

ВИГОТОВЛЕННЯ СТІЛЬНИКОВИХ ПАНЕЛЕЙ НА ОСНОВІ ФОЛЬГИ ВИСОКОЕНТРОПІЙНОГО СПЛАВУ $\text{CoCrFeNiSi}_{0,2}$, ОТРИМАНОЇ МЕТОДОМ EB-PVD

А.І. Устінов, Ю.В. Фальченко, С.О. Демченков, Л.В. Петрушинець

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: s_demchenkov@ukr.net

У роботі показана можливість виготовлення тонких фольг високоентропійних сплавів (ВЕС) системи Co-Cr-Fe-Ni-Si методом високошвидкісного (до 10 мкм/хв) електронно-променевого осадження у вакуумі (EB-PVD). Встановлено, що вміст в складі сплаву кремнію у кількості близько 5 мас. % підвищує показники жаростійкості базового ВЕС CoCrFeNi. Показано, що при витримці на повітрі при температурі 1000 °С протягом 28 год питома зміна маси зразка фольги $\text{CoCrFeNiSi}_{0,2}$ не перевищує 0,9 мг/см². Запропоновано технологічну схему виготовлення зварюванням тришарових теплозахисних стільникових панелей з низькою питомою вагою на основі тонких фольг високоентропійного сплаву $\text{CoCrFeNiSi}_{0,2}$. Установлено, що виготовлені за запропонованою схемою тришарові теплозахисні панелі здатні витримувати багаторазове термоцикування від 25 до 1000 °С на повітрі без руйнування конструкції. Отримані результати можуть слугувати основою для створення технології виготовлення легких стільникових конструкцій, здатних забезпечити тепловий захист елементів аерокосмічної техніки при їх взаємодії з атмосферою. Бібліогр. 14, табл. 2, рис. 9.

Ключові слова: жаростійкість; високоентропійні сплави; тонкі фольги; електронно-променево осадження; тришарові стільникові панелі; тепловий захист

Вступ. Для успішної експлуатації сучасних літальних апаратів, які рухаються в атмосфері з гіперзвуковими швидкостями, і передбачають багаторазові цикли зльоту та посадки, необхідний надійний тепловий захист їх оболонки від перегрівання та пошкодження в результаті взаємодії з атмосферою [1]. Досвід експлуатації теплозахисних конструкцій на основі керамічних матеріалів, які застосовували на літальних апаратах «Буран» та «Space Shuttle», показав недостатню надійність та складність в обслуговуванні. Технічні проблеми експлуатації таких систем та їх низька економічність зумовлює необхідність продовження досліджень, спрямованих на створення нових систем як в частині розробки конструкції теплозахисних панелей, так і жаростійких матеріалів для їх виготовлення. Легкі теплозахисні стільникові панелі (ЛТСП) розглядають, як один з найбільш перспективних і ефективних способів вирішення проблеми захисту конструкційних елементів аерокосмічної техніки від розігріву при взаємодії з атмосферою. Особливу увагу привертають тришарові стільникові конструкції теплозахисних панелей на основі металевих систем. Тришарова панель представляє собою конструкцію, яка складається з двох тонких кришок з розміщенням між ними заповнювачем. Кришки сприймають поздовжні навантаження (розтягування, стиснення та зсув) у його площині. Заповнювач сприймає попе-

речні сили у згині тришарової конструкції та забезпечує перерозподіл зусиль між кришками. Така конструкція теплозахисних панелей може забезпечити поєднання високої міцності і жорсткості з низькою питомою вагою за рахунок використання тонколистових металевих матеріалів [2, 3]. При цьому тонколистові матеріали для виготовлення ЛТСП повинні мати комплекс властивостей, таких як жаростійкість, міцність та низьку питому вагу. Найчастіше в якості матеріалів для кришок ЛТСП розглядають сплави на основі системи Ni-Cr, Ti-Al, Ti-Nb-Al та деякі інші широковідомі жаростійкі сплави. Тонкі фольги, зазвичай, отримують шляхом прокатки об'ємних заготовок, які формують з розплаву або методами порошкової металургії. Проте такий підхід значно ускладнює процес отримання тонколистових матеріалів. Крім того, термо-деформаційна обробка заготовок супроводжується утворенням на поверхні фольги стійкої окисної плівки, що значно ускладнює отримання нероз'ємних з'єднань. У зв'язку з цим, отримання тонкої фольги з необхідним комплексом властивостей і методи її з'єднання залишаються актуальними до теперішнього часу.

З іншого боку, нами було показано, що тонкі фольги на основі жаростійких сплавів можна отримати безпосередньо в процесі конденсації парової фази у вакуумі при випаровуванні сплаву заданого хімічного складу [4]. Такий підхід доз-

Устінов А.І. – <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7102930399>,

Фальченко Ю.В. – <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7801687476>,

Демченков С.О. – <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56148728300>,

Петрушинець Л.В. – <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55521777800>

© А.І. Устінов, Ю.В. Фальченко, С.О. Демченков, Л.В. Петрушинець, 2023

воляє отримувати тонколистові металеві матеріали з контрольованою структурою та товщиною, уникаючи обмежень, що властиві традиційним методам металургії та термомеханічної обробки. Це значно розширює можливості використання широкого класу жаростійких сплавів, а також дає можливість запобігти утворенню на поверхні фольг щільних оксидних плівок, які перешкоджають застосуванню зварювання при виготовленні конструкцій з таких матеріалів.

Разом з цим, при створенні технології виготовлення теплозахисних панелей важливим є також розробка нових сплавів з необхідним комплексом властивостей. З цієї точки зору значну увагу привертають так звані ВЕС [5]. Відмічається, що ці сплави характеризуються стабільністю в широкому діапазоні температур, мають відносно високі показники міцності та жаростійкості.

У попередніх роботах авторами [6–8] було показано, що метод високошвидкісного електронно-променевого осадження дозволяє отримувати тонкі фольги ВЕС CoCrFeNiCu із досить широким діапазоном мікромеханічних характеристик, високими демпфуючими властивостями та гарною здатністю до зварювання. Також було показано, що при випробуванні на жаростійкість при температурі $900\text{ }^\circ\text{C}$ в середовищі атмосферного повітря фольги сплаву CoCrFeNi демонструють досить високі показники жаростійкості завдяки формуванню на поверхні малodefектної суцільної окалини на основі оксиду Cr_2O_3 [9].

Зважаючи на це метою даної роботи було створення наукових засад технології виготовлення легких теплозахисних стільникових панелей, використовуючи тонкі фольги високоентропійного сплаву на основі системи Co-Cr-Fe-Ni , отриманих методом електронно-променевого осадження у вакуумі.

Експериментальна частина. Фольги сплаву системи Co-Cr-Fe-Ni-Si отримували методом високошвидкісного електронно-променевого випаровування відповідного злитка-мішені з наступним осадженням парової фази на підкладку з нержавіючої сталі (AISI 302), нагрітої до заданої температури. Фольги завтовшки $80\text{...}100\text{ }\mu\text{m}$ осаджували із швидкістю приблизно $8\text{...}10\text{ }\mu\text{m/хв}$ при температурі підкладки $550\text{...}600\text{ }^\circ\text{C}$. Для забезпечення відділення фольги від підкладки на неї попередньо осаджували тонкий шар солі CaF_2 . Вихідні злитки-мішені діаметром 50 мм були виплавлені в індукційній печі.

Мікроструктурні дослідження та локальний хімічний аналіз проводили на поперечних перерізах виготовлених фольг за допомогою скануючого електронного мікроскопу (СЕМ) CamScan4, оснащеного мікроаналізатором ENERGY 200. За-

гальна товщина фольги була оцінена з електронно-мікроскопічних зображень поперечного перерізу. Рентгенівський дифрактометр ДРОН-4М (Cu-K α -випромінювання) використовувався для проведення фазового аналізу.

Оцінка жаростійкості виготовлених фольг проводилась за зміною питомої маси зразків у процесі довготривалих відпалів при температурах 900 і $1000\text{ }^\circ\text{C}$ в електropечі шахтного типу СШОЛ-2,4/12,5 в середовищі атмосферного повітря.

Для виготовлення стільникового заповнювача використовувалась фольга з нержавіючої сталі марки AISI 304 завтовшки $100\text{ }\mu\text{m}$. Порізки фольги проводили за умов забезпечення необхідної точності за довжиною зразка і запобіганню появи надривів та задирок. Формування профільованої стрічки стільникового заповнювача проводили з використанням методу прокатки у профільюючих роликах, який дозволяє з високою продуктивністю отримувати гофровані смуги [10].

Стільниковий заповнювач виготовляли шляхом точкового зварювання отриманих профільованих стрічок, відповідно до схеми, описаної в роботі [10]. Поверхні профільованих стрічок перед їх складанням у блоки знежирювали спиртом. Стрічки розміщувались на графітовому електроді, який виготовляли, виходячи з габаритних розмірів стільників. Оптимальними параметрами процесу для даної товщини фольги є струм $I = 300\text{ mA}$, напруга $U = 5\text{ V}$ при діаметрі електрода з міді 2 мм .

З'єднання стільникового заповнювача з кришками проводили методом дифузійного зварювання у вакуумі. Для зварювання використовували спеціально сконструйоване оснащення, яке складається з нижнього, верхнього фланців та обмежувальної втулки. Фланці забезпечують притискання по всій площі контакту кришок до стільникового заповнювача у процесі зварювання, а обмежувача втулка, дозволяє вирівняти температурне поле в зварюваному виробі. На рис. 1 представлена схема робочої камери установки для дифузійного зварювання з розміщеним у ній оснащенням. Контроль температури зварювання проводився за показниками хромель-алюмелевої терморпарі розміщеної в оснащенні. Тиск до деталей, що зварюються, прикладали від пресу через клин 6 і нижній шток 5 . Контроль величини тиску здійснювали за допомогою динамометра. Нагрів оснащення із встановленою в ній стільниковою панеллю проводили зі швидкістю $25\text{...}30\text{ }^\circ\text{C/хв}$; тиск прикладався після досягнення температури зварювання ($800\text{ }^\circ\text{C}$). Час витримки при температурі зварювання становив 15 хв , після чого рівень тиску знижували до нуля і проводили охолодження до кімнатної температури в умовах вакууму.

Результати і обговорення. Попередніми дослідженнями було встановлено, що вміст міді суттєво впливає на показники жаростійкості сплавів системи Co–Cr–Fe–Ni–Cu: із зменшенням вмісту міді у складі сплаву його жаростійкість зростає [9]. Також в роботах [11, 12] було показано, що легування базового сплаву CoCrFeNi невеликою кількістю кремнію може призводити до значного зростання його жаростійкості внаслідок формування на поверхні сплаву комбінованої окалини на основі Cr_2O_3 і SiO_2 . Передбачалось, що вміст кремнію у кількості 5 мас. % не вплине на структуру ВЕСу, але буде сприяти підвищенню жаростійкості при більш високих температурах внаслідок формування на поверхні фольги захисних шарів на основі оксидів кремнію або силіцидів хрому. Зважаючи на це, методом електронно-променевого осадження у вакуумі було виготовлено серію фольг сплаву $\text{CoCrFeNiSi}_{0,2}$ завтовшки 80...100 мкм. На рис. 2 наведено зовнішній ви-

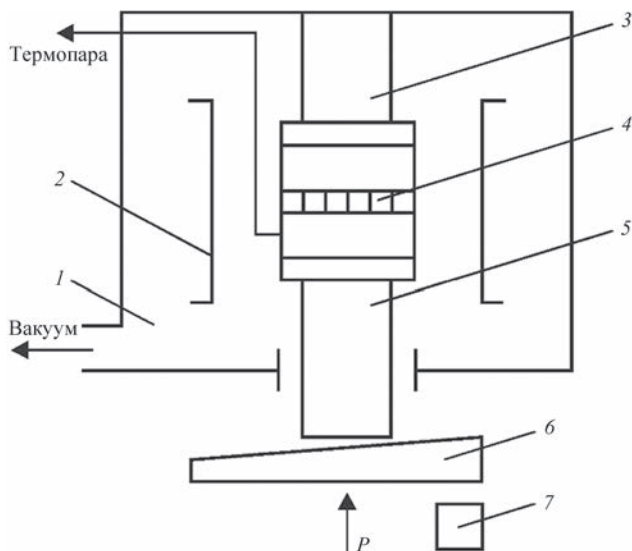


Рис. 1. Схема робочої камери установки для дифузійного зварювання; 2 – нагрівач з молібдену; 3 – верхній шток; 4 – тришарова панель, поміщена в обмежувальну втулку; 5 – нижній шток; 6 – клин; 7 – прес

гляд та характерна мікроструктура поперечного перерізу отриманих фольг. Аналіз мікроструктури показав, що відпрацьовані режими забезпечують формування однорідної структури фольги без макродефектів (тріщин, пор, розшарувань тощо) з рівномірним розподілом компонент по товщині (табл. 1). При цьому середня концентрація елементів в фольгах відповідає концентрації вихідного злитку-мішені. Питома вага фольги становить $8,1 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Оцінка жаростійкості виготовлених фольг показала, що витримка при температурі 900 °C протягом 28 год супроводжується лише незначним збільшенням маси зразків: менше 0,2 мг/см² (рис. 3, крива 2). При температурі 1000 °C кінетика окислення фольги сплаву $\text{CoCrFeNiSi}_{0,2}$ підпорядковується параболічному закону, що може свідчити про формування на поверхні суцільної захисної оксидної плівки. При цьому інтенсивність наростання питомої маси зразків фольг $\text{CoCrFeNiSi}_{0,2}$ при температурі 1000 °C є нижчою, навіть порівняно з фольгами ВЕС без кремнію при температурі 900 °C [9]. Тобто, додавання кремнію в кількості близько 5 мас. % сприяло зростанню жаростійкості, а також дозволяє підняти потенційну температуру застосування матеріалу до 1000 °C (рис. 3, крива 1).

Аналіз мікроструктури і хімічного складу фольг $\text{CoCrFeNiSi}_{0,2}$ показав (рис. 4, а, б), що після відпалів на повітрі при температурі 1000 °C на поверхні фольги формуються прошарки окалини завтовшки до 10 мкм, структура масиву фольги лишається безпористою, а в приповерхневих ділянках помітне формування невеликої кількості мікропор

Таблиця 1. Хімічний склад (мас. %) ділянок фольги $\text{CoCrFeNiSi}_{0,2}$ (рис. 2, б)

Номер ділянки	Cr	Fe	Co	Ni	Si
Спектр 1	22,8	22,6	23,7	25,0	5,9
Спектр 2	24,1	22,3	23,2	24,4	6,1
Спектр 3	24,3	22,6	23,6	23,9	5,6

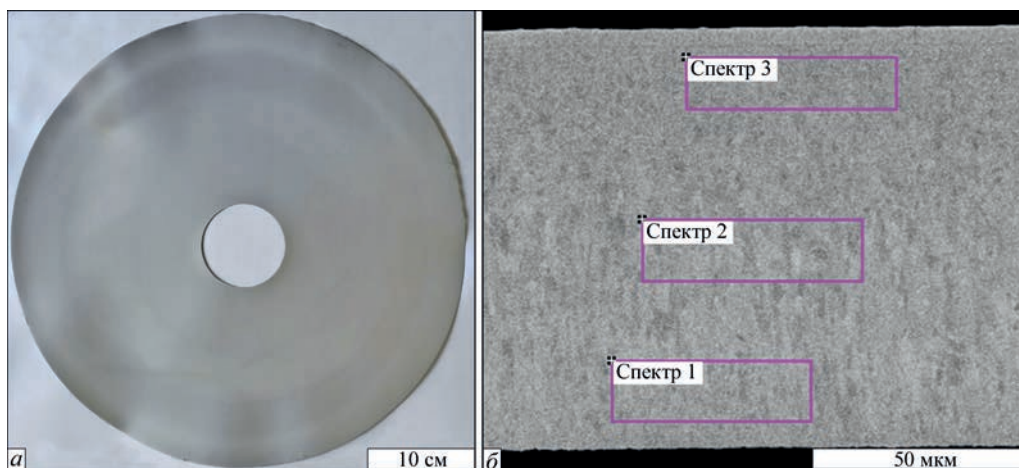


Рис. 2. Зовнішній вигляд (а) та СЕМ зображення характерної мікроструктури поперечного перерізу осаджених фольг ВЕС $\text{CoCrFeNiSi}_{0,2}$

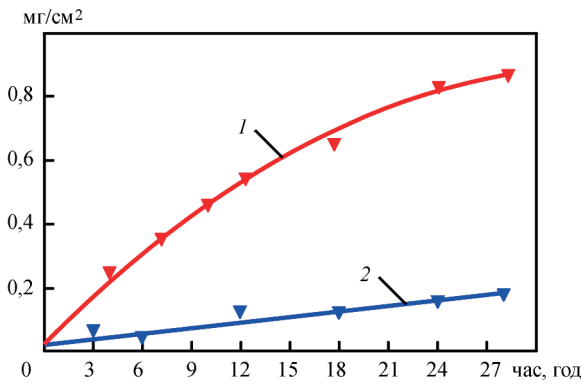


Рис. 3. Кінетика окислення фольги сплаву $\text{CoCrFeNiSi}_{0,2}$ при температурі $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ (крива 1) і $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ (крива 2)

закритого типу, розташованих по границях зерен. Разом з тим присутності кисню в приповерхневих ділянках фольги не виявлено. Поверхня окалини характеризується достатньо високим ступенем щільності та низькою дефектністю (рис. 4, в). Хімічний аналіз свідчить, що окалина складається переважно з хрому, кремнію і кисню з незначним вмістом решти компонент (табл. 2).

Методом рентгеноструктурного аналізу встановлено, що структура окалини формується на ос-

нові оксиду хрому Cr_2O_3 (рис. 4, з). Зважаючи на те, що дифракційних ознак формування силіцидів чи інших сполук кремнію не спостерігається, а за даними енергодисперсійного мікроаналізу окалини і поверхневий шар фольги містять кремній, припускається, що кремній може сприяти пригніченню дифузії кисню по границям зерен, чим запобігає утворенню нестійких оксидів заліза і, як наслідок, швидкому «вигоранню» матеріалу фольги. Разом з тим, більша спорідненість хрому до кисню сприяє, в такому випадку, формуванню на поверхні фольги захисного шару на основі оксиду хрому.

Відповідно до літературних даних найширше застосування отримали тришарові панелі з шестигранним заповнювачем, в яких стінки комірок направлені перпендикулярно до основних шарів (кришок). Широке використання таких стільникових заповнювачів пов'язано з їх здатністю забезпечувати високу питому міцність і технологічність при виготовленні [13].

Окрім того, зважаючи, що розмір теплозахисної стільникової панелі, зазвичай, набагато менший за розмір поверхні, яку необхідно «за-

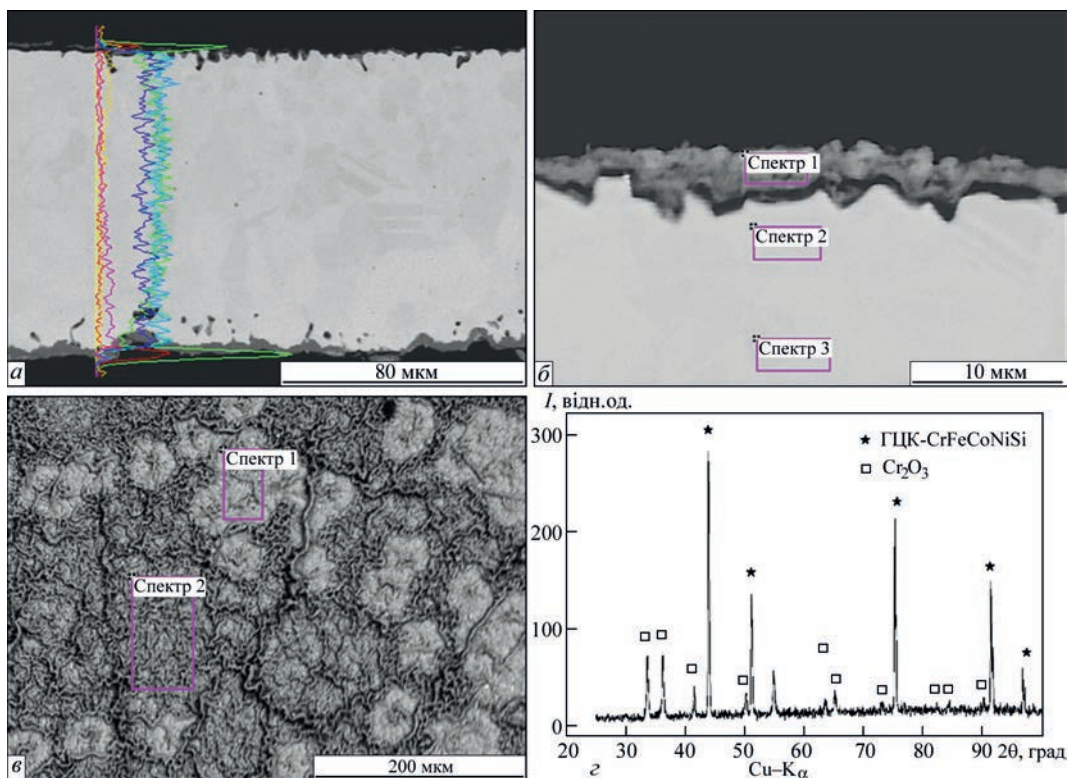


Рис. 4. СЕМ зображення мікроструктури поперечного перерізу (а, б) та поверхні (в) і дифрактограма (з) фольги ВЕС $\text{CoCrFeNiSi}_{0,2}$ після випробувань на жаростійкість при температурі $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$

Таблиця 2. Хімічний склад (мас. %) ділянок фольги $\text{CoCrFeNiSi}_{0,2}$ (рис. 4)

Рисунок	Номер ділянки	Cr	Fe	Co	Ni	Si	O
Рис. 4, б	Спектр 1	39,3	8,5	6,8	4,7	8,4	32,3
	Спектр 2	16,4	25,2	27,8	28,3	2,3	0
	Спектр 3	14,2	25,1	28,9	29,6	2,2	0
Рис. 4, в	Спектр 1	44,9	6,3	7,0	6,7	7,4	27,7
	Спектр 2	54,8	3,5	4,1	3,9	6,5	27,2

хищати» важливу роль відіграє форма самої тришарової панелі. Як відомо, замостити площу без проміжків можна за допомогою трьох правильних багатокутників – трикутника, квадрата і шестикутника. Шестикутна панель має ряд переваг перед квадратною або трикутною. Перш за все, шестикутна панель може більш ефективно розподіляти навантаження (наприклад, при повторному входженні в щільні шари атмосфери), оскільки у неї більше сусідів, що призводить до більш рівномірного розподілу навантаження та менших екстремальних значень на будь-якій конкретній панелі. Як відомо, напруження концентруються в гострих кутах, тому правильні шестикутники з кутами 120° мають явну перевагу перед квадратними панелями з кутами 90° і трикутними з кутами 60° . Окрім того, у випадку використання квадратних панелей вздовж рядів можуть виникати прямі ділянки паралельних швів, в яких відбуватиметься прискорення потоків розжареного газу, що сприятиме ерозійному зносу матеріалу панелей, тоді як використання шестикутної панелі забезпечуватиме розподіл газових потоків, оскільки в цьому випадку будуть відсутні протяжні суцільні шви,

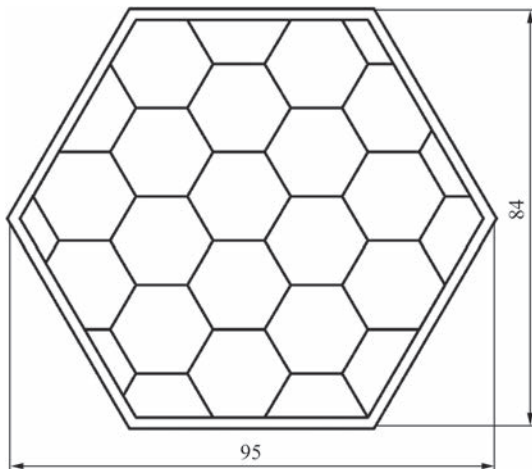


Рис. 5. Ескіз макета тришарової теплозахисної стільникової панелі

паралельні газовому потоку. Ще однією з переваг шестикутної панелі перед трикутною та квадратною є більш рівномірний нагрів та охолодження. Зазвичай в квадратних та трикутних деталях в кутах відмічається значний перегрів в порівнянні з центральними частинами деталей.

Зважаючи на це, саме шестикутна форма теплозахисної стільникової панелі була вибрана для виготовлення модельних зразків. Ескіз модельного зразка тришарової стільникової панелі наведено на рис. 5. Така форма панелі може забезпечити більш раціональне і ефективне покриття криволінійних поверхонь або поверхонь тіл обертання, порівняно з панелями квадратної чи прямокутної форми.

Технологічний процес виготовлення макету теплозахисної стільникової панелі включає наступні операції [14]: виготовлення обшивок (кришок); виготовлення заготовок для стільникового заповнювача; формування із заготовок профільованих стрічок; зварювання стільникового заповнювача; виготовлення стільникових панелей.

За методикою, описаною вище, було виготовлено елементи стільникового заповнювача необхідного розміру та з'єднано між собою точковим зварюванням. Зовнішній вигляд виготовленого пакету стільникового заповнювача представлений на рис. 6. Зовнішній каркас виготовлявся із стрічки фольги $\text{VEC CoCrFeNiSi}_{0,2}$, який з'єднувався зі стільниковим заповнювачем точковим зварюванням. Режим зварювання каркасу був таким самим, як і при зварюванні стільникового заповнювача.

Для забезпечення єдиної висоти для всіх елементів стільникового заповнювача та усунення залишкових дефектів різання, збирання та зварювання, виготовлені стільникові заповнювачі шліфувались на плоскошліфувальному верстаті з обох боків. Після шліфування висота стільникового заповнювача у всіх випадках складала 10 мм.

З отриманих фольг $\text{VEC CoCrFeNiSi}_{0,2}$ за шаблоном механічно вирізались кришки у вигляді

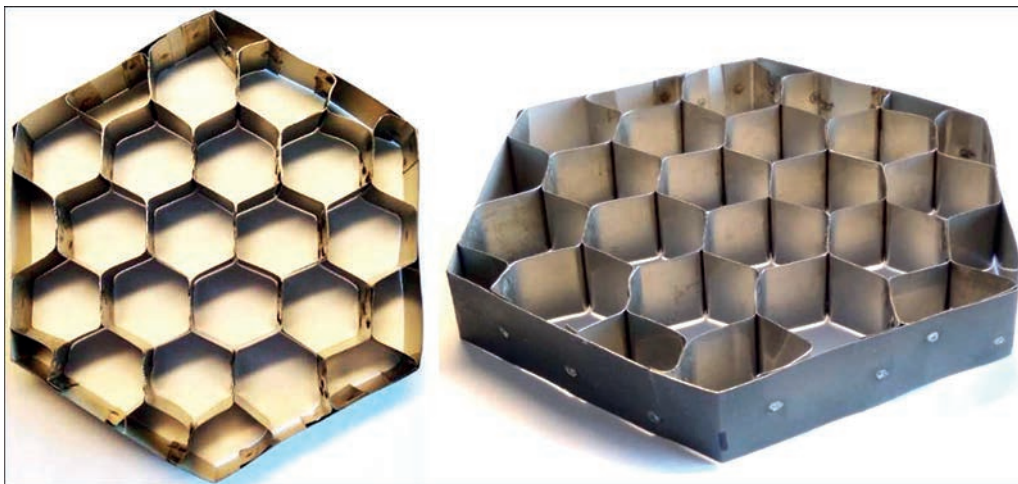


Рис. 6. Загальний вигляд каркасу ($\text{CoCrFeNiSi}_{0,2}$) із стільниковим заповнювачем (нержавіюча сталь AISI 304)

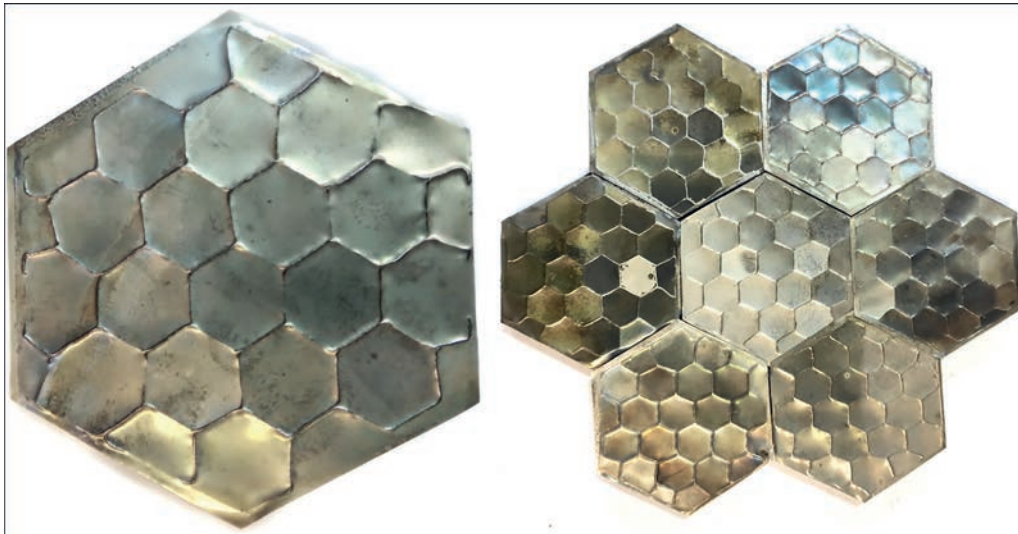


Рис. 7. Загальний вигляд виготовлених тришарових стільникових панелей

ді правильного шестикутника з довжиною грані 48,5 мм. У такому випадку площа робочої поверхні кришки складає біля 60 см².

Отримані елементи тришарової панелі (нижня кришка, стільниковий заповнювач і верхня кришка) розміщувались в оснащенні, розташованому в робочій камері установки для дифузійного зварювання і проводили процес їх з'єднання.

В такий спосіб було виготовлено серію зразків тришарових стільникових панелей шестикутної форми (рис. 7) з розмірами, відповідно до креслення, наведеного на рис. 5. Пітома вага конструкції 3,3 кг/м².

Виготовлені макети тришарових стільникових панелей було перевірено на стійкість конструкції до впливу циклічних термічних навантажень. Випробування проводили, використовуючи електропіч шахтного типу СШОЛ-2,4/12,5 за схемою, в якій один цикл складався з внесення панелі в піч, розігріту до температури 1000 °С, витримки про-

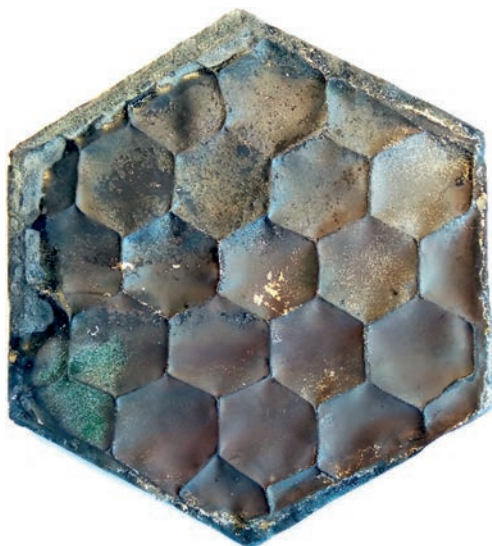


Рис. 8. Загальний вигляд виготовленого макета тришарової панелі після 10 циклів термообробки

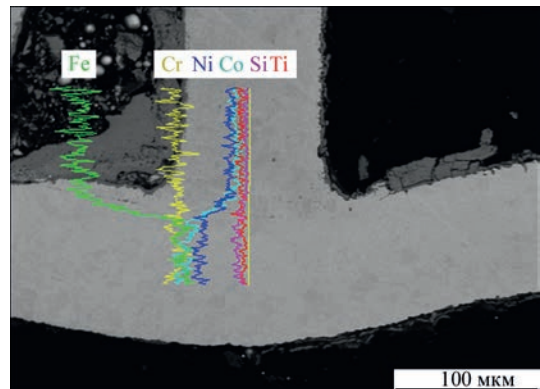


Рис. 9. Електронне зображення мікроструктури поперечного перерізу зони з'єднання заповнювача і кришки тришарової панелі після випробувань при температурі 1000 °С

тягом 30 хв, вилучення панелі з печі, охолодження до кімнатної температури. На рис. 8 наведено зовнішній вигляд макету тришарової стільникової панелі після 10 циклів термообробки. Варто відмітити цілісність обшивки (кришок) панелей і каркасу (стільникового заповнювача) після проведених термоциклів.

Електронно-мікроскопічними дослідженнями встановлено, що розроблені режими дифузійного зварювання забезпечують формування якісного з'єднання стільникового заповнювача з кришками: видно формування дифузійної зони протяжністю до 20 мкм з плавним перерозподілом елементів між матеріалом заповнювача і кришок (рис. 9). Наявність ланцюжка пор переважно субмікронного розміру в зоні з'єднання нержавіючої сталі і ВЕС свідчить про інтенсивну дифузійну взаємодію між ними з незбалансованими потоками атомів, що зумовлює дію ефекту Киркендала.

Висновки

1. Відпрацьовані режими високошвидкісного EB-PVD процесу, що забезпечують отримання тонкої фольги високоентропійного сплаву систе-

ми Co–Cr–Fe–Ni–Si з однорідною структурою по товщині.

2. Встановлено, що запропонований сплав CoCrFeNiSi_{0,2} забезпечує поєднання необхідного рівня жаростійкості зі здатністю до зварювання в твердій фазі.

3. Показана можливість виготовлення зварюванням в твердій фазі тришарових стільникових панелей на основі тонких ВЕС-фольг CoCrFeNiSi_{0,2}, отриманих методом електронно-променевого осадження, здатних витримувати багаторазове термоцикування від 25 до 1000 °C на повітрі без руйнування конструкції.

Список літератури/References

1. Takayuki, K., Hideyuki, T., Syunsuke, I. et al. (2011) Conceptual Study on Heat Resistant and Cooling System of Hypersonic Airplanes. *17th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, San Francisco, CA, USA, April 11–14, 2011*, 1–12. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2011-2378>
2. Rakesh, K.K., Hazem, E.S., Summit, V. et al. (2008) Static Analysis of Sandwich Panels with Square Honeycomb Core. *AIAA J.*, 46, 627–634. DOI: <https://doi.org/10.2514/1.28121>
3. Boudjemai, A., Amri, R., Mankour, A. et al. (2012) Modal Analysis and Testing of Hexagonal Honeycomb Plates Used for Satellite Structural Design. *Materials and Design*, 35, 266–275. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.09.012>
4. Semiatin, S.L., Gross, M.E., Matson, D.W. et al. (2012) Microstructure Evolution and Composition Control During the Processing of Thin-Gage Metallic Foils. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 43, 4819–4834. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-012-1255-9>
5. Murty, B.S., Yeh, J.W., Ranganathan, S. (2014) *Chapter 2 – High-Entropy Alloys: Basic Concepts*, in Murty B.S., Yeh J.W., Ranganathan S. (ed.) *High Entropy Alloys*, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 13–35. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800251-3.00002-X>
6. Ustinov, A.I., Polishchuk, S.S., Demchenkov, S.A. et al. (2020) Skorodzievskii, Formation of thin foils of high-entropy CrFeCoNiCu alloys by EB-PVD process. *Surface and Coatings Technology*, 403, 126440. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126440>
7. Устінов А.І., Скородзієвський В.С., Демченков С.О. та ін. (2020) Вплив структури на механічні властивості вакуумних конденсатів високоентропійних сплавів системи Cr–Fe–Co–Ni–Cu. *Сучасна електротехнологія*, 4, 16–22. <https://doi.org/10.37434/sem2020.04.03>
8. Ustinov, A.I., Skorodzievskii, V.S., Demchenkov, S.O. et al. (2020) Effect of the structure of vacuum condensates of high entropy alloys of Cr–Fe–Co–Ni–Cu system on their mechanical properties. *Suchasna Elektrometal.*, 4, 16–22. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2020.04.03>
9. Ustinov, A.I., Demchenkov, S.A., Melnychenko, T.V. et al. (2021) Effect of structure of high entropy CrFeCoNiCu alloys produced by EB PVD on their strength and dissipative properties. *J. of Alloys and Compounds*, 887, 161408. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161408>
10. Ustinov, A.I., Demchenkov, S.O., Melnichenko, T.V. et al. (2022) The influence of copper on the heat resistance of thin foils of high-entropy alloys of the Cr–Fe–Co–Ni–Cu system obtained by the electron beam deposition method. *The Paton Welding J.*, 11, 39–44. DOI: <https://doi.org/10.37434/trwj2022.11.07>
11. Гусарова І.А., Парко М., А.М. Погачов А.М. и др. (2016) Оценка термостойкости трехслойной сотовой панели, полученной из сплава ЮИПМ-1200 способом диффузионной сварки в вакууме. *Автомат. сварка*, 12 (759), 31–35.
12. Gusarova, I.A., Parko, M., Potapov, A.M. et al. (2016) Evaluation of high-temperature resistance of three-layer honeycomb panel produced from YuIPM-1200 alloy by vacuum diffusion welding. *The Paton Welding J.*, 12, 29–33.
13. Kai, W., Cheng, F.P., Liao, C.Y. et al. (2018) The oxidation behavior of the quinary FeCoNiCrSix high-entropy alloys. *Materials Chemistry and Physics*, 210, 362–369. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.06.017>
14. Li, Y., Zhang, P., Zhang, J. et al. (2021) Oxidation behavior of AlCoCrFeNiSix high-entropy alloys at 1100 °C. *Corrosion Science*, 190, 109633. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109633>
15. Кобелев В.Н., Коварский Л.М., Тимофеев С.И. (1984) *Расчет трехслойных конструкций*. Москва, Машиностроение.
16. Kobelev, V.N., Kovarsky, L.M., Timofeev, S.I. (1984) *Calculation of three-layer structures*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
17. Bitzer, T.N. (1997) *Honeycomb Technology. Materials, Design, Manufacturing, Applications And Testing*. New York, Chapman & Hall.

MANUFACTURING HONEYCOMB PANELS ON THE BASE OF HIGH-ENTROPY CoCrFeNiSi_{0,2} ALLOY FOIL PRODUCED BY EB-PVD METHOD

A.I. Ustinov, Iu.V. Falchenko, S.O. Demchenkov, L.V. Petrushynets

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

E-mail: s_demchenkov@ukr.net

The possibility of manufacturing thin foils of high-entropy alloys (HEA) of Co–Cr–Fe–Ni–Si system by the method of high-speed (up to 10 μm/min) electron beam physical-vapour deposition (EB-PVD) is shown in the work. It was established that silicon content in the alloy composition of approximately 5 wt.% improves the values of high-temperature resistance of basic CoCrFeNi HEA. It is shown that at soaking in air for 28 h at the temperature of 1000 °C the specific change in the weight of CoCrFeNiSi_{0,2} sample is not more than 0.9 mg/cm². A technological scheme was proposed of manufacturing by welding three-layer thermal protection honeycomb panels with a low specific weight based on thin foils of high-entropy CoCrFeNiSi_{0,2} alloy. It was found that the produced by the proposed scheme three-layer thermal protection panels can stand multiple thermal cycling from 25 to 1000 °C in air without the structure failure. The derived results can be the base for development of the technology of manufacturing lightweight honeycomb structures, capable of ensuring thermal protection of aerospace equipment elements at their interaction with the atmosphere. 14 Ref., 2 Tabl., 9 Fig.

Keywords: high-temperature resistance; high-entropy alloys; thin foils; electron beam deposition; three-layer honeycomb panels; thermal protection

Надійшла до редакції 22.06.2023