

УДК 621.791.72  
UDC 621.791.72

Бернацький А.В.<sup>1</sup>, Хаскін В.Ю.<sup>1</sup>, Берднікова О.М.<sup>1</sup>, Кушнарьова О.С.<sup>1</sup>, Никитенко Ю.О.<sup>1</sup>, Сіора О.В.<sup>1</sup>,  
Шамсутдінова Н.О.<sup>1</sup>, Данилейко О.О.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України*

<sup>2</sup> *Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

## ЛАЗЕРНЕ ЗВАРЮВАННЯ АМОРФНИХ СТРІЧОК ЗІ СПЛАВУ НА ОСНОВІ НІКЕЛЮ

Надшвидке охолодження розплавів викликає зміну морфології структури, подрібнення структурних складових, значне підвищення взаємної розчинності компонентів, утворення нових метастабільних фаз, перехід в мікрокристалічний й іноді в аморфний стан металевих матеріалів. Зазначені зміни мікроструктури, фазового складу, кристалічної структури й навіть стану при надшвидкому гартуванні обумовлюють якісні й кількісні зміни багатьох їх фізико-хімічних властивостей. Автори вирішували завдання з'єднання аморфних стрічок для подальшого отримання більш широкого спектру напівфабрикатів та готових виробів з швидкозагартованих сплавів. Спроби такого з'єднання за допомогою паяння або дугового зварювання можуть призводити до розпаду аморфної структури, утворенню крихких кристалічних структур. Для запобігання цього ефекту необхідно вести зварювання з високими (понад  $10^5$  °C/c) швидкостями охолодження зварювальної ванни. Дослідження показали, що основний метал стрічки зі сплаву Ni-Fe-Cr-Si-B, який має квазіаморфну структуру, не кристалізується після лазерного зварювання. Порівняння аморфних структур в основному металі та в зварному шві, показало, що в зоні зварного з'єднання отримані більш тонкі структури. Лазерне зварювання аморфних стрічок є перспективною технологією їхнього з'єднання. Проведені дослідження по отриманню зварного з'єднання аморфних стрічок як по довжині так і по ширині, для отримання більш широкого спектру напівфабрикатів та готових виробів з швидкозагартованих сплавів. Виявлено, що процес переходу аморфного сплаву в кристалічний стан після лазерного зварювання не відбувся. Встановлена принципова можливість отримання зварного з'єднання аморфної стрічки за допомогою лазерного випромінювання, зі збереженням аморфної структури.

**Ключові слова:** аморфні матеріали, експериментальні дослідження, лазерне зварювання, електронна просвічувальна мікроскопія, структура

### ВСТУП

Нові металеві матеріали, одержувані в екстремальних умовах, мають своєрідний, іноді специфічний комплекс фізико-хімічних властивостей, та є величезним резервом матеріалів для нової техніки. Вже в даний час різко підвищилися експлуатаційні параметри і, як наслідок, вимоги до металевих матеріалів. Усе це обумовлює необхідність використання екстремальних умов для створення нових металевих матеріалів, а також детального вивчення будови і властивостей метастабільних сплавів.

### АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Надшвидке охолодження розплавів викликає зміну морфології структури [1], подрібнення структурних складових, значне підвищення взаємної розчинності компонентів [2], утворення нових метастабільних фаз, перехід в мікрокристалічний й іноді в аморфний стан металевих матеріалів [3]. Зазначені зміни мікроструктури, фазового складу, кристалічної структури і навіть стану при надшвидкому гартуванні обумовлюють якісні й кількісні зміни багатьох їх фізико-хімічних властивостей [4]. Ще перші експериментальні дослідження аморфних і мікрокристалічних металевих матеріалів, проведені в 60-х роках минулого сторіччя, показали істотну залежність їх робочих параметрів від хімічного і фазового складу, ступеня неупорядкованості структури, швидкості й умов охолодження, режимів термообробки й інших чинників, які визначаються металургійною і технологічною історією їх отримання [5]. У зв'язку з цим, першорядне значення набувають фізико-хімічні і металографічні дослідження, вивчення фазових діаграм і діаграм склад-властивість, а також технології отримання й обробки метастабільних і заморожених нестабільних сплавів [6]. Ці дослідження послідовно на різних етапах розвитку проблеми аморфних сплавів узагальнювалися в критичних оглядах і монографіях [7-9]. Проте бурхливе зростання досліджень визначає інтенсивний потік інформації по проблемі аморфних і мікрокристалічних сплавів. Зараз щорічно публікується більше 1000 наукових статей про такі сплави. Вони «вийшли» з лабораторних рамок, і почато їх широке опробування. Технічне освоєння аморфних сплавів стає сьогодні однією з найважливіших проблем. В одних галузях науки і техніки застосування таких сплавів дозволяє різко підвищити робочі характеристики приладів [10], для інших може стати єдиним прийнятним технічним рішенням [11]. Усе це підтверджує необхідність наукових узагальнень і критичного аналізу наявних даних, а також експериментальних результатів, що з'являються в цій області. Вони важливі для розробки критеріїв і раціональної технології їх створення, з'ясування і прогнозу властивостей і можливостей, а також більш глибокого розуміння природи металевих стану речовини [12]. Застосування надшвидкого охолодження розплавів відкриває перспективи в пошуку нових металевих матеріалів зі своєрідним

комплексом різних фізико-хімічних властивостей і в низці випадків значному підвищенні якості відомих сплавів, що широко застосовуються.

### **ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ**

Для отримання швидкозагартованої стрічки з розплаву найчастіше застосовується спосіб спінінгування при індукційній плавці в керамічному тиглі, але ця схема непридатна для тугоплавких і високореакційних сплавів. Рішенням стає плазмово-дугова плавка в мідному водоохолоджуваному тиглі та зливі розплаву через керамічне сопло в донній частині тигля. Плавка відбувається в камері в середовищі аргону, а злив – на барабан, що знаходиться у навколишньому середовищі. При необхідності загартовування високореакційних сплавів барабан-охолоджувач також поміщають в камеру з інертною атмосферою.

Перед авторами було завдання з'єднання аморфних стрічок для подальшого отримання більш широкого спектру напівфабрикатів та готових виробів з швидкозагартованих сплавів. Спроби такого з'єднання за допомогою паяння або дугового зварювання можуть призводити до розпаду аморфної структури, утворенню крихких кристалічних структур. Для запобігання цього ефекту необхідно вести зварювання з високими (понад  $10^5$  °C/c) швидкостями охолодження зварювальної ванни.

Одним з перспективних способів з'єднання аморфних стрічок є лазерні технології. Процес лазерної обробки має ряд переваг, а саме:

- високі щільності потужності лазерного випромінювання, істотно переважаючи інші джерела енергії, дозволяють значно збільшити продуктивність процесу;
- висока концентрація енергії, що підводиться, й локальність процесу, дозволяють робити обробку тільки поверхневої ділянки матеріалу без нагрівання іншого обсягу й порушення його структури й властивостей;
- відсутність деформацій, поводок і жолоблення деталей після обробки;
- можливість управляти структурою й властивостями отриманих аморфних шарів, змінюючи параметри лазерної обробки;
- відсутність механічних зусиль на оброблюваний матеріал дає можливість обробляти тендітні й ажурні вироби;
- можливість обробки на повітрі;
- гарна повторюваність результатів обробки;
- простота автоматизації процесу та ін.

Метою роботи є встановлення технологічних особливостей зварювання аморфних матеріалів у вигляді стрічок та структурні дослідження одержаних зварних з'єднань.

Для досягнення даної мети вирішувалися наступні завдання:

- виконання лазерного зварювання стрічок аморфного сплаву системи Ni-Fe-Cr-Si-B;

- електронномікроскопічні дослідження отриманих зварних з'єднань для визначення морфології структури.

### **РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ**

За допомогою лабораторної установки були одержані аморфні й мікрокристалічні метали методом спінінгування при плазмово-дуговій плавці, у вигляді стрічок товщиною 30-60 мкм зі сплаву Ni-Fe-Cr-Si-B. Ширина таких стрічок становила 15 мм.

Огляд наукової літератури, а також результати попередніх досліджень (для відпрацювання режимів на стрічках виконувалися провари), дозволили визначити певну область режимів одержання дрібнокристалічних і квазіаморфних структур при лазерному зварюванні аморфних стрічок. Базуючись на цих даних був створений лабораторний стенд на базі CO<sub>2</sub>-лазера ЛТ-104 (Україна) з довжиною хвилі випромінювання  $\lambda=10,6$  мкм та потужністю до 10 кВт.

Стенд, на якому використовують лазерне випромінювання CO<sub>2</sub>-лазера ЛТ-104, створений на базі токарно-гвинторізного верстату ФТ-11 (рис. 1). На ньому була проведена обробка деталей типу «стрічка». До складу стенду на базі CO<sub>2</sub>-лазера ЛТ-104 окрім токарно-гвинторізного верстату ФТ-11 входять: кондуктор для утримання та позиціонування заготовок типу «стрічка», система передачі та фокусування лазерного випромінювання, допоміжний He-Ne-лазер. Кондуктор для утримання та позиціонування заготовок типу «стрічка», кріпиться у швидкозатискному патроні токарно-гвинторізного верстату ФТ-11.



Рисунок 1 – Фокусуєча головка та кондуктор з закріпленим дослідним зразком (фіксуєчі накладки непоказані)

Дослідження з електронної просвічувальної мікроскопії з мікродифракційним аналізом проводили на мікроскопі JEM – 200 CX, фірми JEOL (Японія). Найбільшу інформацію про структуру металу дає прямий метод електронномікроскопічного дослідження, коли об'єктом дослідження служить тонка фольга. Зразок у вигляді тонкої плівки просвічували електронним пучком (60-200 кВ). Взагалі при дослідженні кристалічних структур: вивчаються дифракційні картини від кристалічної ґратки, а саме отримують дифракційні кільця, які залежно від товщини мають різну інтенсивність і контрастність. При дослідженні аморфних структур контраст зображення визначається локальною зміною розсіювання електронів, який пов'язаний зі зміною товщини зразка, його хімічного або фазового складу.

Лазерне випромінювання подавалось в зону обробки за допомогою системи поворотних дзеркал та фокусуєчої лінзи з хлористого калію (фокусна відстань  $F=300$  мм). Тубус з фокусуєчої лінзою та одним із поворотних дзеркал розміщені на спеціальній колоні, яка жорстко закріплена на супорті верстату. Тубус має можливість вертикального переміщення відносно зразків за допомогою передачі «гвинт-гайка». За допомогою випромінювання допоміжного гелій-неонового лазера, який працює у видимій частині оптичного спектру (довжина хвилі випромінювання  $\lambda=0,6328$  мкм), здійснювались попередні налаштування. Обробка була проведена при повздовжньому переміщенні колони з системою передачі та фокусування лазерного випромінювання, відносно зразка та обертанні останнього за допомогою патрону верстату, з заданою швидкістю.

Експерименти були проведені з використанням випромінювання  $\text{CO}_2$ -лазера «ЛТ-104», сфокусованого в пляму діаметром 0,2...0,3 мм. Швидкість обробки становила 6...8 м/сек. Були досягнуті швидкості охолодження порядку  $10^7$  °C/с, що дозволило зберегти аморфну структуру. Позитивним також є той факт, що отримані провари не стали крихкими.

Відзначимо, що зважаючи на технічну складність складання зварного з'єднання, перед його зварюванням і нестабільностями, зумовленими фізичною сутністю процесу лазерного зварювання, як зварювання висококонцентрованим енергетичним джерелом, - зварювання аморфних стрічок краще вести по відбортовці кромки або торцевих швів. Такий прийом нівелює пічкову структуру кореня шва, що викликає прожоги при зварюванні стикового з'єднання або внапусток.

За допомогою електронної просвічувальної мікроскопії з мікродифракційним аналізом були проведені дослідження аморфних стрічок зі сплаву Ni-Fe-Cr-Si-B.

Підготовка зразка й проведення дослідження включала такі кроки:

- на верстаті для іскрового різання зі зразка – стрічки виготовили плівки у вигляді шайб  $\varnothing 3$  мм;
- провели попереднє механічне потоншення;
- провели електролітичне попереднє потоншення плівок у спеціальній електрополірувальній установці (ПТФ) до появи отвору;
- зробили остаточне потоншення підготовлених плівок в установці іонізованим пучком аргону (ВУП-5);
- провели перегляд підготовлених тонких зразків у просвічуючому електронному мікроскопі (JEM – 200 CX, фірми JEOL Японія),  $U_{\text{прискор.}} = 200$  кВ;
- зробили дифрактограми та мікрофотографії отриманих тонких структур.

Металографічні дослідження тонких структур аморфної стрічки після лазерної обробки за допомогою електронної-просвічувальної мікроскопії з мікродифракційним аналізом проводили в два етапи.

Спочатку були проведені попередні електронномікроскопічні дослідження проварів аморфної стрічки після лазерної обробки. Результати приведені у вигляді мікрофотографій та дифрактограм на рисунку 2. Мікрофотографії та дифрактограми структури стрічки робили при збільшеннях  $\times 7300$ ,  $\times 38000$ , та  $\times 55000$ .

Досліджували структури в зоні основного металу без лазерної обробки, у зоні лазерного провару, а також у зоні термічного впливу після лазерної обробки.

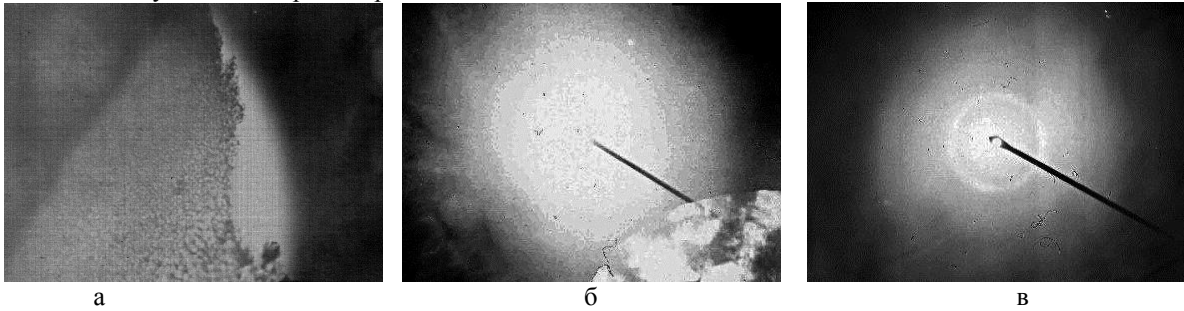


Рисунок 2 – Дифрактограми та зображення структури (а, б) аморфної стрічки: а – загальний вигляд ( $\times 7300$ ); б – основний метал ( $\times 38000$ ); в – основний метал ( $\times 55000$ )

Дослідженнями електронної просвічувальної мікроскопії з мікродифракційним аналізом встановлено, що основний метал стрічки зі сплаву Ni-Fe-Cr-Si-B, має квазіаморфну структуру (рис. 2, а). Характерне гало при зйомці основного металу (без лазерної обробки) проявляється не чітко (рис. 2, б). На дифрактограмі (рис. 2, в) аморфної стрічки присутні розмиті кільця з системою крапок, що свідчить про наявність кристалічних структур.

У зоні ж лазерного провару гало більш чітке, що свідчить про формування квазіаморфної структури при надвисоких швидкостях охолодження. Дифрактограми (рис. 3) показують, що процес переходу аморфного сплаву у кристалічний стан не відбувся. Таким чином була виявлена принципова можливість отримання зварного з'єднання аморфної стрічки за допомогою лазерного випромінювання, зі збереженням аморфної структури.

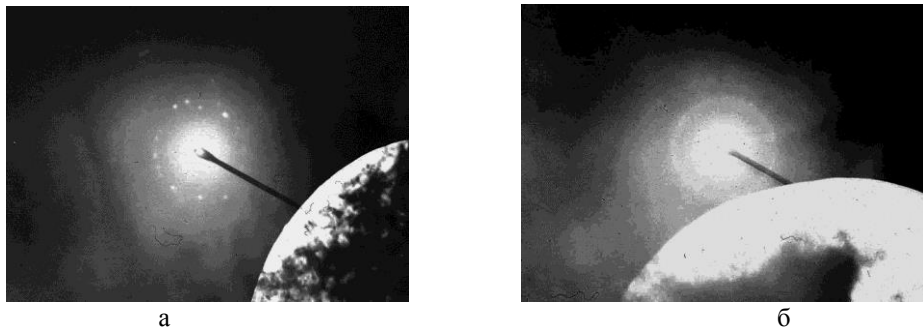


Рисунок 3 – Дифрактограми та зображення структури аморфної стрічки після лазерної обробки: а – у місці провару ( $\times 38000$ ); б – у місці ЗТВ після виконання провару ( $\times 38000$ )

Металографічні дослідження за допомогою електронної просвічувальної мікроскопії з мікродифракційним аналізом, зварних швів квазіаморфної стрічки зі сплаву Ni-Fe-Cr-Si-B, виконаних внапусток, приведені у вигляді мікрофотографій та дифрактограм на рисунку 4. Мікрофотографії та дифрактограми тонкої структури основного металу стрічки та в зоні зварного шва були зроблені при збільшенні  $\times 38000$ , у зоні термічного впливу після лазерної обробки - при збільшенні  $\times 55000$ .

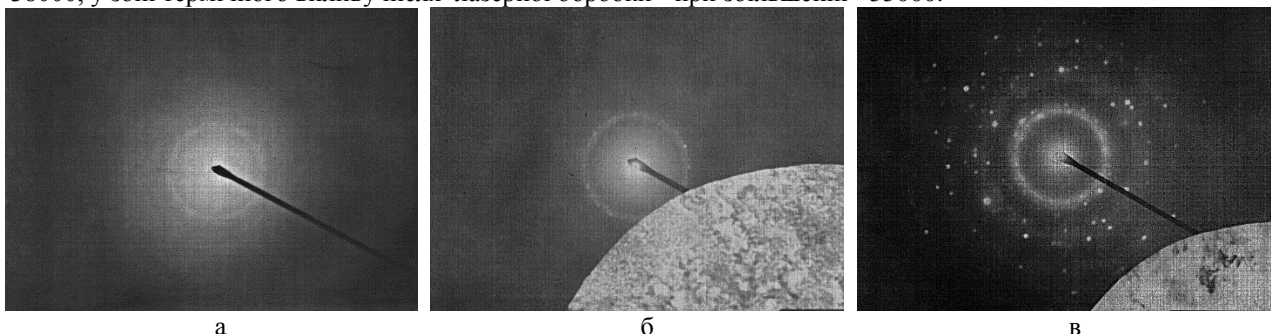


Рисунок 4 – Дифрактограми та зображення структури (а, б) аморфної стрічки: а – основного металу ( $\times 38000$ ); б – зварного шва після лазерного зварювання ( $\times 38000$ ); в – ЗТВ після лазерного зварювання ( $\times 55000$ )

#### ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження показали, що основний метал стрічки зі сплаву Ni-Fe-Cr-Si-B, який має квазіаморфну структуру, не кристалізується після лазерного зварювання. Порівняння характерних для аморфних структур гало при зйомці основного металу (рис. 4, а) та зони зварного шва (рис. 4, б) показало, що в зоні зварного

з'єднання гало проявляється більш чітко. Розмиті основні рефлекси (кільця) з системою крапок, що свідчить про наявність кристалічних структур, виявлених при дослідженні структури основного металу (рис. 4, а), зникають на дифрактограмі зварного шва (рис. 4, б). Це свідчить про те, що процес переходу квазіаморфного сплаву у кристалічний стан не відбувся, зокрема отримано структуру, яка має більш чітко виражений аморфний характер.

## ВИСНОВКИ

1. Проведено дослідження по отриманню зварного з'єднання аморфних стрічок як по довжині, так і по ширині, для отримання більш широкого спектру напівфабрикатів та готових виробів із швидкозагартованих сплавів. Виявлено, що процес переходу аморфного сплаву Ni-Fe-Cr-Si-B в кристалічний стан після лазерного зварювання не відбувся. Порівняння аморфних структур основного металу та зварного з'єднання виявило, що в зоні зварного шва отримано тонкі структури із більш чітко вираженим аморфним станом. Встановлена принципова можливість отримання зварного з'єднання аморфної стрічки за допомогою лазерного випромінювання зі збереженням аморфної структури.

2. Лазерне зварювання аморфних стрічок є перспективною технологією одержання їх нероз'ємних з'єднань.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Amorphous alloys with high Fe content for radiation shielding applications / B. Alshahrani et al. *Radiation Physics and Chemistry*. 2021. Vol. 183. P. 109386. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109386>
2. Amorphous alloy strengthened stainless steel manufactured by selective laser melting: Enhanced strength and improved corrosion resistance / Y. Zhang et al. *Scripta Materialia*. 2018. Vol. 148. P. 20-23. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2018.01.016>
3. Pilarczyk W. The structure and nanomechanical properties of amorphous welds made at reduced temperature. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. Vol. 800. P. 174-179. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.06.055>
4. Magnetic properties and vibration characteristics of amorphous alloy strip and its combination / D. Liu et al. *IET Electric Power Applications*. 2019. Vol. 13(10). P. 1589-1597. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2019.0137>
5. Klement W., Willens R. H., Duwez P. O. L. Non-crystalline structure in solidified gold-silicon alloys. *Nature*. 1960. Vol. 187(4740), P. 869-870. <https://doi.org/10.1038/187869b0>
6. Review of the Preparation, Machining Performance, and Application of Fe-Based Amorphous Alloys / Z. Huo et al. *Processes*. 2022. Vol. 10(6), P. 1203. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.166373>
7. Wear and corrosion resistant performance of thermal-sprayed Fe-based amorphous coatings: A review / B. Huang et al. *Surface and Coatings Technology*. 2019. Vol. 377. P. 124896.
8. Recent progress in some amorphous materials for supercapacitors / Q. Li et al. *Small*. 2018. Vol. 14(28). P. 1800426. <https://doi.org/10.1002/sml.201800426>
9. Two-dimensional amorphous nanomaterials: synthesis and applications / H. Zhao et al. *2D Materials*. 2019. Vol. 6(3). P. 032002. <https://doi.org/10.1088/2053-1583/ab1169>
10. A Compact Review of Laser Welding Technologies for Amorphous Alloys / J. Qiao et al. *Metals*. 2020. Vol. 10(12). P. 1690. <https://doi.org/10.3390/met10121690>
11. Influence of laser pulse on solidification of molten pool during laser welding of dissimilar Ti-based amorphous alloys / M. Chen et al. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2021. Vol. 26(3). P. 264-272. <https://doi.org/10.1080/13621718.2021.1893025>
12. Microstructures of the pulsed laser welded TiZrBeCuMo composite amorphous alloy joint / M. Chen et al. *Optics and Lasers in Engineering*. 2020. Vol. 134. P. 106262. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106262>

## REFERENCES

1. Alshahrani, B., Olarinoye, I. O., Mutuwong, C., Sriwunkum, C., Yakout, H. A., Tekin, H. O., & Al-Buriahi, M. S. (2021). Amorphous alloys with high Fe content for radiation shielding applications. *Radiation Physics and Chemistry*, 183, 109386. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109386>
2. Zhang, Y., Zhang, J., Yan, Q., Zhang, L., Wang, M., Song, B., & Shi, Y. (2018). Amorphous alloy strengthened stainless steel manufactured by selective laser melting: Enhanced strength and improved corrosion resistance. *Scripta Materialia*, 148, 20-23. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2018.01.016>
3. Pilarczyk, W. (2019). The structure and nanomechanical properties of amorphous welds made at reduced temperature. *Journal of Alloys and Compounds*, 800, 174-179. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.06.055>

4. Liu, D., Li, J., Noubissi, R. K., Wang, S., Xu, X., & Liu, Q. (2019). Magnetic properties and vibration characteristics of amorphous alloy strip and its combination. *IET Electric Power Applications*, 13(10), 1589-1597. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2019.0137>
5. Klement, W., Willens, R. H., & Duwez, P. O. L. (1960). Non-crystalline structure in solidified gold-silicon alloys. *Nature*, 187(4740), 869-870. <https://doi.org/10.1038/187869b0>
6. Huo, Z., Zhang, G., Han, J., Wang, J., Ma, S., & Wang, H. (2022). A Review of the Preparation, Machining Performance, and Application of Fe-Based Amorphous Alloys. *Processes*, 10(6), 1203. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.166373>
7. Huang, B., Zhang, C., Zhang, G., & Liao, H. (2019). Wear and corrosion resistant performance of thermal-sprayed Fe-based amorphous coatings: A review. *Surface and Coatings Technology*, 377, 124896.
8. Li, Q., Xu, Y., Zheng, S., Guo, X., Xue, H., & Pang, H. (2018). Recent progress in some amorphous materials for supercapacitors. *Small*, 14(28), 1800426. <https://doi.org/10.1002/sml.201800426>
9. Zhao, H., Chen, X., Wang, G., Qiu, Y., & Guo, L. (2019). Two-dimensional amorphous nanomaterials: synthesis and applications. *2D Materials*, 6(3), 032002. <https://doi.org/10.1088/2053-1583/ab1169>
10. Qiao, J., Yu, P., Wu, Y., Chen, T., Du, Y., & Yang, J. (2020). A Compact Review of Laser Welding Technologies for Amorphous Alloys. *Metals*, 10(12), 1690. <https://doi.org/10.3390/met10121690>
11. Chen, M., Wei, D., Li, C., Liu, L., Zhou, Q., & Wu, F. (2021). Influence of laser pulse on solidification of molten pool during laser welding of dissimilar Ti-based amorphous alloys. *Science and Technology of Welding and Joining*, 26(3), 264-272. <https://doi.org/10.1080/13621718.2021.1893025>
12. Chen, M., Lin, S., Xin, L., Zhou, Q., Li, C., Liu, L., & Wu, F. (2020). Microstructures of the pulsed laser welded TiZrBeCuMo composite amorphous alloy joint. *Optics and Lasers in Engineering*, 134, 106262. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106262>

**A. Bernatskyi, V. Khaskin, O. Berdnikova, O. Kushnarova, Yu. Nykytenko, O. Siora, N. Shamsutdinova, O. Danyleiko. Laser welding of amorphous nickel-based alloy strips**

An increase in the mutual solubility of elements, changes in the structure's morphology, the grinding of structural elements, the creation of new metastable phases, and the transformation of metallic materials into microcrystalline and occasionally amorphous states are all effects of the ultra-rapid cooling of melts. Due to the previously mentioned changes in microstructure, phase composition, crystal structure, and even state, many of the physicochemical properties change both qualitatively and quantitatively during ultra-fast quenching. The authors solved the problem of joining amorphous tapes to make a wider range of finished products and semi-finished items from quick-hardening alloys. Any attempt to make such a connection via soldering or arc welding runs the risk of dissolving the amorphous structure and creating brittle crystalline formations. To reduce the likelihood of this influence, the welding bath must be cooled quickly (above  $10^5$  °C/s). Studies show that following laser welding, the principal metal of the quasi-amorphous Ni-Fe-Cr-Si-B alloy tape does not crystallize. The resulting structures in the welded joint zone are of a finer character, according to a comparison between the amorphous structures in the base metal and the weld zone. Laser welding is thus a viable technique for joining amorphous tapes. Studies have been done on creating a welded junction of amorphous strips that are both long and wide in order to generate a wider variety of semi-finished items and final products from quick-hardening alloys. It was noted that there was no transformation of the amorphous alloy into the crystalline state following laser welding. It has been shown that it is mostly feasible to fuse an amorphous tape using laser light while preserving the amorphous structure.

**Key words:** amorphous materials, experimental studies, laser welding, transmission electron microscopy, structure

*БЕРНАЦЬКИЙ* Артемій Володимирович, кандидат технічних наук, старший дослідник, завідувач відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання», Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України, e-mail: [Bernatskyi@paton.kiev.ua](mailto:Bernatskyi@paton.kiev.ua). <https://orcid.org/0000-0002-8050-5580>

*ХАСКІН* Владислав Юрійович, доктор технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник відділу «Електротермічних процесів обробки матеріалів», Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України, e-mail: [khaskin1969@gmail.com](mailto:khaskin1969@gmail.com). <https://orcid.org/0000-0003-3072-6761>

*БЕРДНІКОВА* Олена Миколаївна, доктор технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник відділу «Фізико-хімічних досліджень матеріалів», Інститут

електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України, e-mail: [omberdnikova@gmail.com](mailto:omberdnikova@gmail.com). <https://orcid.org/0000-0001-9754-9478>

*КУШНАРЬОВА Ольга Сергіївна*, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу «Фізико-хімічних досліджень матеріалів», Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України, e-mail: [olgakus@meta.ua](mailto:olgakus@meta.ua). <https://orcid.org/0000-0002-2125-1795>

*НИКИТЕНКО Юрій Олександрович*, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник відділу «Плазмово-шлакової металургії», Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України, e-mail: [Nykytenko@nas.gov.ua](mailto:Nykytenko@nas.gov.ua). <https://orcid.org/0000-0002-3603-2333>

*СІОРА Олександр Васильович*, науковий співробітник відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання», Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України, e-mail: [siora\\_ov@ukr.net](mailto:siora_ov@ukr.net). <https://orcid.org/0000-0003-1927-790X>

*ШАМСУТДІНОВА Наталія Олександрівна*, інженер відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання», Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України, e-mail: [shamsutaliia@gmail.com](mailto:shamsutaliia@gmail.com). <https://orcid.org/0000-0002-3525-0080>

*ДАНИЛЕЙКО Олександр Олександрович*, інженер-технолог I категорії відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання», Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України; інженер I категорії кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій Навчально-наукового інституту матеріалознавства та зварювання імені Є. О. Патона Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», e-mail: [danyleiko.oleksandr@gmail.com](mailto:danyleiko.oleksandr@gmail.com). <https://orcid.org/0000-0002-8501-0421>

*Artemii BERNATSKYI, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Head of the Department of the Specialized High-Voltage Engineering and Laser Welding, E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, e-mail: [Bernatskyi@paton.kiev.ua](mailto:Bernatskyi@paton.kiev.ua). <https://orcid.org/0000-0002-8050-5580>*

*Vladyslav KHASKIN, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Leading Researcher of the Department of Electrothermal Processing Material, E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, e-mail: [Khaskin@nas.gov.ua](mailto:Khaskin@nas.gov.ua). <https://orcid.org/0000-0003-3072-6761>*

*Olena BERDNIKOVA, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Leading Researcher of the Department of Physical and Chemical Research Materials, E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, e-mail: [omberdnikova@gmail.com](mailto:omberdnikova@gmail.com). <https://orcid.org/0000-0001-9754-9478>*

*Olga KUSHNAROVA, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of the Department of Physical and Chemical Research Materials, E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, e-mail: [olgakus@meta.ua](mailto:olgakus@meta.ua). <https://orcid.org/0000-0002-2125-1795>*

*Yurii NYKYTENKO, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Leading Researcher of the Department of Plasma-Slag Metallurgy, E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, e-mail: [Nikyu80@gmail.com](mailto:Nikyu80@gmail.com). <https://orcid.org/0000-0002-3603-2333>*

*Oleksandr SIORA, Researcher of the Department of the Specialized High-Voltage Engineering and Laser Welding, E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, e-mail: [siora\\_ov@ukr.net](mailto:siora_ov@ukr.net). <https://orcid.org/0000-0003-1927-790X>*

*Nataliia SHAMSUTDINOVA, Engineer of the Department the Specialized High-Voltage Engineering and Laser Welding, E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, e-mail: [shamsutaliia@gmail.com](mailto:shamsutaliia@gmail.com). <https://orcid.org/0000-0002-3525-0080>*

*Oleksandr DANYLEIKO, First Category Engineer-technologist of the Department of the Specialized High-Voltage Engineering and Laser Welding, E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine; First Category Engineer of the Department of Laser Systems and Advanced Technologies, E.O. Paton Educational and Research Institute of Material Science and Welding, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», e-mail: [danyleiko.oleksandr@gmail.com](mailto:danyleiko.oleksandr@gmail.com). <https://orcid.org/0000-0002-8501-0421>*

DOI 10.36910/automash.v2i19.900