

ВПЛИВ НАНОЧАСТИНОК Ni НА ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ СПЛАВУ $\text{Sn}_{95.5}\text{Ag}_{3.8}\text{Cu}_{0.7}$

О. Ткач¹, Ю. Плевачук¹, В. Склярчук¹, Ю. Кулик¹, Р. Серкіз¹, В. Дідух²

¹Львівський національний університет імені Івана Франка
вул. Кирила і Мефодія, 8, Львів, 79005, Україна

²Незалежний дослідник

(Отримано 14 липня 2020 р.; в остаточному вигляді — 01 серпня 2020 р.; прийнято до друку — 03 серпня 2020 р.; опубліковано онлайн — 06 жовтня 2020 р.)

Досліджено вплив нанорозмірних домішок нікелю (до 3 ваг.%) на електропровідність сплаву $\text{Sn}_{95.5}\text{Ag}_{3.8}\text{Cu}_{0.7}$ (SAC387). Показано, що електропровідність поступово зменшується зі збільшенням умісту домішок Ni. Електропровідність, як структурно-чутлива транспортна характеристика рідкого стану речовини, має важливе значення для моделювання процесів плавлення і кристалізації. Дані електропровідності дають додаткову інформацію про вплив домішок на структуру й фізико-хімічні властивості металевої матриці, що важливо для розуміння мікроструктурних перетворень у рідкому стані.

Ключові слова: наночастинки, композитний припій, евтектика, інтерметалева сполука, безсвинцевий припій, електропровідність.

DOI: <https://doi.org/10.30970/jps.24.3602>

I. ВСТУП

Щораз більший науковий інтерес до нанокompозитних матеріалів на основі сплавів Sn з невеликими домішками різних металів [1–4], оксидів [5–8] і вуглецю [9–12] у нанорозмірній формі зумовлений можливим застосуванням цих матеріалів як альтернативи комерційним безсвинцевим припоєм. Покращені механічні властивості та зміцнена мікроструктура паяних з'єднань із використанням нанокompозита сплавів потрібної системи Sn–Ag–Cu (SAC) порівняно зі сплавами без нановключень виявили нові можливості для розвитку використовуваних тепер комерційних безсвинцевих припоїв [13, 14]. Основна перевага додавання нанорозмірних домішок пов'язана зі сповільненням екстенсивного зростання інтерметалевої сполуки (ІМС) Cu_6Sn_5 на межі припій/Cu. Це відбувається під час розподілу наночастинок на поверхні Cu_6Sn_5 , унаслідок чого сповільнюється зростання сполуки як на межі поділу, так і в об'ємі припою. Адсорбовані наночастинки в приповерхневому шарі Cu_6Sn_5 сповільнюють дифузію атомів Sn з припою в напрямі інтерфейсу припій/Cu і тим самим пригнічують розростання ІМС.

Кількість робіт, присвячених експериментальним дослідженням нанокompозитних SAC - припоїв у рідкому стані після плавлення, а також у напівтвердому стані, незначна порівняно з подібними дослідженнями цих матеріалів у твердому стані [15–19]. Установлено, що незначні металеві нанорозмірні домішки (до 4 ваг.%) впливають на мікроструктуру твердих припоїв, але майже не впливають на температуру плавлення [15–17]. У роботі [19] на прикладі калориметричних вимірювань показано, що у разі додавання кобальту в об'ємній і нанорозмірній формах до розплаву $\text{Sn}_{95.5}\text{Ag}_{3.8}\text{Cu}_{0.7}$ спостерігали додаткові теплові ефекти під час плавлення наночастинок Co порів-

няно з плавленням кобальту в об'ємній формі. Під час паяння ділянка спаювання нагрівається приблизно до 523 К, тоді як температура плавлення припою становить 490 К. Тому наночастинки металів мали б частково або повністю розчинитися в рідкій матриці SAC. З огляду на це, експериментальні результати досліджень теплофізичних і термодинамічних властивостей, а також структури рідких нанокompозитних SAC — припоїв з домішками наночастинок металів можуть давати необхідну інформацію для надійного моделювання процесів паяння.

У зв'язку з помітним впливом наночастинок Ni на мікроструктуру й механічні властивості безсвинцевих припоїв та паяних з'єднань, їх дослідженню присвячено чимало праць [18, 20–23]. Однак, наскільки нам відомо, літературних даних про дослідження структури й теплофізичних властивостей нанокompозитних припоїв SAC з домішками нанорозмірного нікелю в рідкому стані вище від температури плавлення немає. У цій роботі досліджено електропровідність нанокompозита $\text{Sn}_{95.5}\text{Ag}_{3.8}\text{Cu}_{0.7}+\text{Ni}$ в рідкому стані.

II. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Експериментальні зразки виготовляли з чистих Ag, Cu, Sn (99.999% чистоти, Alfa Aesar) методом індукційної плавки в дуговій печі прямої дії в атмосфері високочистого аргону, додатково очищеного переплавлюванням титанового гетера, використовуючи невитратний вольфрамовий електрод.

Щоб досягти гомогенності, зразки переплавляли тричі, перевертаючи після кожного чергового переплавлювання. Вимірювали електропровідність під тиском аргону (до 25 МПа) для збереження сталого хімічного складу протягом усього експерименту.

Електропровідність визначали контактним чотири-



точковим методом. Досліджувані зразки поміщали в циліндричні комірki з кераміки нітриду бору (BN), що має добрі антикорозійні та ізоляційні властивості, а також досить високу теплопровідність (біля $36 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ за 873 К). Однією з переваг кераміки BN є те, що вона легко піддається механічній обробці. Комірki виготовляли у формі вертикальних контейнерів із внутрішньою робочою порожниною висотою 50 мм і діаметром 3 мм . Упресовані в стінки комірki вздовж її осі точкові графітові електроди ділили ділянку, заповнену зразком, на декілька зон, що давало змогу визначати електропровідність як окремих зон, так і сумарне значення декількох із них для отримання достовірних значень. Високотемпературна піч з трьома незалежно контрольованими нагрівними елементами дозволяла підтримувати у вимірювальному інтервалі температур рівномірне температурне поле в межах 0.3 К вздовж зразка. Експериментальна установка і процедура вимірювань докладно описані в [24]. Досліджували мікроструктуру за допомогою растрового електронного мікроскопа – мікροаналізатора РЕММА-102-02.

III. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Кристалічну структуру наночастинок, а також фазовий склад зразків після вимірювань електропровідності аналізували на автоматизованому дифрактометрі ДРОН-3 в $\text{CuK } \alpha$ -випромінюванні, монохроматизованому відбиванням від монокристала пірографіту, встановленим на дифрагованому пучку. Спектри записували в режимі неперервного переміщення детектора з швидкістю 2 град./хв .

На рис. 1 показано дифрактограму синтезованого нанопорошку Ni, який містить піки, що відповідають (111), (200), (220) (311) та (222) площинам нікелю. Відповідно до аналізу за методом Рітвельда, наночастинки Ni мають кубічну кристалічну структуру (просторова група $\text{Fm}\bar{3}m$).

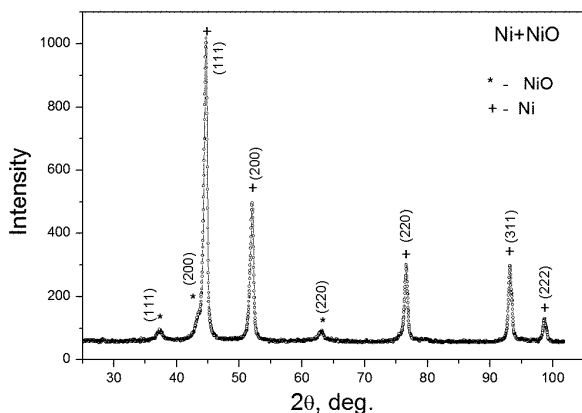


Рис. 1. Дифрактограма наночастинок Ni
Fig. 1. Diffractogram of Ni nanoparticles

Залежність електропровідності від температури $\sigma(T)$ розплавів $\text{Sn}_{95.5}\text{Ag}_{3.8}\text{Cu}_{0.7}$ з різною кількістю нанорозмірних домішок нікелю (від 1 до 3 ваг.%) вимірювали під час нагрівання та охолодження в широкому інтервалі температур (400 К – 1100 К).

Швидкість нагрівання та охолодження становила 10 К/хв . Як видно з рис. 2–4, за умови досягнення температури плавлення починається різке зниження електропровідності до значень приблизно $17500 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ у розплаві $\text{Sn}_{95.5}\text{Ag}_{3.8}\text{Cu}_{0.7}+1 \text{ ваг.}\% \text{ Ni}$, $16700 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ у розплаві $\text{Sn}_{95.5}\text{Ag}_{3.8}\text{Cu}_{0.7}+2 \text{ ваг.}\% \text{ Ni}$ та $14700 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ у розплаві $\text{Sn}_{95.5}\text{Ag}_{3.8}\text{Cu}_{0.7}+3 \text{ ваг.}\% \text{ Ni}$. У рідкому стані нагрівання супроводжується поступовим зниженням електропровідності. Однак за температур, вищих від приблизно 600 К , це зниження сповільнюється, і за подальшого нагрівання бачимо навіть незначне зростання електропровідності. Таке зростання спостерігали раніше під час додавання нанорозмірних домішок нікелю. Висловлено припущення, що його причиною може бути розчинення нікелю в базовій матриці [25]. Отримані результати для матриці SAC іншого хімічного складу підтверджують це пояснення. Розчинення Ni у розплаві $\text{Sn}_{95.5}\text{Ag}_{3.8}\text{Cu}_{0.7}+1 \text{ ваг.}\% \text{ Ni}$ завершується з досягненням температури приблизно 760 К , а в розплавах з умістом нікелю 2 і 3 ваг.% – за температур, відповідно, близьких до 800 К і 900 К . Як видно з рис. 2–4, охолодження гомогенних розплавів від 1100 К супроводжується поступовим нелінійним зростанням електропровідності, а залежність $\sigma(T)$ описується поліномом:

$$\sigma = A + B_1T + B_2T^2, \quad (1)$$

Значення коефіцієнтів поліномів наведено в табл. 1.

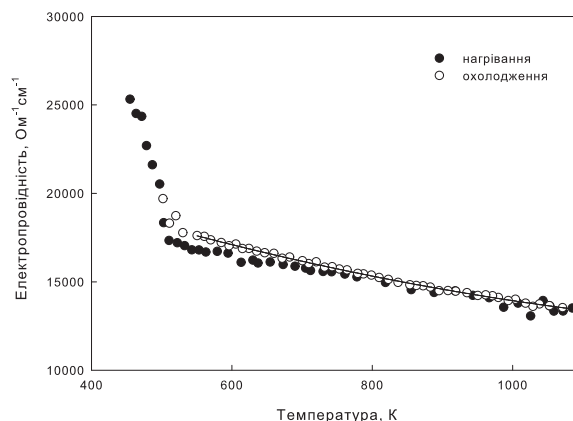


Рис. 2. Залежність електропровідності від температури сплаву $\text{Sn}_{95.5}\text{Ag}_{3.8}\text{Cu}_{0.7}$ з нанорозмірними домішками Ni (1 ваг.%)

Fig. 2. Dependence of electrical conductivity on the temperature of the alloy $\text{Sn}_{95.5}\text{Ag}_{3.8}\text{Cu}_{0.7}$ with nanosized impurities Ni (1 wt. %)

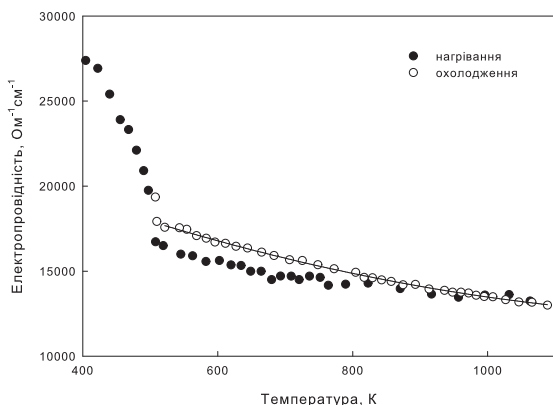


Рис. 3. Залежність електропровідності від температури сплаву Sn_{95.5}Ag_{3.8}Cu_{0.7} з нанорозмірними домішками Ni (2 ваг.%)

Fig. 3. Dependence of electrical conductivity on the temperature of the alloy Sn_{95.5}Ag_{3.8}Cu_{0.7} with nanosized impurities Ni (2 wt. %)

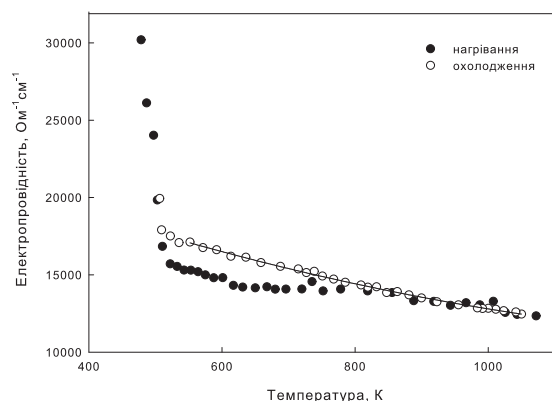


Рис. 4. Залежність електропровідності від температури сплаву Sn_{95.5}Ag_{3.8}Cu_{0.7} з нанорозмірними домішками Ni (3 ваг.%)

Fig. 4. Dependence of electrical conductivity on the temperature of the alloy Sn_{95.5}Ag_{3.8}Cu_{0.7} with nanosized impurities Ni (3 wt. %)

Хімічний склад, ваг. %	A, Ом ⁻¹ ·см ⁻¹	B ₁ , Ом ⁻¹ ·см ⁻¹ ·К ⁻¹	B ₂ , Ом ⁻¹ ·см ⁻¹ ·К ⁻²
Sn _{95.5} Ag _{3.8} Cu _{0.7}	24361	-13.8150	0.0044
Sn _{95.5} Ag _{3.8} Cu _{0.7} +1Ni	24760	-15.6774	0.0049
Sn _{95.5} Ag _{3.8} Cu _{0.7} +2Ni	25676	-18.7384	0.0065
Sn _{95.5} Ag _{3.8} Cu _{0.7} +3Ni	25448	-18.3011	0.0057

Табл. 1. Коефіцієнти поліномів рівняння (1)
Table 1. Coefficients of polynomials of equation (1)

На рис. 5 показано узагальнені результати залежності електропровідності від температури сплавів Sn_{95.5}Ag_{3.8}Cu_{0.7} з різною кількістю нанорозмірних домішок Ni, а також без домішок - для порівняння. Значення $\sigma(T)$ збігаються в межах експериментальної похибки з результатами роботи [26] (суцільна лінія на рис. 2). Водночас нахил отриманої кривої $\sigma(T)$ дещо відмінний від її вигляду з роботи [27]. Помітна різниця між абсолютними значеннями провідності, які одержали ми й автори роботи [27], що досліджували комерційний сплав SAC387 (“Metaux blancs ouvres”), зменшується під час нагрівання і зникає за вищих температур.

Як видно з рис. 5, домішки Ni впливають на електропровідність, абсолютні значення якої зменшуються зі збільшенням умісту нанорозмірного нікелю, найнижчу провідність виявив розплав Sn_{95.5}Ag_{3.8}Cu_{0.7}+3Ni. Аналіз поведінки електропровідності базується на припущенні, що додавання домішок зменшує електропровідність, і таке зменшення може бути описане виразом:

$$\Delta\sigma_i^{-1} = N_i \frac{m\nu_f}{e^2} \Sigma_i, \quad (2)$$

де Σ_i — переріз розсіювання електронів провідності на частинках домішки; N_i — атомна частка цих домішок; m — маса електрона; ν_f — швидкість електронів на рівні Фермі. Для різних систем виявлено, що в найпростішому випадку, коли розсіювання домішок не залежить від інших механізмів розсіювання, $\Delta\sigma_i$ не залежить від температури.

Однак рівняння (2) описує зниження електропровідності лише приблизно. Краще наближення можна отримати, використовуючи метод парціальних хвиль та правило сум Фріделя [28]. З урахуванням потенціалу апроксимації на перерізі розсіювання, можна записати:

$$\Delta\sigma_i^{-1} = N_i[a + b(\Delta Z^2)], \quad (3)$$

де a і b залежать від базового металу і його місця в ряду Періодичної таблиці. Змінна ΔZ є різницею між валентностями домішки та розплаву. Це співвідношення, відоме як правило Лінде, виконується для багатьох бінарних сплавів у рідкому стані. Вважається, що воно справджується і для систем із більшою кількістю компонентів.

Можна припустити, що розсіювання електронів

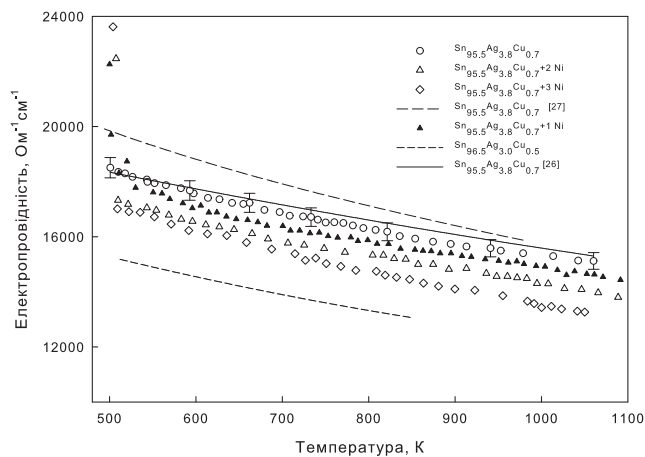


Рис. 5. Залежність електропровідності від температури сплаву $\text{Sn}_{95.5}\text{Ag}_{3.8}\text{Cu}_{0.7}$ з нанорозмірними домішками Ni
 Fig. 5. Dependence of electrical conductivity on the temperature of the alloy $\text{Sn}_{95.5}\text{Ag}_{3.8}\text{Cu}_{0.7}$ with nanosized impurities Ni

провідності в сплавах $\text{Sn}_{95.5}\text{Ag}_{3.8}\text{Cu}_{0.7}+\text{Ni}$ є подібним. Також виявлено деякі аномалії поведінки провідності в діапазоні температур, близькому до кристалізації. Як видно на рис. 1, охолодження зразків супроводжується поступовим нелінійним зростанням електропровідності, але з наближенням до температури кристалізації хід кривих $\sigma(T)$ змінюється. Покладаємо, що, оскільки за високих температур домішки нікелю розчиняються в матриці потрійної евтектики, склад розплаву стає зміщеним відносно евтектичного і в процесі кристалізації утворюється не евтектичний сплав зі сталою температурою кристалізації, а гіперевтектичний. Для такого сплаву характерні дві температури, T_L та T_S , які відповідають початку і завершенню кристалізації [29]. Зазначимо, що абсолютні значення електропровідності досліджених розплавів є вищими, ніж електропровідність потрійного розплаву $\text{Sn}_{96.5}\text{Ag}_{3.0}\text{Cu}_{0.5}$, відомого як SAC305, що можна пояснити вищим умістом срібла і міді (рис. 5).

Мікроструктурний фазовий склад закристалізованих сплавів аналізували після вимірювань електропровідності з використанням SEM-EDX. Результати фазового аналізу показано на рис. 6. Аналіз не виявив залишкового чистого Ni, однак встановлено, що в сполуці Cu_6Sn_5 атоми міді частково заміщуються атомами нікелю. Про подібну заміну повідомляли в [20], де досліджували вплив домішок нано Ni на мор-

фологію та ріст інтерметалевих сполук у шарі паяного з'єднання SAC387/Cu. Крім того, аналіз SEM показав, що атоми Cu частково замінюються атомами Ni в інтерметалевій сполуці $(\text{Ni,Cu})_3\text{Sn}_4$. На відміну від дрібнодисперсних мікроділянок фази $(\text{Ni,Cu})_6\text{Sn}_5$, кристали $(\text{Ni,Cu})_3\text{Sn}_4$ наявні у вигляді відносно великих голок.

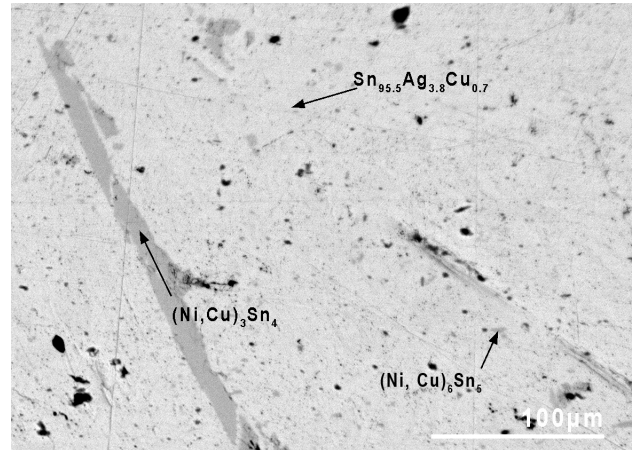


Рис. 6. Результати мікроструктурних досліджень сплавів $\text{Sn}_{95.5}\text{Ag}_{3.8}\text{Cu}_{0.7}$ з нанорозмірними домішками Ni після вимірювання електропровідності

Fig. 6. The results of microstructural studies of alloys $\text{Sn}_{95.5}\text{Ag}_{3.8}\text{Cu}_{0.7}$ with nanosized impurities Ni after measuring the conductivity

IV. ВИСНОВКИ

На основі отриманих даних встановлено, що додавання нанорозмірних частинок Ni (до 3 ваг%), як легуючого елемента припоїв SAC387, приводять до відносно невеликих змін у значеннях електропровідності (до 6%). Помітне зменшення електропровідності, яке спостерігалось з додаванням понад 1 ваг.% Ni, можна пояснити змінами мікроструктури, пов'язаними зі збільшенням у сплаві кількості інтерметалевих сполук. Одержані результати дали важливу інформацію щодо можливості використання досліджених сплавів як безсвинцевих припоїв, оскільки показали, що додавання нанорозмірних частинок нікелю суттєво не погіршує електричних властивостей припою.

Дослідження проведено за підтримки Міністерства освіти і науки України (Науково-дослідна робота, номер державної реєстрації — 0119U002204).

[1] L. Sun, L. Zhang, L. Xu, S.J. Zhong, J. Ma, L. Bao. J. Mater. Sci. Mater. Electron. **27**, 7665 (2016); <https://doi.org/10.1007/s10854-016-4751-7>.

[2] A. S. M. A. Haseeb, M. M. Arafat, M. R. Johan, Mater.

- Charact. **64**, 27 (2012); <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2011.11.006>.
- [3] A. Yakymovych *et al.*, J. Mater. Sci. Mater. Electron. **28**, 10965 (2017); <https://doi.org/10.1007/s10854-017-6877-7>.
- [4] T. Fouzder, Q. Q. Li, Y. C. Chan, D. K. Chan, J. Mater. Sci. Mater. Electron. **25**, 4012 (2014); <https://doi.org/10.1007/s10854-014-2123-8>.
- [5] Y. Gu, X. C. Zhao, Y. Li, Y. Liu, Y. Wang, Z. Y. Li, J. Alloys Compd. **627**, 39 (2015); <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.12.024>.
- [6] K. Mehrabi, F. Khodabakhshi, E. Zareh, A. Shahbakhsh, A. Simchim, J. Alloy Compd. **688**, 143 (2016); <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.06.296>.
- [7] A. Roshanghias *et al.*, J. Mater. Sci. Mater. Electron. **23**, 1698 (2012); <https://doi.org/10.1007/s10854-012-0648-2>.
- [8] A. Yakymovych *et al.*, J. Electron. Mater. **45**, 6143 (2016); <https://doi.org/10.1007/s11664-016-4832-7>.
- [9] E. K. Choi, K. Y. Lee, T. S. Oh, J. Phys. Chem. Solids **69**, 1403 (2008); <https://doi.org/10.1016/j.jpccs.2007.10.032>.
- [10] D. L. Ma, P. Wu, J. Alloys Compd. **671**, 127 (2016); <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.02.093>.
- [11] Y. L. Huang, Z. Y. Xiu, G. H. Wu, Y. H. Tian, P. He, J. Mater. Sci. Mater. Electron. **27**, 6809 (2016); <https://doi.org/10.1007/s10854-016-4631-1>.
- [12] X. D. Liu, Y. D. Han, H. Y. Jing, J. Wei, L. Y. Xu, Mater. Sci. Eng. A **562**, 25 (2013); <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.10.079>.
- [13] J. Shen, Y. C. Chan, Microelectron. Reliab. **49**, 223 (2009); <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2008.10.004>.
- [14] A. T. Tan, A. W. Tan, F. Yusof, Sci. Technol. Adv. Mater. **16**, 033505 (2015); <https://doi.org/10.1088/1468-6996/16/3/033505>.
- [15] K. Bukat, M. Kościelski, J. Sitek, M. Jakubowska, A. Młodziak, Solder Surf. Mt. Tech. **23**, 150 (2011); <https://doi.org/10.1108/09540911111146908>.
- [16] A. Yakymovych, S. Mudry, I. Shtablayvi, H. Ipser, Mater. Chem. Phys. **181**, 470 (2016); <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2016.06.083>.
- [17] S. L. Tay, A. S. M. A. Haseeb, M. R. Johan, Solder. Surf. Mt. Tech. **23**, 19 (2011); <https://doi.org/10.1108/09540911111099659>.
- [18] A. K. Gain, Y. C. Chan, Intermetallics **29**, 48 (2012); <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2012.04.019>.
- [19] A. Yakymovych, G. Kaptay, A. Roshanghias, H. Flandorfer, H. Ipser, J. Phys. Chem. C **120**, 1881 (2016); <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b09445>.
- [20] X. C. Zhang, J. W. Cheng, B. Zheng, X. C. Zhao, Y. Liu, P. Chen, Mater. Sci. Forum. **815**, 8807 (2015); <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.815.103>.
- [21] M. N. Bashir, A. S. M. A. Haseeb, A. M. S. Rahman, M. A. Fazal, C. R. Kao, J. Mater. Sci. **50**, 6748 (2015); <https://doi.org/10.1007/s10853-015-9230-7>.
- [22] S. L. Tay, A. S. M. A. Haseeb, M. R. Johan, P. R. Munroe, M. Z. Quadir, Intermetallics **33**, 8 (2013); <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2012.09.016>.
- [23] V. L. Niranjani, B. S. S. C. Rao, R. Sarkar, S. V. Kamat, J. Alloy Compd. **542**, 136 (2012); <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.07.044>.
- [24] Y. Plevachuk, V. Sklyarchuk, Meas. Sci. Technol. **12**, 23 (2001); <https://doi.org/10.1088/0957-0233/12/1/303>.
- [25] A. Yakymovych, Yu. Plevachuk, V. Sklyarchuk, B. Sokoliuk, T. Galya, H. Ipser, J. Phase Equilib. Diffus. **38**, 217 (2017); <https://doi.org/10.1007/s11669-017-0532-0>.
- [26] Ю. Плевачук, В. Склярчук, А. Якимович, О. Ткач, Вісн. Львів. ун-ту. Сер. фіз. **53**, 64 (2017).
- [27] S. Mhiaoui, PhD thesis, TU Chemnitz (2007); <https://katalog.bibliothek.tu-chemnitz.de/Record/0-1353806235>.
- [28] J. Friedel, Nuovo Cim. **7**, 287 (1958); <https://doi.org/10.1007/BF02751483>.
- [29] Yu. Plevachuk, V. Sklyarchuk, A. Yakymovych, G. Gerbeth, J. Non-Cryst. Solids **354**, 4443 (2008); <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2008.06.068>.

INFLUENCE OF Ni NANOPARTICLES ON ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF Sn_{95.5}Ag_{3.8}Cu_{0.7} ALLOY

O. Tkach¹, Yu. Plevachuk¹, V. Sklyarchuk¹, Y. Kulyk¹, R. Serkiz¹, V. Didukh²

¹Ivan Franko National University of Lviv

Kyrylo and Mefodiy St., 8, UA-79005, Lviv, Ukraine

²Independent researcher

The increasing scientific interest in Sn-based nanocomposite alloys with minor additions of oxides, metals and carbon in nanosized form is explained by the possible application of these materials as an alternative to commercial lead-free solders. As pointed out in recent literature reviews, the improved mechanical properties and reinforced microstructure of solder joints using nanocomposite Sn–Ag–Cu (SAC) alloys, compared to those without nano-inclusions, revealed new possibilities for the development of the currently used commercial lead-free solders. The main benefit of the nanosized additions is related to the suppression of the extensive growth of the Cu₆Sn₅ intermetallic compound (IMC) at the solder/Cu interface towards the solder side. This is achieved due to the spreading of nanoparticles over the IMC's surface, thereby suppressing the growth of Cu₆Sn₅ on the interface as well as in the bulk solder. In particular, the adsorbed nanoparticles on the IMC layer interface hinder the diffusion of Sn atoms from the bulk solder towards the interface and thereby suppress the IMC growth. Compared to the solid state, there is a limited number of papers dealing with experimental investigations of nanocomposite SAC solders in the liquid state after melting as well as in the semi-solid state. It has been shown that minor metal nanoadditions have an impact on the microstructure of solidified SAC solders, but practically without

any significant change of the melting temperatures. The effect of small nanosized (up to 3 wt.%) nickel impurities on the electrical conductivity of $\text{Sn}_{95.5}\text{Ag}_{3.8}\text{Cu}_{0.7}$ (SAC387) alloy has been investigated. It has been shown that the electrical conductivity gradually decreases with an increase in the impurity content of Ni. Conductivity, as a structure-sensitive transport characteristic of the liquid state of a substance, is important for modeling the processes of melting and solidification. The conductivity data provide additional information on the influence of admixtures on the structure and physicochemical properties of the metal matrix, which is important for understanding the microstructural transformations in a liquid state. Morphology of the samples was examined using REMMA-102-02 Scanning Electron Microscope-Analyzer (JCS SELMI, Sumy, Ukraine).

Key words: nanoparticles, composite solder, eutectic, intermetallic compound, lead free solder, electrical conductivity