

Отжиг при 1000 °С выдержками от 25 до 100 минут также вызывает частичное растворение сетки эвтектических карбидов, которые несколько сфероидизируются, но характер их расположения в зоне равноосных кристаллов сохраняется. Отжиг при 1000 °С не уничтожает столбчатости. Карбидная составляющая занимает междендритные участки, наследуя их направленное расположение в транскристаллитных зонах, количество эвтектических карбидов уменьшается, но они утолщаются.

Увеличение температуры отжига до 1200 °С приводит к дальнейшему дроблению сетки эвтектических карбидов и их растворению, в результате чего концентрация легирующих элементов в твердом растворе повышается. Отжиг при 1200 °С способствует дальнейшей сфероидизации карбидов. Местами они располагаются в виде цепочек по границам бывших аустенитных зерен, местами эвтектических карбидов вообще уже нет. Такая картина наблюдается при всех изотермических выдержках, начиная от 25 и кончая 100 минутами.

Наиболее интересные результаты получены после отжига при температуре 1250 °С. Тщательное микроисследование образцов, прошедших отжиг в течение 25...100 минут, свидетельствует о полном завершении процесса сфероидизации. Ни на одном из образцов не было обнаружено остатков карбидной сетки. Эвтектические карбиды приобрели форму равноосных мелких кристаллов, равномерно располагающихся в объеме всего сплава. Одновременно со сфероидизацией очевидно происходит коалесценция карбидов и их растворение в твердом растворе, что приводит к повышению степени его легированности.

Повышение времени выдержки во время отжига при 1250 °С вызывает значительный рост аустенитных зерен.

Наконечний С.О., Гущик Д.В., Літвінова О.А., Юркова О.І., Білик І.І.
(КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ)

**ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ НА ПРОЦЕС ХОЛОДНОГО
ГАЗОДИНАМІЧНОГО НАПИЛЕННЯ ВИСОКОЕНТРОПІЙНИХ
ПОКРИТТІВ**

E-mail: Sergeynuts@gmail.com

Швидке збільшення обсягів промисловості та науково технічний прогрес потребують створення нових конструкційних та функціональних матеріалів. Одними з таких сплавів є багатокомпонентні високоентропійні сплави (ВЕС), які відзначаються стабільністю їх складу та високими експлуатаційними властивостями, що робить їх перспективним матеріалом для отримання покриттів різноманітного призначення [1, 2]. Одним з перспективних методів

отримання багатокомпонентних металевих покриттів є метод холодного газодинамічного напилення (ХГН), оскільки даний метод дає можливість зберегти вихідні властивості ВЕС та навіть покращити їх [3].

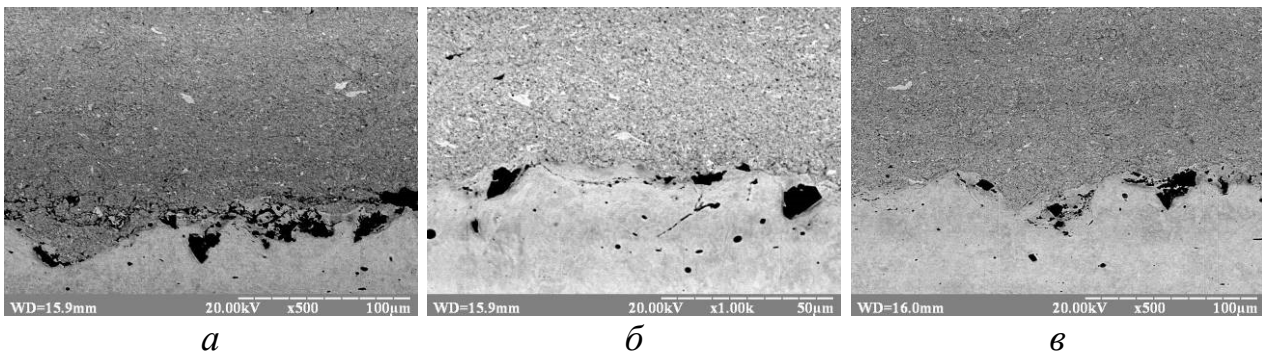
Метою роботи було дослідження впливу температури потоку стисненого повітря в процесі холодного газодинамічного напилення покриттів з високоентропійних сплавів.

Високоентропійний AlNiCoFeCrTi сплав для покриття було отримано методом короткочасного механічного легування протягом 3 годин з наступним ізотермічним відпалом при температурі 1200 °С та розмелом [4], який напилювали на сталеву підкладку методом холодного газодинамічного напилення при тиску 0,8 МПа та температурі потоку стисненого повітря 300 °С, 400 °С та 550 °С.

На рис. 1 наведено СЕМ зображення поперечного перерізу AlNiCoFeCrTi покриттів. Мікроструктура покриттів складається зі світлої та темної фаз, причому більшу частину складає фаза темного кольору. Покриття мають ледве помітну пористість, значно менше 1%. Між покриттям і сталеву підкладкою присутні краплі карбиду кремнію, який використовували для підготовки поверхні сталеву підкладку до напилення. Також слід відмітити досить значну дефектність покриття, отриманого при 300 °С (рис. 1, а), а саме, розшарування в покритті та тріщини на границі між покриттям та підкладкою. Покриття, отримані при 400 °С (рис. 1, б) та 550 °С (рис. 1, в) теж мають незначну, практично непомітну, дефектність на границі між покриттям та підкладкою, а саме поблизу частинок карбиду кремнію. Проте в цілому ці два покриття мають досить міцне зчеплення з підкладкою.

Мікротвердість покриттів HV визначали методом Віккерса на приладі ПМТ-3 за стандартною методикою при навантаженні на індентор 1 Н. За результатами вимірювання мікротвердості побудовано криві розподілу мікротвердості за товщиною для AlNiCoFeCrTi покриттів при різних температурах потоку стисненого повітря (рис. 2).

Мікротвердість покриттів, отриманих при температурах потоку стисненого повітря 300 °С, 400 °С та 550 °С становить $6,91 \pm 0,27$ ГПа, $7,52 \pm 0,28$ ГПа та $7,66 \pm 0,31$ ГПа, відповідно.



a – 300 °С; *б* – 400 °С; *в* – 550 °С;

Рис. 1. СЕМ зображення мікроструктури AlNiCoFeCrTi покриттів при різній температурі потоку стисненого повітря

Слід відмітити, що при підвищенні температури потоку стисненого повітря від 300 °С до 400 °С збільшується мікротвердість як самого покриття, так і зони поблизу границі з підкладкою (від $3,58 \pm 0,13$ ГПа до $6,05 \pm 0,61$ ГПа, відповідно), що підтверджує дані мікроструктурного аналізу (рис. 1) про утворення більш міцного зчеплення між покриттям і підкладкою. В той час як подальше підвищення температури потоку стисненого повітря до 550 °С не впливає на мікротвердість покриття та перехідної зони покриття-підкладки.

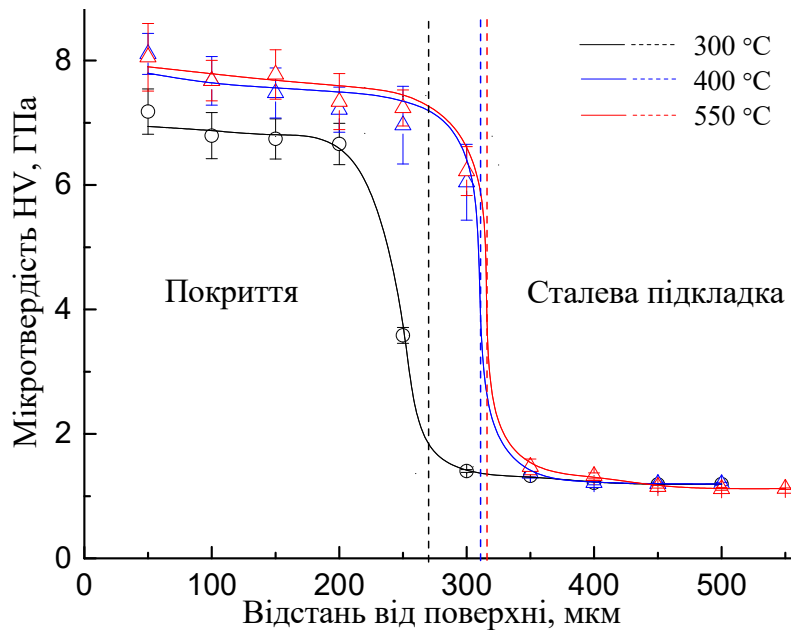


Рис. 2. Розподіл мікротвердості за товщиною AlNiCoFeCrTi покриттів при різних температурах потоку стисненого повітря

Отримані результати свідчать про те, що підвищення температури потоку стисненого повітря до 400 °С в процесі холодного газодинамічного напилення AlNiCoFeCrTi покриттів призводить до утворення більш міцного металевого зв'язку між частинками і хорошої адгезії до сталевій підкладці, а також до підвищення мікротвердості покриття та збільшення його товщини. Подальше підвищення температури до 550 °С не має впливу на мікроструктуру та властивості покриття.

Література:

1. High-Entropy Alloys: Second Edition / B. S. Murty, J. W. Yeh, S. Ranganathan, P. P. Bhattacharjee. – London: Elsevier, 2019. – 388 p.
2. Miracle D. B. A critical review of high entropy alloys and related concepts / D. B. Miracle, O. N. Senkov // *Acta Materialia*. – 2017. – Vol. 122. – P. 448–511.
3. Nanocrystalline AlNiCoFeCrTi high-entropy alloy resulted from mechanical alloying and annealing / A. Yurkova, V. Chernyavsky, D. Hushchuk, I. Bilyk, S. Nakonechnyi // *Proceedings of the 2019 IEEE 9th International Conference on “Nanomaterials: Applications & Properties” NAP-2019*, September 15. – 2019. – P. 01TFC15-1–01TFC15-5.
4. Hushchuk, D.V., Yurkova, A.I., Chernyavsky, V.V. et al. Nanostructured AlNiCoFeCrTi high-entropy coating performed by cold spray. *Appl Nanosci* (2020). <https://doi.org/10.1007/s13204-020-01364-4>