

ВПЛИВ ВИСОКОЕНТРОПІЙНОГО ПРОШАРКУ СИСТЕМИ CrMnFeCoNi НА МІКРОМЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ З'ЄДНАНЬ З ЖАРОМІЦНОГО СПЛАВУ EI437B

В.Ф. Горбань¹, Ю.В. Фальченко², Л.В. Петрушинець², Т.В. Мельниченко², М.О. Крапівка¹,
Д.Г. Вербило¹, В.А. Назаренко¹

¹Інститут проблем матеріалознавства НАН України. 03142, м. Київ, вул. Кржижановського, 3

²ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: falchenko@paton.kiev.ua

Представлено результати досліджень з дифузійного зварювання жароміцного сплаву EI437B з використанням в якості проміжного прошарку фольги з високоентропійного сплаву системи CrMnFeCoNi. Наведено особливості отримання фольги з високоентропійного сплаву та її основні фізико-механічні властивості в стані після прокатки і відпалу. Збільшення ступеню загальної деформації фольги до 99,9 % призводить до росту межі плинності до трьох разів, а подальший відпал – до її зниження до значень, характерних для сплаву EI437B. В процесі дифузійного зварювання в зоні з'єднання, що відповідає високоентропійному сплаву, модуль Юнга збільшився зі 165 до 195 ГПа, що може свідчити про проходження дифузійного перерозподілу елементів в прошарку. Розподіл хімічних елементів в зоні з'єднання свідчить про їх достатньо високу дифузійну рухливість. Показано, що використання при дифузійному зварюванні в вакуумі прошарку з високоентропійного сплаву забезпечує формування доволі однорідної за хімічним складом дифузійної зони з монотонним характером розподілу основних легуючих елементів, при цьому внаслідок термодформаційного впливу відбувається вирівнювання характеристик твердості та модуля пружності різних ділянок з'єднання, вони стають близькі за своїми фізико-механічними властивостями. Бібліогр. 15, табл. 2, рис. 4.

Ключові слова: високоентропійний сплав, жароміцний сплав на основі нікелю, дифузійне зварювання в вакуумі, мікроструктура, твердість, модуль пружності, межа плинності

Вступ. Завдяки підвищеним механічним властивостям при високих температурах, а також стійкості до повзучості та окислення жароміцні сплави на основі нікелю широко використовуються при виробництві елементів газотурбінних двигунів, роторів і дисків [1]. Для виготовлення подібних деталей та їх ремонту в процесі експлуатації існує необхідність в розробці надійних методів зварювання. Використання зварювання плавленням часто призводить до утворення гарячих тріщин в зоні термічного впливу через процеси ліквідації, мікросегрегації та нерівноважних фазових перетворень, що виникають під час кристалізації рідкої фази [2–5]. Такі з'єднання потребують обов'язкової термообробки після зварювання для модифікації мікроструктури зварного шва та зниження залишкових зварювальних напружень.

Виходячи зі сказаного вище методи зварювання в твердій фазі є більш перспективними. Ці процеси не передбачають розплавлення основного металу та його макроскопічної деформації. Зокрема, в публікаціях [6, 7] показана можливість отримання з'єднань зі сплавів на основі нікелю методом дифузійного зварювання. Попередні дослідження авторів показали доцільність використання при дифузійному зварюванні важкозварюваних матеріалів проміжних прошарків, зокрема,

багатошарових фольг, отриманих методом електронно-променевого пошарового осадження компонентів в вакуумі [8, 9]. Новим перспективним матеріалом для застосування в якості проміжних прошарків є фольги з високоентропійних сплавів (ВЕС), які мають в своєму складі елементи, що входять до складу жароміцних сплавів. ВЕС в процесі зварювання мають сприяти протіканню дифузійних процесів з формуванням у стикку однорідної за хімічним складом дифузійної зони з монотонним характером розподілу легуючих елементів.

У 2004 р. J.W. Yeh зі співавторами [10] показав, що багатокомпонентні сплави завдяки високій ентропії можуть утворювати тверді розчини. У роботах [10, 11] були розроблені наукові засади і сформульовано формальні критерії належності матеріалу до нового класу сплавів, які отримали назву «високоентропійні сплави» внаслідок наявності високої, у порівнянні з традиційними сплавами, ентропії змішування у рідкому стані. Дані публікації дали поштовх до активізації роботи в цій області, а сама назва «високоентропійні сплави» стала позначенням даного класу матеріалів. Згідно критеріїв ВЕС повинні мати щонайменше 5 елементів з концентрацією кожного в діапазоні від 5 до 35 ат. %.

Фальченко Ю.В. – <https://orcid.org/0000-0002-3028-2964>, Петрушинець Л.В. – <https://orcid.org/0000-0001-7946-3056>,

Мельниченко Т.В. – <https://orcid.org/0000-0002-1460-5532>, Вербило Д.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-4375-7172>

© В.Ф. Горбань, Ю.В. Фальченко, Л.В. Петрушинець, Т.В. Мельниченко, М.О. Крапівка, Д.Г. Вербило, В.А. Назаренко, 2023

Високоентропійні сплави характеризуються можливістю утворення простих твердих розчинів на базі п'яти і більше елементів. Однією з основних переваг високоентропійних сплавів є поєднання високої міцності та пластичності, що дозволяє деформувати їх при кімнатній температурі [12, 13]. Треба зазначити, що кількість публікацій по застосуванню ВЕСів в якості проміжних прошарків при дифузійному зварюванні незначна.

Метою даної роботи є дослідження можливості використання прошарків у вигляді фольги з високоентропійного сплаву при дифузійному зварюванні жароміцного сплаву на нікелевій основі, а також визначення методом автоматичного мікроіндентування механічних властивостей отриманих з'єднань.

Матеріали та методика. В якості твердорозчинного ВЕСу на основі ГЦК гратки слугував сплав системи CrMnFeCoNi, в якому електронна концентрація була вище ніж 7,9 ел/ат. Плавку зливок проводили в атмосфері очищеного аргону електродуговим способом з невитратним вольфрамовим електродом на мідній водоохолоджуваній півсферичній ємності. Отримані зливки ВЕС розміром 25×80×25 мм та масою 400 г з метою гомогенізації складу переплавлялися 6...7 разів з подальшим охолодженням зі швидкістю 80... 100 °C/с. Фольгу завтовшки 70 мкм з високоентропійного сплаву отримували прокаткою з разовою деформацією 15...18 % без проміжних відпалів. Це дозволило сформувати дрібнокристалічну структуру в кінцевому продукті.

Зварювання нікелевого сплаву EI437B (Ni – 21,0 Cr – 2,65Ti – 0,92Al – 0,83Fe – 0,46Si – 0,25Mn, мас. %) проводили в установці для дифузійного зварювання У-394М виробництва ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. В якості нагрівача використовували електронно-променеву гармату кільцевої форми, яку встановлювали на рівні поверхонь, що зварювались. Температуру зварювання контролювали за допомогою хромель-алюмелевої термопарі. Вакуум в робочій камері підтримували на рівні $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па. Були обрані наступні параметри зварювання: температура 1050 °C, тиск 20 МПа, тривалість витримки 20 хв [8]. Порізку зразків для зварювання проводили на електроерозійному верстаті. Поверхні зразків, які підлягали зварюванню, шліфували на алмазному крузі та знежирювали в етиловому спирті.

Мікροструктурні дослідження зварних з'єднань проводили за допомогою електронного мікроскопу CAMSCAN 4, оснащеного системою енергодисперсійного аналізу Oxford Inca Energy 200 для визначення хімічного складу. Для цього за стандартною методикою з використанням шліфу-

вально-полірувального обладнання фірми Struers були підготовлені шліфи поперечного перерізу зварних з'єднань.

Твердість (H) та модуль пружності (E) визначали відповідно до міжнародного стандарту [14] за допомогою автоматичного індентування (прилад «Мікрон-гамма») з пірамідою Берковича при навантаженні 50 г і відстанню між відбитками 40 мкм. При обчисленні модуля пружності для всіх сплавів коефіцієнт Пуассона дорівнював 0,25.

Результати та їх обговорення. В роботі досліджено характеристики високоентропійного сплаву системи CrMnFeCoNi в литому стані, після прокатування та після проведення процесу дифузійного зварювання жароміцного сплаву EI437B через проміжний прошарок з даного ВЕСу. Сплав системи CrMnFeCoNi був вибраний з урахуванням того, що до його складу входять основні легуючі елементи нікелевого сплаву, при цьому температура плавлення трохи нижча ніж у жароміцного сплаву і за даними ДТА вона складала 1352 °C (проти 1450 °C для EI437B).

Результати впливу деформації на механічні властивості литого сплаву CrMnFeCoNi, які отримали методом випробувань на розтяг, представлені в табл. 1.

Як видно з табл. 1 при ступені деформації сплаву CrMnFeCoNi 50 % його міцність зростає в 1,2 рази в порівнянні з властивостями сплаву в литому стані. При збільшенні ступеня деформації до 92,0...99,9 % у ВЕСі спостерігається збільшення міцності в 1,8...2,9 рази при одночасному зниженні його пластичності.

У зв'язку з тим, що дифузійне зварювання проходить при температурі близько 1100 °C, проведено визначення властивостей фольги після відпалу впродовж 30 хв за даної температури. У табл. 2 представлені фізико-механічні властивості фольги з ВЕСу CrMnFeCoNi у деформованому стані та після відпалу, що отримані методом інструментально-го індентування та випробуваннями на розтяг.

Деформація високоентропійного сплаву CrMnFeCoNi до 99,9 % призводить до формування дрібнокристалічної структури, наслідком чого є суттєве зростання межі плинності до 1,902 ГПа, а також показника нормованої твердості H/E_r до 0,036. Таке значення нормованої твердості за да-

Таблиця 1. Механічні властивості сплаву системи CrMnFeCoNi, які отримали методом випробувань на розтяг, в залежності від ступеня деформації

| Стан сплаву системи CrMnFeCoNi | $\sigma_{0,2}$, МПа | σ_B , МПа | ε_{es} , % |
|--------------------------------|----------------------|------------------|------------------------|
| Литий | 565 | 647 | 24 |
| Деформація 50 % | 754 | 783 | 0,72 |
| Деформація 92 % | 1127 | 1175 | 1,17 |
| Деформація 99 % | 1352 | 1404 | 1,21 |
| Деформація 99,9 % | 1886 | 1902 | 0,37 |

Таблиця 2. Порівняння фізико-механічних властивостей фольги з високоентропійного сплаву CrMnFeCoNi у деформованому стані та після відпалу за режимом 1100 °С впродовж 30 хв і жароміцного сплаву ЕІ437Б

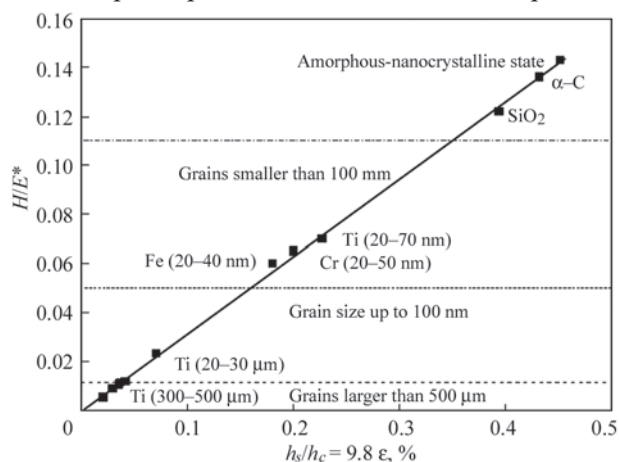
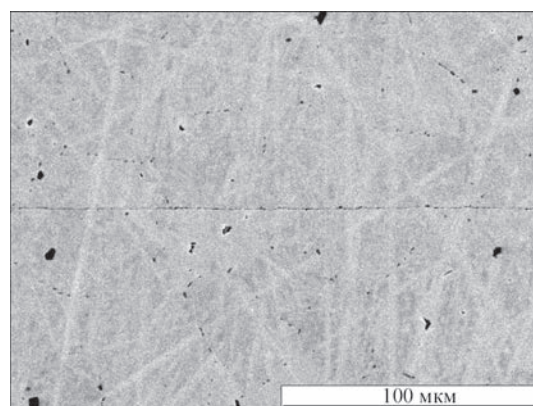
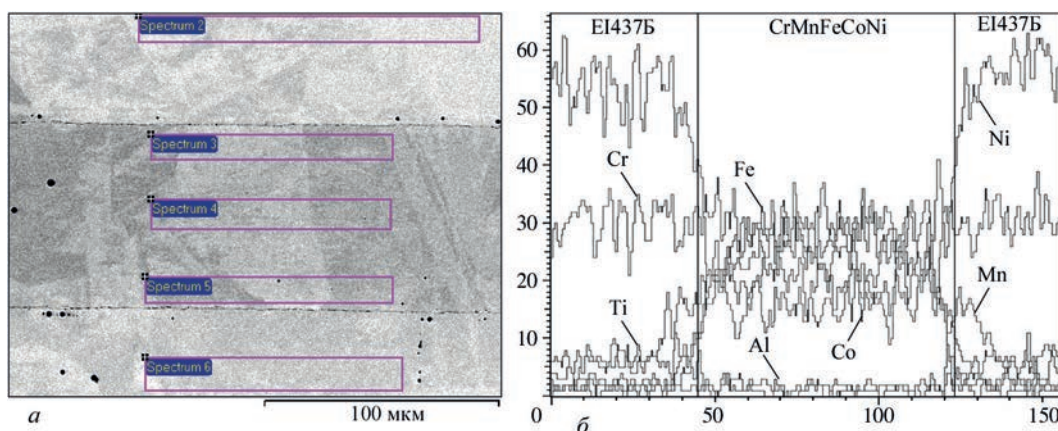
| Сплав | Стан матеріалу | H_{TP} , ГПа | H/E_r | E , ГПа | $\sigma_{0,2}$, ГПа | δ , % |
|--------------|-----------------------|----------------|---------|-----------|----------------------|--------------|
| CrMnFeCoNi | Деформація 99,9 % | 6,0 | 0,036 | 165 | 1,902 | 0,37 |
| | Відпал | 2,6 | 0,016 | 165 | 0,712 | 23 |
| Сплав ЕІ437Б | Деформований + відпал | 2,7 | 0,012 | 210 | 0,786 | 25 |

ними [15] (рис. 1) характерне для більшості матеріалів в дрібнокристалічному стані. Відпал ВЕСу призводить до суттєвої зміни показників міцності і пластичності та наближення їх значень до відповідних характеристик сплаву ЕІ437Б.

Способом дифузійного зварювання у вакуумі було отримано з'єднання з сплаву ЕІ437Б без використання проміжних шарів. Встановлено, що за даних параметрів в зоні з'єднання спостерігається

значна кількість дефектів у вигляді суцільного ланцюжка пор і оксидних включень (рис. 2).

Високу дефектність зони з'єднання можна пояснити низькою пластичністю жароміцного нікелевого сплаву, яка не дозволяє на заданому режимі забезпечити достатню деформацію приповерхневих шарів металу, і як наслідок неможливість сформувати повний фізичний контакт поверхонь, що зварюються.

Рис. 1. Співвідношення між H/E та $h_s/h_c = 9,8 \% \epsilon$ для матеріалів у різних структурних станах [15]Рис. 2. Мікроструктура зварного з'єднання сплаву ЕІ437Б + ЕІ437Б, отриманого на режимі: $T_{зв} = 1050$ °С, $P_{зв} = 20$ МПа, $t_{зв} = 20$ хв

| Номер спектру | Вміст елементів, мас. % | | | | | | |
|---------------|-------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Al | Ni | Cr | Mn | Fe | Co | Ni |
| 2 | 0,70 | 2,49 | 20,71 | — | 0,76 | — | 75,34 |
| 3 | — | — | 19,27 | 15,95 | 20,00 | 21,04 | 23,74 |
| 4 | — | — | 19,33 | 18,74 | 20,52 | 21,52 | 19,90 |
| 5 | — | — | 19,86 | 14,88 | 19,61 | 21,32 | 24,33 |
| 6 | 0,83 | 2,85 | 21,17 | — | 0,72 | — | 74,43 |

Рис. 3. Мікроструктура (а) та розподіл елементів (б, в) в зварному з'єднанні ЕІ437Б + CrMnFeCoNi + ЕІ437Б, отриманому на режимі: $T_{зв} = 1050$ °С, $P_{зв} = 20$ МПа, $t_{зв} = 20$ хв

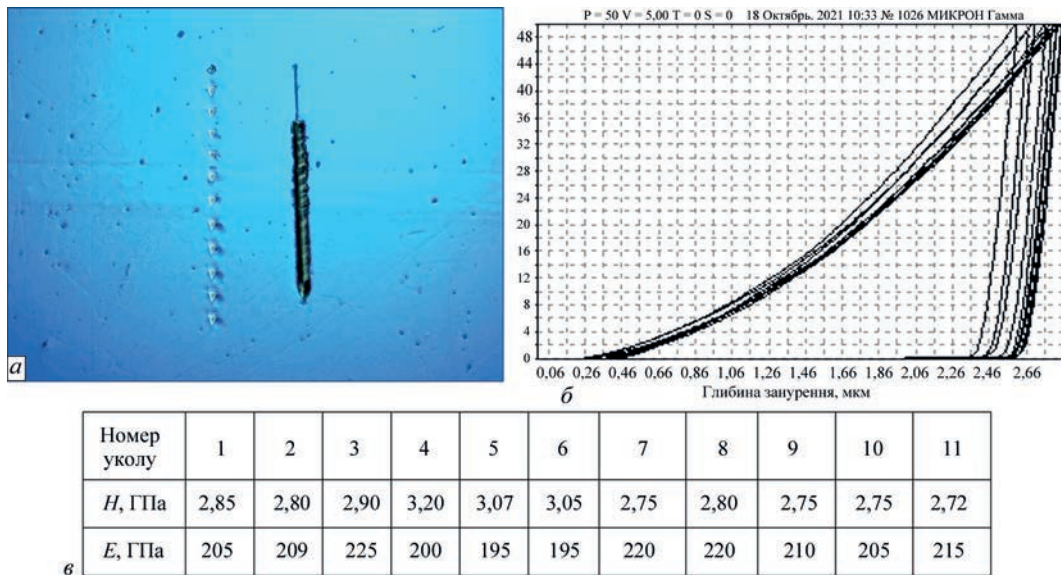


Рис. 4. Результати автоматичного індентування з'єднання E1437B + CrMnFeCoNi + E1437B, отриманого на режимі $T_{зв} = 1050$ °С, $P_{зв} = 20$ МПа, $t_{зв} = 20$ хв: а – відбитки, отримані при індентуванні; б – діаграми індентування в координатах навантаження–глибина занурення індентора; в – таблиця розрахунків

Далі проводили ДЗВ сплаву E1437B з використанням прошарку з високоентропійного сплаву системи CrMnFeCoNi в стані після прокатки.

Аналіз мікроструктури отриманих з'єднань показує, що в стикі формується зона з'єднання (~ 70 мкм), вздовж межі розділу E1437B/ВЕС спостерігаються ланцюжки дрібних пор (рис. 3, а). Розподіл хімічних елементів в зоні з'єднання свідчить про їх достатньо високу дифузійну рухливість. ВЕС забезпечує формування доволі однорідної за хімічним складом дифузійної зони з монотонним характером розподілу основних легуючих елементів (рис. 3, б, в).

Методом інструментального індентування були визначені характеристики твердості та модуля пружності різних ділянок з'єднання після зварювання. На рис. 4, а представлено вигляд поперечного перерізу зварного з'єднання E1437B + CrMnFeCoNi + E1437B з відбитками від індентору. Відповідно до даних твердості та модуля пружності видно, що було отримано досить однорідне за своїми властивостями з'єднання (рис. 4, б, в). В процесі зварювання твердість і модуль пружності шару ВЕС близькі до значень основного матеріалу. Варто відмітити, що в процесі дифузійного зварювання модуль Юнга високоентропійного прошарку збільшився зі 165 до 195 ГПа. Це свідчить про проходження дифузійного перерозподілу елементів в прошарку, що підтверджується даними розподілу елементів на рис. 3, б.

Висновки

1. Визначено фізико-механічні властивості високоентропійного сплаву CrMnFeCoNi в залежності від ступеня деформації. Показано, що збільшення ступеня загальної деформації до 99,9 % призводить до збільшення межі міцності з 647 до

1902 МПа. Після відпалу при температурі 1100 °С впродовж 30 хв межа плинності знижується з 1902 до 712 МПа, що близько до значень, характерних для сплаву E1437B ($\sigma_{0,2} = 786$ МПа).

2. Встановлено, що дифузійне зварювання в вакуумі жароміцного нікелевого сплаву E1437B на режимі: температура зварювання $T_{зв} = 1050$ °С, час зварювання $t_{зв} = 20$ хв і тиск $P_{зв} = 20$ МПа, не забезпечує формування якісних з'єднань. В зоні з'єднання спостерігається значна кількість дефектів у вигляді пор і оксидних включень.

3. Показано, що використання при дифузійному зварюванні жароміцного сплаву E1437B фольги з високоентропійного сплаву CrMnFeCoNi забезпечує формування з'єднань з незначною кількістю дефектів в стикі.

4. В процесі дифузійного зварювання модуль Юнга високоентропійного прошарку збільшився зі 165 до 195 ГПа, що може свідчити про проходження дифузійного перерозподілу елементів в прошарку.

5. На основі проведених досліджень можна стверджувати, що внаслідок термодформаційного впливу в процесі дифузійного зварювання відбувається вирівнювання характеристик твердості та модуля пружності різних ділянок зони з'єднання, вони стають близькі за своїми фізико-механічними властивостями.

Список літератури/References

1. Penkalla, H.J., Wosik, J., Czyrska-Filemonowicz, A. (2003) Quantitative microstructural characterisation of Ni-base superalloys. *Materials Chemistry and Physics*, 2–3, 81, 417–423. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(03\)00037-3](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(03)00037-3)
2. Egbewande, A.T., Buckson, R.A., Ojo, O.A. (2010) Analysis of laser beam weldability of Inconel 738 superalloy. *Materials Characterization*, 5, 61, 569–574. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2010.02.016>
3. Ojo, O.A., Richards, N.L., Chaturvedi, M.C. (2008) Heat affected zone liquation cracking in electron beam welded

- third generation nickel base superalloys. *Materials Science and Engineering: A*, **1–2**, 476, 217–223. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.04.091>
4. Rush, M.T., Colegrove, P.A., Zhang, Z. Courtot, B. (2010) An Investigation into Cracking in Nickel-Base Superalloy Repair Welds. *Advanced Materials Research*, 89–91, 467–472. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.89-91.467>
 5. Montazeri, M., Ghaini, F.M. (2012) The liquation cracking behavior of IN738LC superalloy during low power Nd:YAG pulsed laser welding. *Materials Characterization*, **67**, 65–73. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2012.02.019>
 6. Jiangtao Xiong, Lin Yuan, Yuan Zhub et al. (2019) Diffusion bonding of nickel-based superalloy GH4099 with pure nickel interlayer. *Journal of Materials Science*, **8**, 54, 6552–6564. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-018-03274-x>
 7. Sung Hwan Kim, Chaewon Kim, Changheui Jang (2018) Diffusion Bonding of a Cold-Worked Ni-Base Superalloy. *Proceedings of the ASME 2018 Symposium on Elevated Temperature Application of Materials for Fossil, Nuclear, and Petrochemical Industries ETAM2018 (Seattle, April 3–5), Seattle, WA, USA*, 1–6. <https://doi.org/10.1115/ETAM2018-6716>
 8. Петрушинець Л.В., Фальченко Ю.В., Устинов А.І. та ін. (2017) Дифузійне зварювання у вакуумі жароміцного сплаву на Ni основі. *Технічні науки та технології*, **3(9)**, 63–71. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2017-3\(9\)-63-71](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2017-3(9)-63-71)
 9. Falchenko, Iu.V., Petrushynets, L.V., Melnichenko, T.V. et al. (2019) Vacuum diffusion welding of γ -TiAl intermetallic with high-temperature nickel alloy with application of intermediate Al/Ni nanolayers. *The Paton Welding Journal*, **10**, 48–53. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2019.10.07>
 10. Yeh, J.W., Chen, L., Lin, S.J., Chen, S.K. (2007) High-Entropy Alloys – A New Era of Exploitation. *Materials Science Forum*, **560**, 1–9. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.560.1>
 11. Murty, B.S., Yeh, J.W., Ranganathan, S. (2014) *High Entropy Alloys*. Butterworth-Heinemann. ISBN 978-0-12-800251-3. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2013-0-14235-3>
 12. Karpets', M.V., Myslyvchenko, O.M., Krapivka, M.O. et al. (2015) Influence of Plastic Deformation on the Phase Composition, Texture, and Mechanical Properties of the CrMnFeCoNi₂Cu HighEntropy Alloy. *Journal of Superhard Materials*, **1**, 37, 21–26. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1063457615010049>
 13. Podolskiy, A.V., Tabachnikova, E.D., Voloschuk, V.V. et al. (2018) Mechanical properties and thermally activated plasticity of the Ti₃₀Zr₂₅Hf₁₅Nb₂₀Ta₁₀ high entropy alloy at temperatures 4.2–350 K. *Materials Science and Engineering: A*, **1**, 710, 136–141. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.10.073>
 14. ISO UNE EN ISO 14577-1:2016 *Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. Part 1: Test method (ISO 14577-1:2015)*.
 15. Gorban, V.F., Pechkovskii, E.P. (2010) Instrumented indentation for determining the structural state of materials. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **49**, 424–429. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11106-010-9253-1>

INFLUENCE OF HIGH-ENTROPY INTERLAYER OF CrMnFeCoNi SYSTEM ON MICROMECHANICAL PROPERTIES OF JOINTS OF HIGH-TEMPERATURE ALLOY EI437B

V.F. Gorban¹, Iu.V. Falchenko², L.V. Petrushinets², T.V. Melnichenko², M.O. Krapivka¹,
D.G. Verbilo¹, V.A. Nazarenko¹

¹Institute for Problems of Materials Science of the NAS of Ukraine. 3 Krzhyzhanovskoho Str., 03142, Kyiv, Ukraine.

²E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: falchenko@paton.kiev.ua

The paper presents the results of investigations on diffusion welding of high-temperature alloy EI437B, using foil from high-entropy alloy of CrMnFeCoNi system as an interlayer. The features of producing foil from high-entropy alloy and its main physical-chemical properties in as-rolled and as-annealed condition are given. Increase of the degree of the foil general deformation to 99.9 % results in up to three times increase of the yield limit, and further annealing of the foil leads to its lowering to values characteristic for EI437B alloy. During diffusion welding the Young's modulus increased from 165 to 195 GPa in the joint zone corresponding to the high-entropy alloy, which may be indicative of a diffusion-induced redistribution of elements in the interlayer. Chemical element distribution in the joint zone is indicative of their sufficiently high diffusion mobility. It is shown that application of a high-entropy alloy interlayer in vacuum diffusion welding ensures formation of a diffusion zone of a rather homogeneous chemical composition with a monotonic nature of distribution of the main alloying elements. The thermo-deformational impact results in equalizing of the characteristics of hardness and modulus of elasticity in different regions of the joint, and their physical-mechanical properties become similar. 15 Ref., 2 Tabl., 4 Fig.

Keywords: high-entropy alloy, nickel-based high-temperature alloy, vacuum diffusion welding, microstructure, hardness, modulus of elasticity, yield limit

Надійшла до редакції 22.03.2023

КАТАЛОГ РОЗРОБОК ІЕЗ ім. Є.О. Патона

Каталог (2023 р., мова англійська, 32 стор., формат А4) включає перелік сучасних розробок, які проводить Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України в наступних напрямках досліджень:

- зварювання та споріднені технології з'єднання та обробки перспективних конструкційних і функціональних матеріалів, фізико-хімічні процеси при їх реалізації;
- фізична та конструкційна міцність матеріалів, зварних з'єднань і конструкцій, їх діагностика і подовження ресурсу експлуатації та стандартизація;
- автоматизація та роботизація технологій з'єднання та обробки матеріалів, математичне моделювання процесів та інформаційні технології;
- створення нових функціональних, конструкційних та наноматеріалів методами спеціальної електротметалургії та з застосуванням висококонцентрованих потоків енергії;
- нові процеси і технології нанесення покриттів різного призначення та інженерія поверхні;
- матеріали, технології та виробі медичного призначення;
- адитивні технології отримання виробів і елементів конструкцій на основі лазерних, електронно-променевих та дугових джерел енергії;
- технології ремонту та відновлення інфраструктурних та промислових об'єктів.

Каталог можна замовити в редакції журналу