

ПРИПОЇ НОВОГО ПОКОЛІННЯ НА ОСНОВІ ГАЛІЮ: РЕГУЛЬОВАНА ДИФУЗІЯ ТА ПРИСКОРЕНЕ ТВЕРДНЕННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ЗАЛІЗО-НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ

Глушкова Д. Б.¹, Волчук В. М.²

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

²Придніпровська державна академія будівництва та архітектури

Анотація. У роботі досліджено способи вдосконалення низькотемпературних припоїв на базі галію за допомогою додавання залізо-нікелевих наповнювачів. Зростання попиту на технології складання без значного нагрівання (електроніка, гнучкі схеми, мікросенсори) стикаються з обмеженнями галієвих матеріалів: їх агресивну взаємодію з металами, погіршення змочуваності через оксидні плівки й надто повільне затвердіння за кімнатної температури. У процесі експериментів вивчено взаємодію рідкого галію та олова з чистими Fe, Ni, а також сплавами 36Н та 50Н. Виявлено, що в системах із галієм швидкість реакційної дифузії значно перевищує аналогічні показники для олов'яних систем. Продемонстровано, що підбір співвідношення Fe/Ni у наповнювачі дає змогу ефективно керувати кінетикою утворення інтерметалідів: сплави з підвищеним вмістом нікелю прискорюють затвердіння пасти, тоді як знижений вміст Ni сприяє стабілізації структури й підвищенню експлуатаційної надійності. Досягнуті результати відкривають перспективи створення керованих функціональних галієвих паст для сучасної мікро- й наноелектроніки.

Ключові слова: галій, припої, матеріали, нікель, інтерметаліди, структура, наноелектроніка.

Вступ

Пасти на основі галію дають змогу створювати з'єднання різнорідних матеріалів за кімнатної температури й забезпечити високу електропровідність, герметичність у вакуумі, а також необхідний комплекс механічних властивостей і стабільну роботу таких з'єднань навіть за підвищених температур. Нині галієві пасти широко застосовуються в силовій електроніці, матеріалах для теплових інтерфейсів, мікросенсорах, МЕМС-системах, а також у адитивних технологіях (пряме нанесення, друк рідкими металами). Саме тому дослідження галієвих припоїв із залізо-нікелевими наповнювачами є одним із актуальних, перспективних і сучасних напрямів у матеріалознавстві та мікроелектроніці.

Аналіз публікацій

У роботі [1] запропоновано огляд концепції «магнітних рідких металів» (MLM): описано способи отримання галієвих рідких металів із феромагнітними частинками, їх фізичні властивості, а також приклади практичного використання (пересування, формування структур, м'які роботи). Автори детально аналізують, як добавки Fe і Ni впливають на магнітні та реологічні властивості таких паст.

У публікації [2] розглянуто поєднання рідкої галієвої фази із твердими частинками й

полімерними матрицями; описано властивості отриманих матеріалів, методи їх інкапсуляції та технології друку. Це відкриває можливість для створення паст із твердим Fe/Ni-наповнювачем.

Дослідження [3] присвячено експериментальному вивченню взаємодії галію з реальними металізаційними шарами (Cu/Ni/Pd та Cu/Ni/Au). Показано механізми витрачання бар'єрного шару Ni, утворення інтерметалічних фаз та їх вплив на надійність низькотемпературних паяних з'єднань.

У статті [4] наведено приклад використання галію разом із вуглецевими наповнювачами для 3D-друку провідних композитів; детально описано реологічні властивості та придатність до оброблення. Запропоновану методологію можна адаптувати для введення металевих наповнювачів типу Fe/Ni.

Працю [5] присвячено розробленню пастоподібних галієвих композитів із високим вмістом частинок (Ga_2O_3), що запобігає витіканню матеріалу. Автори роблять важливі висновки щодо збереження пастоподібної консистенції та забезпечення високої теплопровідності.

У дослідженні [6] розглянуто взаємодію галію з поверхнями перехідних металів на атомному рівні. Це дає глибше розуміння процесів змочування та формування інтер-

фейсних фаз у разі застосування Fe/Ni-наповнювачів.

У сучасній науково-технічній літературі ще не сформовано чітких, обґрунтованих рекомендацій щодо скорочення часу затвердіння, розширення температурного діапазону затвердіння та підвищення експлуатаційних властивостей галієвих припоїв. Саме ці питання становлять ключові сучасні наукові виклики [7, 10, 13].

Мета й завдання дослідження

Метою дослідження є прискорення процесу затвердіння галієвих паяльних паст, розширення діапазону температур, за яких відбувається надійне тверднення, а також суттєве покращення експлуатаційних властивостей отриманих з'єднань. Досягнення цих результатів дасть змогу сформувати конкретні практичні рекомендації щодо застосування низькотемпературних технологій складання, створення функціональних припоїв, розроблення керованих паст для потреб мікроелектроніки й підвищення механічної міцності та стабільності галієвих паяних з'єднань.

Для реалізації окресленої мети визначено такі основні завдання:

- провести комплексне вивчення та обґрунтований відбір залізо-нікелевих сплавів як ефективних наповнювачів для галієвих паяльних паст;
- встановити ключові параметри взаємодії та ідентифікувати продукти, що утворюються в процесі дифузійного тверднення.

Матеріал і методи дослідження

Об'єктом дослідження є дифузійно-затвердіваючі припої на основі галію та різноманітні композитні компоненти, що містяться в їх складі.

Предмет дослідження – фізико-хімічні закономірності процесу дифузійного тверднення галієвих припоїв, а також характер впливу спеціальних композитних добавок на мікроструктуру, механічні показники й експлуатаційні властивості сформованих з'єднань.

Робоча гіпотеза дослідження полягає в тому, що цілеспрямоване введення певних композиційних добавок у галієві припої дає змогу ефективно керувати процесами дифузійного тверднення, суттєво зменшувати крихкість міжфазних шарів і помітно підвищувати механічну міцність, а також довготривалу стабільність отриманих паяних з'єднань [8, 11, 12].

Основне припущення дослідження: важливим механізмом дифузійного тверднення є

взаємна дифузія атомів галію та матеріалу основи (металу), що призводить до утворення інтерметалічних сполук.

Для спрощення аналізу прийнято, що мікроструктура міжфазних шарів у межах кожної окремої фази є однорідною, без огляду на локальні коливання хімічного складу. Вплив поверхневого окислення, забруднень або мікротріщин вважається або незначним, або таким, що підлягає контролю в умовах експерименту.

У роботі використано експериментальні фізико-хімічні методи, зокрема вимірювання мікротвердості, а також метод енергодисперсійного мікроаналізу для визначення елементного складу вихідних матеріалів і зон дифузійної взаємодії [9].

Проведено серію експериментів із вивчення фазоутворення під час контакту рідкого галію та олова з чистими залізами, нікелем, а також залізо-нікелевими сплавами марок 36Н та 50Н. У процесі дослідження встановлено, що зростання інтерметалічних шарів не завжди підлягає класичній параболічній залежності від товщини шару й часу контакту.

Після розрахунку параметрів реакційної дифузії виявлено, що ефективні коефіцієнти реакційної дифузії в системах Fe-Ga та Ni-Ga значно перевищують відповідні значення для систем Fe-Sn та Ni-Sn.

Крім того, показано, що в умовах взаємодії залізо-нікелевих сплавів із рідким галієм інтенсивність утворення нових фаз підлягає цілеспрямованому регулюванню. Зокрема сплави з підвищеним вмістом нікелю в складі галієвих паяльних паст можуть виконувати роль прискорювачів затвердіння, тоді як сплави з меншим вмістом Ni сприяють стабілізації структури та підвищенню надійності з'єднань.

Експериментальні результати та їх обговорення

Для виготовлення дослідних зразків використовувалися такі компоненти: галій марки ГЛ-0, олово марки ОВЧ-000, чисте залізо, чистий нікель, а також залізо-нікелеві сплави марок 36Н та 50Н.

Початкові зразки готувалися у двох основних формах:

– пластинчасті контакти розміром 10×10 мм і завтовшки 4 мм, виготовлені з чистого заліза й нікелю, які згодом змочувалися рідким оловом або галієм;

– круглі заготовки діаметром 10 мм (сплав 36Н) та 8 мм (сплав 50Н) з центральним заглибленням діаметром 4 мм і завглибшки 5 мм,

призначеним для заливання рідкого олова або галію.

Після змочування (або заливання) зразки піддавалися ізотермічній витримці впродовж 10–50 год за температур 300 °С та 500 °С. Далі з них готувалися шліфи для проведення металографічних та інших видів аналізу.

Шліфи після термічного оброблення досліджувалися на оптичному мікроскопі *Axio Observer*. Основне завдання металографічного аналізу полягало у визначенні кількості, форми й товщини дифузійних шарів, що утворилися.

Для виявлення мікроструктури основного металу й новоутворених фаз застосовувалося травлення розчином такого складу: H_2O_2 – 5 мл, NH_4OH – 25 мл, H_2O – 20 мл.

Попередній огляд мікрошліфів проводився на оптичному мікроскопі *Carl Zeiss Jena* за збільшеннями від $\times 200$ і вище. Детальніше вивчення здійснювалося на растровому електронному мікроскопі JEOL JSM-7001F за умови прискорювальної напруги 10 та 15 кВ і різних ступенів збільшення.

Розподіл хімічних елементів у перехідній зоні аналізувався за допомогою енергодисперсійного спектрометра. Детектор спектрометра дає змогу одночасно реєструвати до 50 елементів,

забезпечуючи аналіз елементів від бору (B) до урану (U).

Мікроструктуру перехідних зон, сформованих на зразках заліза й нікелю після контакту з рідким оловом, подано на рис. 1. Мікроструктуру інтерметалічних фаз, що утворилися на зразках заліза й нікелю після взаємодії з рідким галієм, зображено на рис. 2.

Мікроструктуру дифузійного шару на зразках залізо-нікелевих сплавів 36Н (36 % Ni – 64 % Fe) та 50Н (50 % Ni – 50 % Fe) після контакту з рідким галієм продемонстровано на рис. 3.

Мікротвердість визначалася на приладі ПМТ-3 методом вдавлення тетраедричної алмазної піраміди Віккерса під навантаженням 100 г. Кожне значення вимірювалося не менше ніж тричі, для розрахунку бралася середнє арифметичне. Мікротвердість вивчалася уздовж поперечного перерізу зразка – від краю (основний матеріал) до зони взаємодії (дифузійний шар та інтерметаліди). На рис. 4 подано графіки розподілу значень мікротвердості внаслідок переходу від основного металу до інтерметалічної фази.

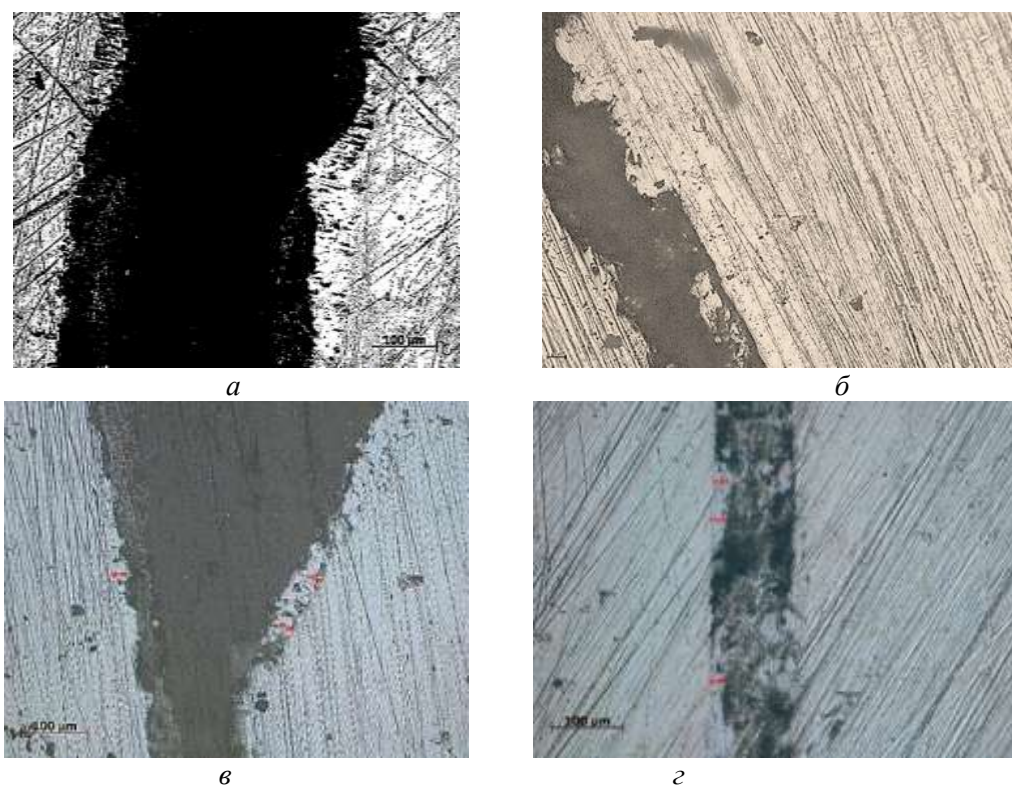


Рис. 1. Інтерметалідний шар, отриманий на зразках:
a, б – відповідно, на зразку заліза й нікелю після контакту з оловом за температури 500 °С, час витримки становить 50 год;
в, г – на зразку заліза й нікелю після контакту з оловом за температури 300 °С, час витримки становить 50 год

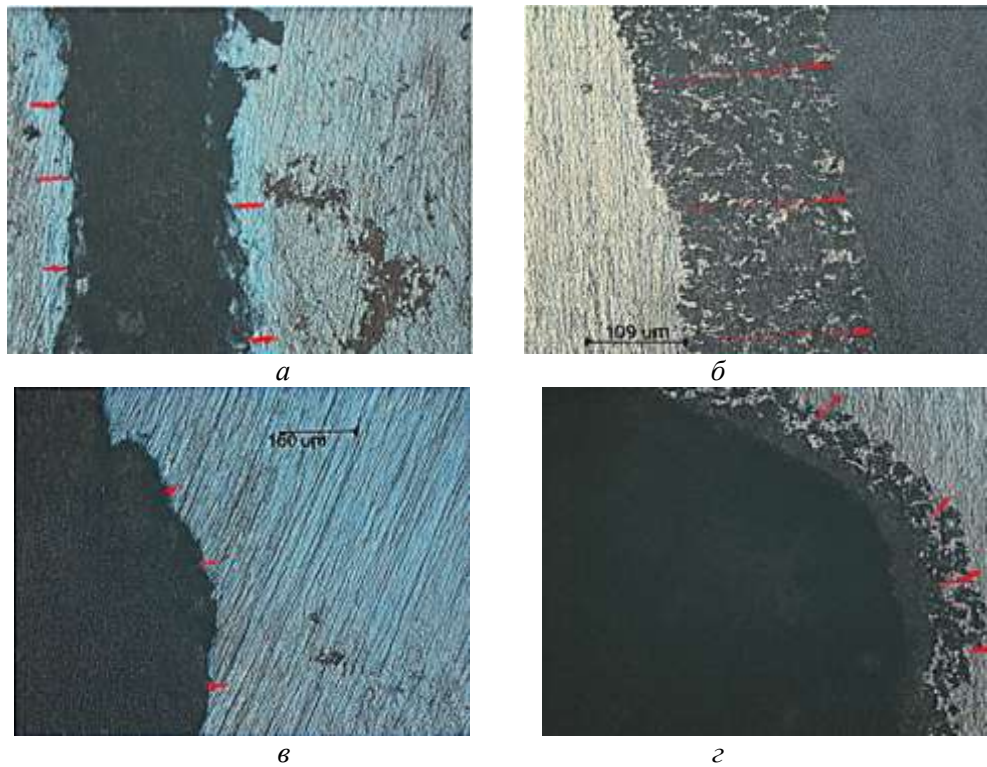


Рис. 2. Інтерметалідний шар, отриманий на зразках:
a, б – відповідно, на зразку заліза й нікелю після контакту з галієм за температури 500 °С, час витримки становить 50 год; *в, г* – відповідно, на зразку заліза й нікелю після контакту з галієм за температури 300 °С, час витримки становить 50 год

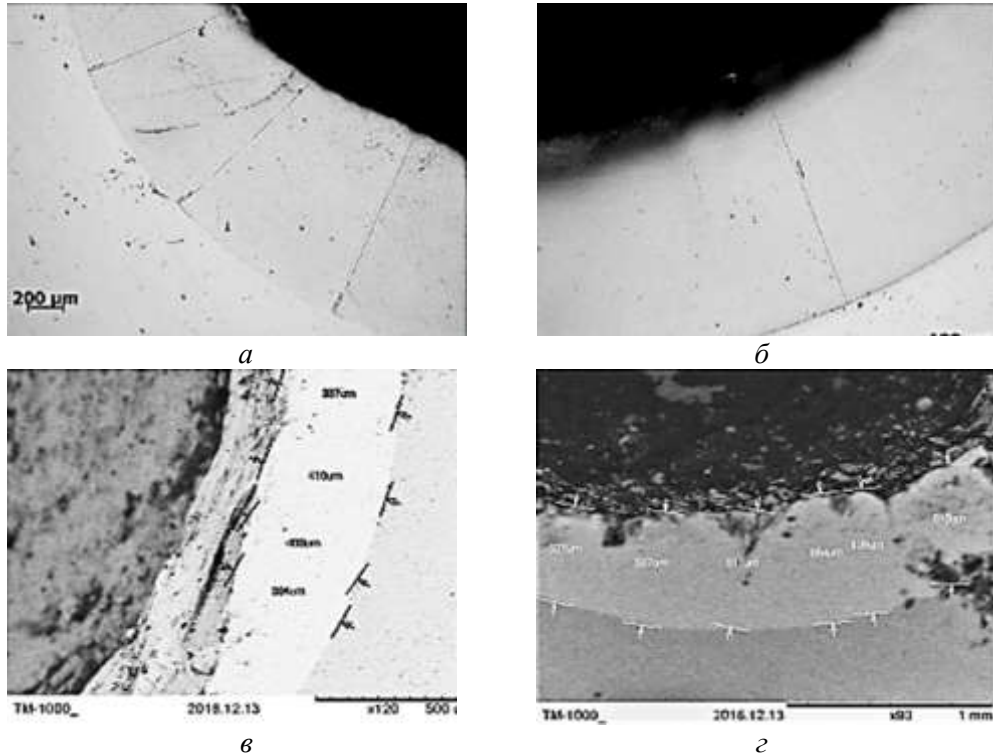


Рис. 3. Мікроструктура дифузійного шару, отриманого на зразках:
a, б – відповідно, сплав 36Н і 50Н після змочування рідким галієм за температури 500 °С, час витримки становить 50 год; *в, г* – відповідно, сплав 36Н і 50Н після змочування рідким галієм за температури 300 °С, час витримки становить 50 год

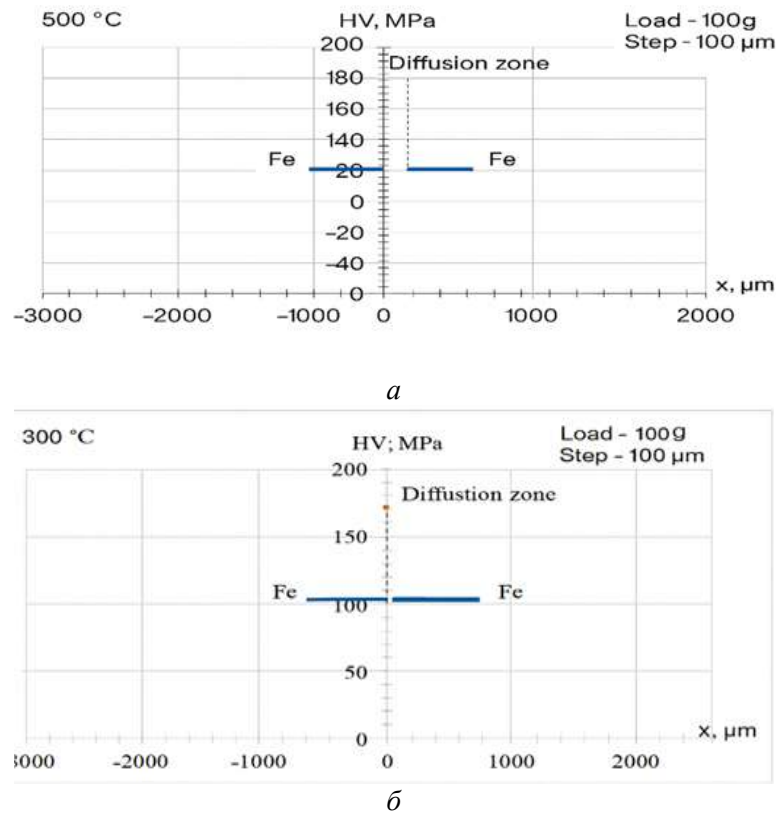


Рис. 4. Зміна мікротвердості на міжфазній межі Fe-Sn:
a – за температури 500 °С; *б* – за температури 300 °С

Крім того, отримано інформацію про зміну мікротвердості на фазових межах:

- у системі Fe-Ga за температур 300 °С та 500 °С;
- у системі Ni-Ga за температур 300 °С та 500 °С;
- у системі 50H-Ga за температур 300 °С та 500 °С;
- у системі 36H-Ga за температур 300 °С та 500 °С.

4. Визначення елементного й фазового складу продуктів взаємодії методом енергодисперсійного мікроаналізу

Крок лінійного сканування становив 3 мкм. За результатами проведених вимірювань було побудовано профілі концентраційного розподілу хімічних елементів уздовж лінії аналізу (показники оброблялися в середовищі Microsoft Excel).

Порівняння отриманих концентраційних кривих (рис. 5) з відповідними діаграмами стану системи Fe-Ga дало змогу однозначно ідентифікувати утворені інтерметалічні фази: FeGa₃ й Fe₃Ga₄.

Склад цих сполук добре узгоджується з показниками діаграми:

- фаза FeGa₃ – приблизно 78,4 мас. % Ga та 21,6 мас. % Fe;

- фаза Fe₃Ga₄ – приблизно 61 мас. % Ga та 39 мас. % Fe.

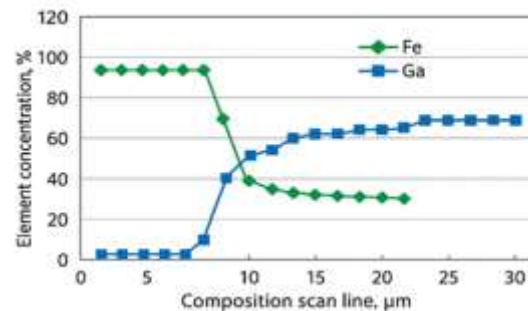
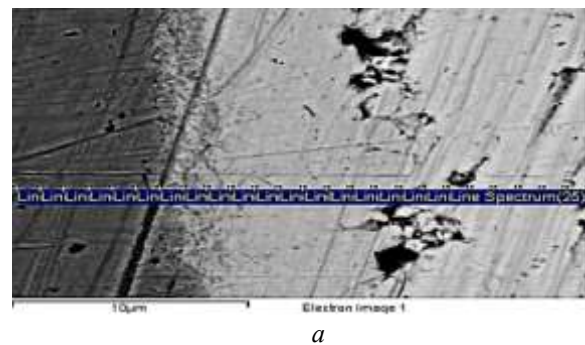


Рис. 5. Електронно-мікроскопічне зображення інтерфейсної зони системи Fe-Ga (*a*) та криві розподілу концентрацій елементів уздовж лінії сканування (*б*); масштаб $\times 5000$, лінійний спектральний аналіз, крок 3 мкм

Додатково отримано детальні електронно-мікроскопічні зображення перехідних зон у системах 36Н-Ga та 50Н-Ga, що дало змогу візуально оцінити морфологію, товщину та структуру інтерметалічних шарів у цих сплавах.

Висновки

У процесі дослідження детально вивчено кінетичні особливості утворення фаз під час взаємодії рідкого галію та олова з чистими залізом, нікелем, а також залізо-нікелевими сплавами марок 36Н та 50Н. Установлено, що зростання інтерметалічних шарів здебільшого не підлягає класичній параболічній закономірності залежності товщини дифузійного шару від тривалості контакту.

Доведено, що інтенсивність фазоутворення в системах із рідким галієм можна ефективно регулювати способом використання залізо-нікелевих сплавів як наповнювачів. Зокрема введення до складу галієвих паяльних паст сплавів із підвищеним вмістом нікелю забезпечує прискорення процесу затвердіння, тоді як застосування сплавів із відносно низьким вмістом Ні сприяє стабілізації структури й підвищенню експлуатаційної надійності сформованих з'єднань.

Література

- Kim D., Jeong J., Chung S. K., and Lee J. B. Magnetic liquid metals: A review. *Advanced Functional Materials*. 2024. <https://doi.org/10.1002/adfm.202311153>
- Reis Carneiro M. et al. Gallium-based liquid-solid biphasic conductors for soft electronics. *Advanced Functional Materials*. 2023. <https://doi.org/10.1002/adfm.202306453>
- Kim B. et al. A study on the interfacial reactions between gallium and Cu/Ni/ Pd and Cu/Ni/Au multilayer metallization. *Materials* (Open Access). 2023. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10532968/>
- Parvini E. et al. Gallium-Carbon: A universal composite for sustainable 3D printing and electronics. *ACS Applied Materials and Interfaces*. 2024. <https://doi.org/10.1021/acsami.4c02706>
- Zheng J. et al. Paste-like recyclable Ga liquid metal phase change composites. *Energy Storage Materials*. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2022.02.020>
- Lee S. W. et al. Interaction of gallium with a copper surface. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2023. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.3c05711>
- Migal V. et al. Reducing the vibration of bearing units of electric vehicle asynchronous traction motors. *Journal of Vibration and Control*. 2020, p. 107754632093763. <https://doi.org/10.1177/10775463.20937634>

- Hlushkova D. B. et al. Study of nanomodification of nickel alloy GS3 with titanium carbide. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2023, No. 2(144), p. 126–129. <https://doi.org/10.46813/2023-144-126>
- Hlushkova D. B., Volchuk V. M. Fractal study of the effect of ion plasma coatings on wear resistance. *Functional Materials*. 2023, v. 30, No. 3, p. 453–457. <https://doi.org/10.15407/fm30.03.453>
- Gladkikh L. I., Malykhyn S. V., Pugache A. T., Reshetnyak O. M., Glushkova D. B., D'Yachenko S. S., Kovtun G. P. Residual Stresses and Structure of Titanium and Chromium Nitride Coatings Obtained by a Method of an Ion-Plasma-Enhanced Deposition. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2003, No. 6(25), p. 763–776.
- Hlushkova D. B., Ryzhkov Yu. V., Kostina L. L., Demchenko S. V. Increase of wear resistance of the critical parts of hydraulic hammer by means of ion-plasma treatment. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2018, No 1(113), p. 208–211.
- Kalinina N. E., Glushkova D. B., Voronkov A. I., Kalinin V. T. Influence of nanomodification on structure formation of multicomponent nickel alloys. *Functional Materials*. 2019, No. 3(26), p. 514–518. <https://doi.org/10.15407/fm26.03.514>
- Leontiev D., Voronkov O., Korohodskiy V., Hlushkova D. et al. *Mathematical Modelling of Operating Processes in the Pneumatic Engine of the Car*: SAE Technical Paper 2020-01-2222, 2020. <https://doi.org/10.4271/2020-01-2222>

References

- Kim D., Jeong J., Chung S. K., and Lee J. B. Magnetic liquid metals: A review. *Advanced Functional Materials*. 2024. <https://doi.org/10.1002/adfm.202311153>
- Reis Carneiro M. et al. Gallium-based liquid-solid biphasic conductors for soft electronics. *Advanced Functional Materials*. 2023. <https://doi.org/10.1002/adfm.202306453>
- Kim B. et al. A study on the interfacial reactions between gallium and Cu/Ni/ Pd and Cu/Ni/Au multilayer metallization. *Materials* (Open Access). 2023. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10532968/>
- Parvini E. et al. Gallium-Carbon: A universal composite for sustainable 3D printing and electronics. *ACS Applied Materials and Interfaces*. 2024. <https://doi.org/10.1021/acsami.4c02706>
- Zheng J. et al. Paste-like recyclable Ga liquid metal phase change composites. *Energy Storage Materials*. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2022.02.020>
- Lee S. W. et al. Interaction of gallium with a copper surface. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2023. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.3c05711>

7. Migal V. et al. Reducing the vibration of bearing units of electric vehicle asynchronous traction motors. *Journal of Vibration and Control*. 2020, p. 107754632093763. <https://doi.org/10.1177/10775463.20937634>
8. Hlushkova D. B. et al. Study of nanomodification of nickel alloy GS3 with titanium carbide. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2023, No. 2(144), p. 126–129. <https://doi.org/10.46813/2023-144-126>
9. Hlushkova D. B., Volchuk V. M. Fractal study of the effect of ion plasma coatings on wear resistance. *Functional Materials*. 2023, v. 30, No. 3, p. 453–457. <https://doi.org/10.15407/fm30.03.453>
10. Gladkikh L. I., Malykhyn S. V., Pugache A. T., Reshetnyak O. M., Glushkova D. B., D'Yachenko S. S., Kovtun G. P. Residual Stresses and Structure of Titanium and Chromium Nitride Coatings Obtained by a Method of an Ion-Plasma-Enhanced Deposition. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2003, No. 6(25), p. 763–776.
11. Hlushkova D. B., Ryzhkov Yu. V., Kostina L. L., Demchenko S. V. Increase of wear resistance of the critical parts of hydraulic hammer by means of ion-plasma treatment. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2018, No 1(113), p. 208–211.
12. Kalinina N. E., Glushkova D. B., Voronkov A. I., Kalinin V. T. Influence of nanomodification on structure formation of multicomponent nickel alloys. *Functional Materials*. 2019, No. 3(26), p. 514–518. <https://doi.org/10.15407/fm26.03.514>
13. Leontiev D., Voronkov O., Korohodskiy V., Hlushkova D. et al. *Mathematical Modelling of Operating Processes in the Pneumatic Engine of the Car*: SAE Technical Paper 2020-01-2222, 2020. <https://doi.org/10.4271/2020-01-2222>

Глушкова Діана Борисівна¹, д-р техн. наук, проф., зав. кафедри технології металів та матеріалознавства,

diana@khadi.kharkov.ua, тел. +38 (057)707-37-29;

Волчук Володимир Миколайович², д-р техн. наук, проф., зав. кафедри матеріалознавства та обробки матеріалів, тел. +38 097-334-75-88, volchuk.volodymur@gmail.com.

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

²Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, 49600, м. Дніпро, вул. Архітектора О. Петрова, 24-а.

Gallium-Based Solder Pastes of the New Generation: Controlled Diffusion and Accelerated Solidification through the introduction of Iron-Nickel Alloy Fillers

Abstract. Problem statement. The rapid development of low-temperature assembly technologies for flexible

electronics, wearable devices, IoT sensors, MEMS, and 3D-printed electronics has significantly increased the demand for solder materials with melting points close to room temperature. Gallium-based pastes offer unique advantages – room-temperature joining of dissimilar materials, high electrical and thermal conductivity, vacuum tightness, and operational stability at elevated temperatures. However, their practical application is severely limited by several critical drawbacks: aggressive corrosion of many metals by liquid gallium, poor wettability due to rapid surface oxidation, and excessively slow solidification (curing) at ambient conditions, which can take from hours to days. These issues make gallium pastes unreliable for industrial-scale production and long-term operation without additional control over the hardening kinetics. The absence of clear, substantiated methods for accelerating and stabilizing the solidification process remains one of the key unsolved challenges in modern functional solder development. **Purpose and objectives.** The aim of the present study is to develop approaches for controllable acceleration of solidification and improvement of performance characteristics of gallium-based solder pastes through the introduction of iron–nickel alloy fillers (36N and 50N grades). To achieve this goal, the following tasks were set: Perform a comparative experimental study of phase formation kinetics during the interaction of liquid gallium and tin with pure Fe, Ni, and Fe-Ni alloys (36N and 50N) under isothermal conditions at 300 °C and 500 °C. Determine the main products of reactive diffusion (intermetallic phases) and calculate the effective coefficients of reactive diffusion in the systems Fe-Ga, Ni-Ga, Fe-Sn, and Ni-Sn. Establish quantitative relationships between the nickel content in Fe-Ni fillers and the rate of new phase formation, enabling the use of these alloys as controlled solidification accelerators and structural stabilizers. **Materials and research methods.** The object of the study was diffusion-hardening gallium-based solders and composite components used as fillers. The materials included: gallium (GL-0 grade), tin (OVCh-000 grade), pure iron, pure nickel, and iron-nickel alloys 36N (36 % Ni – 64 % Fe) and 50N (50 % Ni – 50 % Fe). Experimental samples were prepared in two geometries: 10 × 10 × 4 mm contact plates of Fe and Ni wetted with liquid Ga or Sn; cylindrical blanks (Ø 10 mm for 36N and Ø 8 mm for 50N) with a central cavity (Ø 4 × 5 mm) for pouring liquid metal. Isothermal holding was carried out for 10–50 hours at 300 °C and 500 °C. Metallographic analysis was performed using optical microscopy (Axio Observer, Carl Zeiss Jena) and scanning electron microscopy (JEOL JSM-7001F, 10–15 kV). Elemental composition and phase identification in diffusion zones were determined by energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) with 3 µm scanning step. Microhardness was measured using the PMT-3 tester (Vickers method, 100 g load). **Results and discussion.** It was found that the reactive diffusion coefficients in the Fe-Ga and Ni-Ga systems are significantly higher

than in the corresponding Fe-Sn and Ni-Sn systems. The growth of intermetallic layers does not always follow the classical parabolic time dependence. In the Fe-Ga system, the phases $FeGa_3$ (≈ 78.4 wt.% Ga) and Fe_3Ga_4 (≈ 61 wt.% Ga) were reliably identified. The rate of new phase formation in the (Fe-Ni)-Ga system strongly depends on the Ni/Fe ratio in the filler: alloys with higher nickel content (50N) noticeably accelerate the solidification process, while alloys with lower nickel content (36N) promote more stable and less brittle intermetallic layers. Micro-hardness measurements across the diffusion zones confirmed systematic changes in mechanical properties at the interfaces, with the most pronounced hardening effect observed after interaction with gallium at 500 °C. The obtained results indicate that Fe-Ni fillers can be used as effective kinetic regulators – accelerators at high Ni content and stabilizers at moderate or reduced Ni content. **Conclusions.** The study demonstrates that the introduction of iron-nickel alloys (36N and 50N) into gallium-based solder pastes enables effective control over the solidification kinetics and intermetallic layer formation. Higher nickel content accelerates hardening, while lower nickel content improves structural stability and reduces brittleness of the joint. The reactive diffusion in Ga-containing systems proceeds significantly faster than in Sn-based analogs, and the deviation from parabolic growth kinetics opens possibilities for fine-tuning the process parameters. The proposed approach offers a practical pathway for creating functional, fast-curing gallium pastes suitable for low-temperature assembly in modern micro- and nanoelectronics, flexible and wearable devices, and additive manufacturing technologies. Further optimiza-

tion of filler composition and particle size is expected to enable room-temperature soldering with curing times reduced to minutes while maintaining high operational reliability.

Keywords: gallium solder pastes, low-temperature soldering, iron-nickel fillers, reactive diffusion, intermetallics, solidification control, microelectronics, functional materials.

Hlushkova Diana¹, Doct. Sc. (Tech.), Head of the Department of Technology of Metals and Materials Science,

ORCID: 0000-0001-8612-6584,

e-mail: diana@khadi.kharkov.ua;

Volchuk Volodymyr², Doct. Sc. (Tech.), Head of the Department of Materials Science and Materials Processing,

ORCID: 0000-0001-7199-192X,

e-mail: volchuk.volodymyr@gmail.com.

¹Kharkiv National Automobile and Highway University, 25 Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

²Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-A O. Petrova str., Dnipro, 49600, Ukraine.

Стаття надійшла до редакції / Received: 11.02.2026.

Прийнята до друку після рецензування / Revised and Accepted: 19.02.2026.

Дата публікації статті / Published: 11.05.2026.
