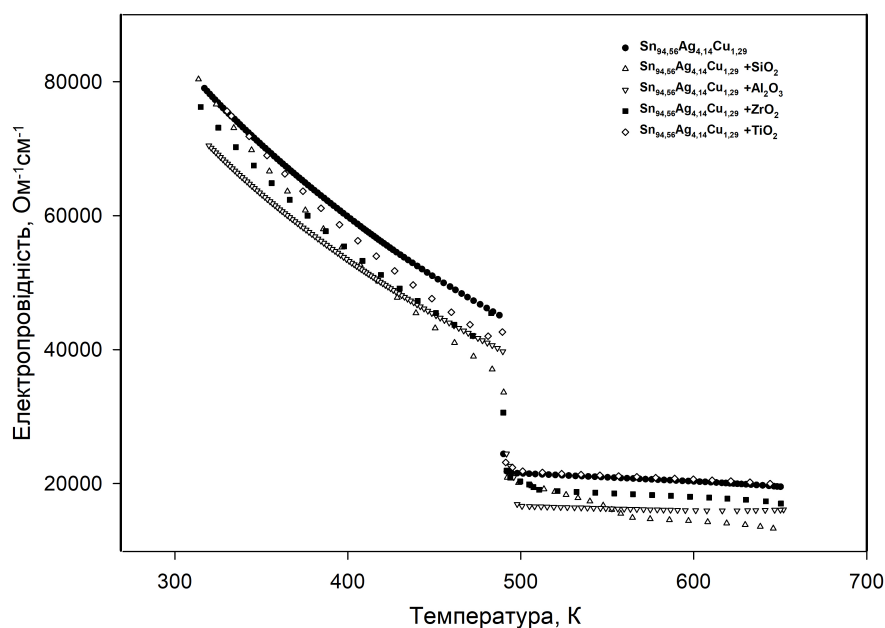


Рис. 6: Залежність електропровідності від температури сплаву $\text{Sn}_{94,56}\text{Ag}_{4,14}\text{Cu}_{1,29}$ з нанорозмірними домішками Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , ZrO_2

За результатами електропровідності визначено температури плавлення T_m і кристалізації T_s досліджених сплавів. Температури плавлення і кристалізації, визначені за перегинами кривих $\sigma(T)$ на рис. 2–5, наведені в табл. 3. Порівняння наших експериментальних значень температур плавлення з попередніми теоретичними та експериментальними дослідження сплавів на базі потрійної системи Sn-Ag-Cu, присвячених термодинамічним розрахункам збагаченої оловом ділянки фазової діаграми [11], дало підстави зробити висновок, що невеликі (до 1 мас. %) нанорозмірні керамічні домішки суттєво не впливають на температуру плавлення базового сплаву $\text{Sn}_{94,56}\text{Ag}_{4,14}\text{Cu}_{1,29}$.

Табл. 3: Коефіцієнти поліномів рівняння (2) в інтервалі $T_m - 650$ К

| Хімічний склад, ат.% | T_m , К | T_s , К |
|---|-----------|-----------|
| $\text{Sn}_{94,56}\text{Ag}_{4,14}\text{Cu}_{1,29}$ | 491,3 | 485,2 |
| $\text{Sn}_{94,56}\text{Ag}_{4,14}\text{Cu}_{1,29} + \text{TiO}_2$ | 491,4 | 486,4 |
| $\text{Sn}_{94,56}\text{Ag}_{4,14}\text{Cu}_{1,29} + \text{SiO}_2$ | 491,2 | 484,6 |
| $\text{Sn}_{94,56}\text{Ag}_{4,14}\text{Cu}_{1,29} + \text{ZrO}_2$ | 491,7 | 485,3 |
| $\text{Sn}_{94,56}\text{Ag}_{4,14}\text{Cu}_{1,29} + \text{Al}_2\text{O}_3$ | 491,8 | 485,4 |

Згідно з [12], об'ємна частка, форма, розмір, а також тип домішок та матриці мають вплив на електричний опір композитного матеріалу. Оскільки кристалічні де-

фекти є центрами розсіювання електронів провідності в металах, збільшення їхньої кількості знижує електропровідність. Концентрація цих дефектів залежить від температури, хімічного складу і ступеня холодного деформування зразка металу. Експериментально встановлено, що загальна електропровідність металу складається з внесків теплових коливань, домішок і пластичної деформації, тобто механізми розсіювання діють незалежно один від одного. Ці три компоненти є результатом порушення нормального руху електронів, що насамперед пов'язано з розсіюванням кристалічної ґратки і домішковим розсіюванням. Неідеальність ґратки зменшує середню довжину вільного пробігу електрона. Як наслідок, це призводить до зменшення рухливості електронів і, отже, до зменшення значення електропровідності. У випадку композитних сплавів загальна електропровідність спадатиме внаслідок більшого внеску домішкового і деформаційного компонентів порівняно з базовим зразком.

Аналіз об'ємної частки центрів розсіяння електронів, що складається з об'ємних фракцій зони пластичної деформації, домішок та пористості виявив, що незначна зміна електропровідності зумовлена низькою об'ємною часткою пористості в композитних сплавах та низькою кількістю домішок. Але, як видно на рис. 6, навіть незначна кількість домішок може знизити електропровідність. З практичного погляду це означає, що при правильному виборі типу та кількості нанорозмірних керамічних домішок композитні сплави можуть забезпечити надійний електричний контакт, про що свідчать результати досліджень.

4. Висновки

Експериментально досліджено залежність електропровідності від температури сплавів $\text{Sn}_{94,56}\text{Ag}_{4,14}\text{Cu}_{1,29}$ системи Sn–Ag–Cu в твердому та рідкому станах у широкому діапазоні температур від кімнатної до 650 K. Проведені вимірювання в режимах нагрівання та охолодження протягом декількох циклів з різною швидкістю показали, що швидкість нагрівання й охолодження помітно не впливала на поведінку електропровідності. Гістерезис кривих $\sigma(T)$ у ділянці плавлення-кристалізації відображає ступінь термодинамічної рівноваги між рідкою та твердою фазами, що мають однакові хімічні потенціали. За результатами електропровідності визначено температури плавлення і кристалізації досліджених сплавів. Встановлено, що невелика кількість (до 1 мас. %) нанорозмірних керамічних домішок SiO_2 , TiO_2 , ZrO_2 та Al_2O_3 суттєво не впливають на температуру плавлення базового сплаву. Додавання керамічних домішок приводить до зменшення електропровідності за рахунок додаткових центрів розсіяння електронів як у твердому, так і в рідкому станах, що, однак, не перевищує 12 %.

Дослідження виконані за підтримки Міністерства освіти і науки України (Державний реєстраційний номер НДР: 0122U001521).

1. Contescu C. Dekker Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology / C. Contescu, K. Putyera. – New York : Nova Science Publishers, 2008. – 4521 p.
2. Bhushan B. Springer Handbook of Nanotechnology / B. Bhushan. – Berlin : Springer, 2007. – 1916 p.
3. Zhao X. C. Effect of γ -Fe₂O₃ nanoparticles size on the properties of Sn–1.0Ag–0.5Cu nano-composite solders and joints / X. C. Zhao, Y. N. Wen, Y. Li, Y. Liu, and Y. Wang // Journal of Alloys and Compounds. – 2016. – Vol. 662. – P. 272–282. doi:10.1016/j.jallcom.2015.11.213.
4. Sobhy M. Effect of ageing time on the tensile behavior of Sn–3.5 wt% Ag–0.5 wt% Cu (SAC355) solder alloy with and without adding ZnO nanoparticles / M. Sobhy, A. M. El-Refai, M. M. Mousa, and G. Saad // Journal of Materials Science and Engineering: A. – 2015. – Vol. 646. – P. 82–89. doi:10.1016/j.msea.2015.08.053.
5. Chen G. Microstructures and properties of new Sn–Ag–Cu lead-free solder reinforced with Ni-coated graphene nanosheets / G. Chen, F. Wu, C. Liu, V. V. Silberschmidt, Y. C. Chan // J. Alloys Compd. – 2016. – Vol. 656. – P. 500–509. doi:10.1016/j.jallcom.2015.09.178.
6. Zhang L. Microstructures and properties of Sn₅₈Bi, Sn₃₅Bi_{0.3}Ag, Sn₃₅Bi_{1.0}Ag solder and solder joints / L. Zhang, J. G. Han, Y. H. Guo, and L. Sun // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2015. – Vol. 26. – P. 7629–7634. doi:10.1007/s10854-015-3400-x.
7. Yakymovych A. Morphology and Shear Strength of Lead-Free Solder Joints with Sn_{3.0}Ag_{0.5}Cu Solder Paste Reinforced with Ceramic Nanoparticles / A. Yakymovych, Y. Plevachuk, P. S. Svec, P. Svec, D. Janicvokic, P. Sebo, N. Beronska, A. Roshanghias, and H. Ipser // J. Electron. Mater. – 2016. – Vol. 45(12). – P. 6143–6149. doi:10.1007/s11664-016-4832-7.
8. Булавін Л. А. Критичні явища розшарування в рідинах на Землі та в космосі / Л. А. Булавін, Ю. О. Плевачук, В. М. Склярчук. – Київ : Наукова думка, 2011. – 278 с.
9. Plevachuk Yu. Electrophysical measurements for strongly aggressive liquid semiconductors / Yu. Plevachuk, V. Sklyarchuk // Meas. Sci. Technol. – 2001. – Vol. 12. – P. 23–26. doi:10.1088/0957-0233/12/1/303.
10. Sklyarchuk V. Melting-solidification process in Pb-Bi melts / V. Sklyarchuk, Yu. Plevachuk, G. Gerbeth, S. Eckert // Journal of Physics: Conference Series. – 2007. – Vol. 79. – P. 012019. doi:10.1088/1742-6596/79/1/012019.
11. Moon K.-W. Experimental and Thermodynamic Assessment of Sn-Ag-Cu Solder Alloys / K.-W. Moon, W. J. Boettinger, U. R. Kattner, F. S. Biancianiello, and C. A. Handwerker // J. Electron. Mater. – 2000. – Vol. 29. – P. 1122–1236. doi:10.1007/s11664-000-0003-x.
12. Nai S. M. L. Effect of Carbon Nanotubes on the Shear Strength and Electrical Resistivity of a Lead-Free Solder / S. M. L. Nai, J. Wei, and M. Gupta // J. Electron. Mater. – 2008. – Vol. 37(4). – P. 515–522. doi:10.1007/s11664-008-0379-6.

References

1. C. Contescu, K. Putyera, Dekker Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology, Nova Science Publishers, New York, 2008.

2. B. Bhushan, Springer Handbook of Nanotechnology, Springer, Berlin, 2007.
3. X. C. Zhao, Y. N. Wen, Y. Li, Y. Liu, and Y. Wang. *J. Alloys Compd.* **662**, 272–282 (2016). doi:10.1016/j.jallcom.2015.11.213.
4. M. Sobhy, A. M. El-Refai, M. M. Mousa, and G. Saad, *J. Mater. Sci. Eng. A*, **646**, 82–89 (2015). doi:10.1016/j.msea.2015.08.053.
5. G. Chen, F. Wu, C. Liu, V. V. Silberschmidt, Y. C. Chan, *J. Alloys Compd.* **656**, 500–509 (2016). doi:10.1016/j.jallcom.2015.09.178.
6. L. Zhang, J. G. Han, Y. H. Guo, and L. Sun, *J. Mater. Sci.: Materials in Electronics*. **26**, 7629–7634 (2015). doi:10.1007/s10854-015-3400-x.
7. A. Yakymovych, Y. Plevachuk, P. S. Svec, P. Svec, D. Janicvokic, P. Sebo, N. Beronska, A. Roshanghias, and H. Ipsier, *J. Electron. Mater.* **45**, 6143–6149 (2016). doi:10.1007/s11664-016-4832-7.
8. Л. А. Булавін, Ю. О. Плевачук, В. М. Склярчук. Критичні явища розшарування в рідинах на Землі та в космосі, Наукова думка, Київ, 2011.
9. Yu. Plevachuk, V. Sklyarchuk, *Meas. Sci. Technol.* **12**, 23–26 (2001). doi:10.1088/0957-0233/12/1/303.
10. V. Sklyarchuk, Yu. Plevachuk, G. Gerbeth, S. Eckert, *J. Phys.: Conf. Series*. **79**, 012019 (2007). doi:10.1088/1742-6596/79/1/012019.
11. K.-W. Moon, W. J. Boettinger, U. R. Kattner, F. S. Biancaniello, and C. A. Handwerker, *J. Electron. Mater.* **29**, 1122–1236 (2000). doi:10.1007/s11664-000-0003-x.
12. S. M. L. Nai, J. Wei, and M. Gupta, *J. Electron. Mater.* **37**, 515–522 (2008). doi:10.1007/s11664-008-0379-6.

Стаття надійшла до редколегії: 09.08.2022

Прийнята до друку: 29.08.2022

Electrical conductivity of liquid Sn–Ag–Cu alloys with nanosized ceramic admixtures

Yu. Plevachuk, O. Tkach, M. Dufanets, V. Poverzhuk

*Ivan Franko National University of Lviv,
8 Kyrylo and Mefodiy Str., Lviv, Ukraine, 79005
e-mail: yuriy.plevachuk@lnu.edu.ua*

Sn-based alloys, in particular the alloys of Sn–Ag–Cu (SAC) ternary system, are used as lead-free solders in the electronics industry and therefore are the subject of intensive research. One of the promising ways to improve the properties of such solders is the synthesis of nanocomposite materials, in which nanosized particles introduced into the basic bulk material allow (matrix) to control the properties in a wide range of physicochemical parameters. Therefore, the study of the influence of different nanosized particles like metals, ceramics or carbon nanotubes on the physical and mechanical properties of basic metal alloys has become particularly relevant. The tendency to reduce the size of joints in microelectronics increases the requirements for the reliability of solders, which can be achieved in new nanocomposite materials by introducing ceramic nanoparticles. One of the most common procedures for improving the mechanical properties of solder joints is the addition of oxide nanoparticles to the matrix alloys. In this work, the effect of nanosized ceramic impurities on the electrical conductivity of the alloy $\text{Sn}_{94,56}\text{Ag}_{4,14}\text{Cu}_{1,29}$ was investigated experimentally in a wide temperature range of the solid and liquid states. Research results revealed that electrical conductivity is very sensitive even to a small amount of impurity elements. It was established that the addition of ceramic nanoparticles SiO_2 , TiO_2 , ZrO_2 and Al_2O_3 reduces the absolute values of electrical conductivity. The experimental curves of dependence of electrical conductivity on temperature are approximated by a polynomial of the second degree. The results are explained by the increase in the number of crystal defects, which are centers of scattering of conduction electrons in metals, and lead to a decrease in electrical conductivity when adding nanosized ceramic impurities. According to the results of electrical conductivity were determined, the melting temperatures T_m and crystallization T_s of the investigated alloys. It was found that a small amount (up to 1 wt. %) of nanosized ceramic impurities does not significantly affect the melting temperature of the basic alloy.

Key words: Sn–Ag–Cu, electrical conductivity, lead-free solder, ceramic nanoparticles, melts, high temperatures.