

Механічні властивості високоентропійних $AlCoFeCrVNi$ та $AlCoFeCrVTi$ сплавів після спікання під тиском

О. І. Юркова, доктор технічних наук, професор, yurkova@iff.kpi.ua
В. В. Кушнір, студент
В. В. Чернявський, кандидат технічних наук
Л. О. Бірюкович, кандидат технічних наук, доцент

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» імені Ігоря Сікорського, Київ

В роботі наведено результати дослідження комплексу механічних характеристик, а саме мікротвердості, характеристики пластичності, границі плинності та пружності, високоентропійних $AlCoFeCrVNi$ та $AlCoFeCrVTi$ сплавів, отриманих механічним легуванням і наступним спіканням під тиском. Після механічного легування порошкових сумішей вихідних компонентів формуються наноструктурні сплави, які складаються в основному з ОЦК твердого розчину, незначної кількості ГЦК твердого розчину і карбіду вольфраму у вигляді дрібних частинок за рахунок намелу. Після спікання під тиском 5 ГПа при температурі 800 °С сплави містять тверді розчини з ОЦК та ГЦК структурою і незначну кількість карбіду WC, проте основною фазою в обох сплавах стає ГЦК твердий розчин. Комплекс механічних властивостей визначали в умовах мікроіндентування при статичному вдавлюванні. Мікротвердість HV та характеристику пластичності δ_n розраховували за результатами вимірювань відбитків, отриманих пірамідою Віккерса. Границю плинності σ_s та границю пружності σ_e визначали за кривими «напруження-деформація», які будували із застосуванням комплексу тригранних інденторів з різними кутами загострення. Після спікання під тиском сплави набувають високих значень характеристик міцності завдяки ефекту твердорозчинного зміцнення, сильного спотворення кристалічної ґратки та дисперсійного зміцнення частинками карбіду вольфраму. Мікротвердість $AlCoFeCrVNi$ та $AlCoFeCrVTi$ сплавів становить 11,7 ГПа та 13,7 ГПа, а границя плинності 3,45 ГПа та 4,1 ГПа, відповідно. Додавання до сплаву Ti замість Ni сприяє підвищенню характеристик міцності.

Ключові слова: спікання, тиск, високоентальпійні сплави, механічні властивості, модуль Юнга.

Розвиток багатьох галузей промисловості потребує нових матеріалів з підвищеним рівнем експлуатаційних та споживчих властивостей. У розв'язанні цієї проблеми зростаючий інтерес вчених та інженерів привертають високоентропійні сплави (ВЕС), які є багатокомпонентними, що значно збільшує можливості вибору їх хімічного складу для

Структура і фізико-механічні властивості

виготовлення порівняно з традиційними сплавами, і, відповідно, отримати широкий спектр властивостей [1-4]. ВЕС виявляють унікальне поєднання фізико-механічних характеристик – високу твердість та міцність з достатньою пластичністю, підвищену термостабільність, високу зносостійкість та стійкість до окиснення і корозії [1-5]. Ці сплави можуть застосовуватися в умовах ударних, динамічних навантажень, тертя, можуть працювати в умовах радіації, агресивної атмосфери, при підвищених температурах та інших екстремальних умовах експлуатації [1, 2, 4-6]. ВЕС набувають свої властивості завдяки чотирьом ефектам, а саме високій ентропії, сповільненій дифузії, сильному спотворенню кристалічної ґратки та ефекту коктейлю [1-3]. ВЕС можна отримувати будь-якими традиційними методами, проте останнім часом стає популярним метод механічного легування (МЛ) [7-10], оскільки він забезпечує формування стабільної мікроструктури з однорідним хімічним складом, в порівнянні з іншими способами отримання цих сплавів, та нанокристалічної структури, що сприяє поліпшенню механічних властивостей цих сплавів [8-10].

Метою роботи є визначення комплексу механічних властивостей високоентропійних AlCoFeCrVNі та AlCoFeCrVTі сплавів, консолідованих спіканням під високим тиском.

Дослідні зразки були отримані механічним легуванням впродовж 10 годин в планетарному млині сумішей елементарних порошків та наступним спіканням під тиском 5 ГПа при температурі 800 °С [11]. Порошкові AlCoFeCrVNі та AlCoFeCrVTі сплави після МЛ складаються переважно з ОЦК твердих розчинів та незначної кількості твердих розчинів з ГЦК структурою, які знаходяться в наноструктурному стані зі середнім розміром кристалітів 15 нм [11]. Крім того в обох сплавах встановлено присутність невеликої кількості дрібних частинок карбіду вольфраму WC за рахунок намелу. Тверді розчині, сформовані під час МЛ, є метастабільними тому в процесі спікання відбулося їх перетворення на більш стабільні, при цьому кількість ГЦК твердого розчину, порівняно з ОЦК складовою, збільшується, та обидва сплави містять незначну кількість карбіду WC. Спікання під тиском сприяє збереженню нанокристалічного стану сплавів [1, 10, 11], не дивлячись на збільшення середнього розміру кристалітів приблизно до 50 нм [11].

Комплекс механічних властивостей спечених зразків визначали в умовах мікроіндентування. Мікротвердість HV, характеристику пластичності δ_H , границю плинності σ_s та границю пружності σ_e визначали при статичному вдавлюванні на приладі ПМТ-3, оснащеному стандартною пірамідою Віккерса, та комплектом алмазних тригранних інденторів з різними кутами загострення γ_1 , а саме, 45°, 50°, 55°, 60°, 65°, 70°, 75°, 80°, 85°. Для запобігання впливу масштабного фактору випробування проводили при навантаженнях на індентор, вищих за критичне $F \geq F_c$. Критичне навантаження F_c встановлювали за попередніми дослідженнями. Випробування проводили при навантаженні на індентор 2 Н.

Характеристику пластичності δ_H розраховували за величинами

мікротвердості HV у відповідності з методикою [12] за формулою:

$$\delta_H = 1 - 14,3 \left(1 - \nu - 2\nu^2\right) \frac{HV}{E},$$

де HV – твердість за Віккерсом; E – модуль Юнга; ν – коефіцієнт Пуассона.

Модуль Юнга E визначали на приладі «Мікрон-гама» в умовах безперервного вдавлювання, у відповідності з міжнародним стандартом ISO 14577-1:2002 (E), в основу якого покладений метод Олівера і Фарра [13], з автоматичним навантаженням-розвантаженням і автоматичною реєстрацією в процесі випробувань навантаження ($F = 1,5$ Н) на індентор і його переміщення h – проникнення в матеріал, що досліджувався. Принцип вимірювання та опис проведення випробувань представлено в [14]. Коефіцієнт Пуассона визначали за методикою [15]. Проведені дослідження та розрахунки показали, що для досліджених сплавів коефіцієнт Пуассона $\nu \cong 0,33$.

Границю плинності σ_s та границю пружності σ_e визначали за кривими «напруження-деформація», які будували за методикою [16]. Зважаючи на те, що деформація під індентором в напрямку прикладеного навантаження, головним чином, визначається кутом загострення піраміди за виразом $\varepsilon \approx -\ln \sin \gamma_1$ [16], такий підхід дозволяє проводити випробування в широкому інтервалі величин деформації ε . Побудова кривих деформації передбачає індентування матеріалів алмазними пірамідами з різними кутами загострення і отримання значень твердості за Мейером НМ в умовах різного ступеня деформації під індентором. Оскільки твердість за Мейером НМ є середнім контактним тиском і може бути перерахована на напруження плинності (границю плинності σ_s) при стисканні [16, 17], криві «НМ – ε » є аналогом кривих деформації « σ – ε ». Кожна крива деформації «НМ – ε » або « σ – ε » містить стільки точок, скільки було використано інденторів з різними кутами загострення γ_1 .

Визначення напружень σ_s здійснювали за величинами мікротвердості НМ у наближенні Тейбора $NM = 3 \sigma_s$ для металевих матеріалів [16, 17]. Характеристики σ_e і σ_s екстрагували за побудованими кривими «напруження – деформація» за стандартною методикою.

Після спікання під тиском AlCoFeCrVNі та AlCoFeCrVTі сплави мають високу мікротвердість, а саме, $HV=11,70,6$ ГПа та $HV=13,7\pm 0,7$ ГПа, відповідно (рис. 1).

Для порівняння проводили випробування зразків AlCoFeCrVNі та AlCoFeCrVTі сплавів, спечених у вакуумі при температурі 1200 °С протягом 1 години [11]. Не дивлячись на те, що після спікання у вакуумі в складі сплавів присутні інтерметалідні та карбідні фази, вони мають меншу мікротвердість, ніж сплави, компактовані методом спікання під тиском, а саме, для AlCoFeCrVNі сплаву $HV = 4$ ГПа, а AlCoFeCrVTі сплаву $HV = 4,87$ ГПа. Низька мікротвердість спечених у вакуумі сплавів є наслідком наявності в зразках значної пористості. Крім того, через високу температуру спікання в сплавах не зберігається наноструктурний стан та

Структура і фізико-механічні властивості

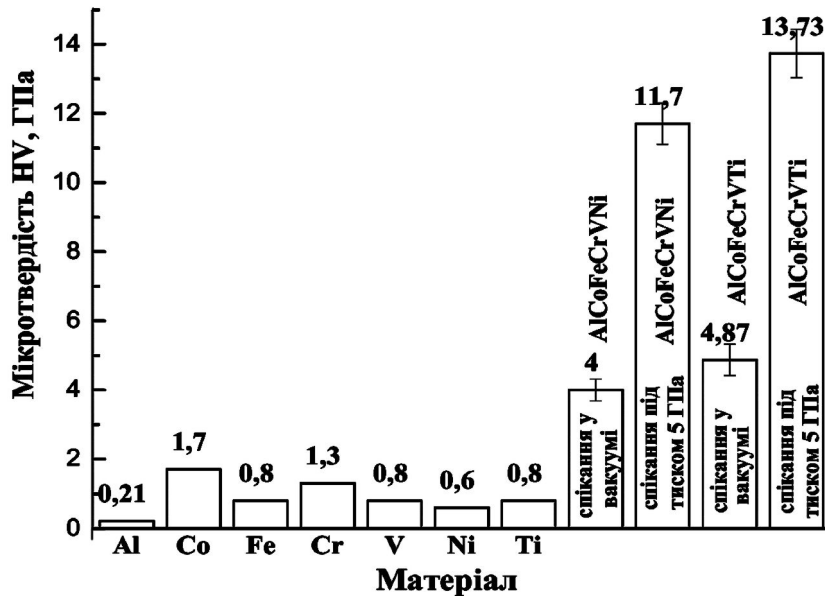


Рис. 1. Мікротвердість вихідних компонентів та AlCoFeCrVNi та AlCoFeCrVTi сплавів, спечених у вакуумі та під тиском.

фазовий склад після МЛ – відбувається зростання кристалітів, а ОЦК твердий розчин повністю перетворюється на менш міцний та більш пластичний твердий розчин з ГЦК ґраткою, що також впливає на механічні властивості сплавів [11].

За результатами мікромеханічних випробувань та розрахунків побудовано криві «напруження-деформація» для AlCoFeCrVNi та AlCoFeCrVTi ВЕС після спікання під тиском, які наведені на рис. 2. Початкова (пружна) частина кривих побудована теоретично на основі припущення, що $\varepsilon_e = \varepsilon$ на цій ділянці кривої. Характер ходу кривих « $\sigma - \varepsilon$ », отриманих методом індентування, близький до ходу кривих « $\sigma - \varepsilon$ », отриманих при випробуванні на розтягування або стискання, та є типовим для матеріалів, які деформуються переважно пластично – на кривих деформації для обох сплавів спостерігається поличка плинності. Границю пружності σ_e визначали на пружній ділянці кривої деформації. Границю плинності σ_s визначали на поличці плинності.

Значення границі пружності σ_e та границі плинності σ_s високоентропійних AlCoFeCrVNi та AlCoFeCrVTi сплавів після спікання під тиском, визначені по кривих «напруження-деформація», представлено в таблиці.

Механічні характеристики AlCoFeCrVNi та AlCoFeCrVTi сплавів після спікання під тиском

Сплав	Мікротвердість HV, ГПа	Модуль Юнга E, ГПа	Характеристика пластичності, δH	Границя пружності σ_e , ГПа	Границя плинності, σ_s , ГПа
AlCoFeCrVNi	11,7 \pm 0,6	192,1 \pm 9	0,67	3,35	3,45
AlCoFeCrVTi	13,7 \pm 0,7	176,8 \pm 11	0,56	3,98	4,10

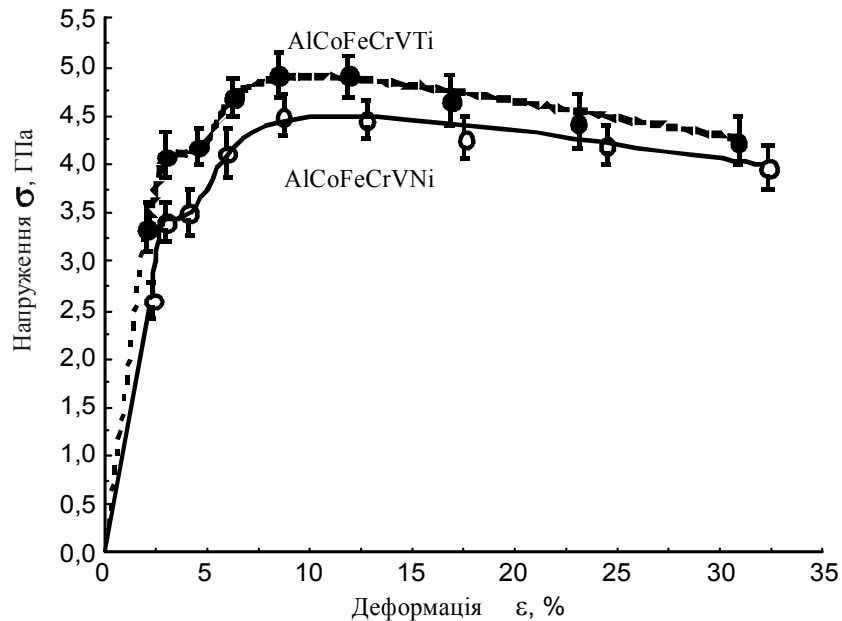


Рис. 2. Криві «напруження-деформація» AlCoFeCrVNi та AlCoFeCrVTi сплавів після спікання під тиском.

З додаванням до сплаву титану замість нікелю значення границі пружності σ_e та границі плинності σ_s збільшуються. Таких самих змін зазнає і мікротвердість HV при додаванні Ti замість Ni, а характеристика пластичності δ_H зменшується (табл. 1). Характеристика пластичності δ_H у відповідності з формулою, яку використовували для її визначення, контролюється, крім мікротвердості, також модулем Юнга і в основному визначається співвідношенням HV/E . Тому зі збільшенням твердості значення цього параметру зменшуються за умови сталого значення модуля E [12, 18].

Високі характеристики міцності спечених високоентропійних AlCoFeCrVNi та AlCoFeCrVTi сплавів пояснюються твердорозчинним зміцненням зі значним спотворенням кристалічної ґратки твердих розчинів через різницю атомних радіусів атомів, що входять до їх складу та збереженням їх наноструктурного стану після спікання, а також присутністю частинок карбиду WC, які є дисперснозміцнюючою фазою. Отримання та збереження наноструктурного стану сплавів іншими методами не можливо або дуже ускладнено. Заміна Ni на Ti викликає підвищення міцності сплавів за рахунок значно більшого атомного радіусу останнього, що призводить до більш значного спотворення кристалічної ґратки твердих розчинів.

Завдяки високим характеристикам міцності та відносно низьким густинам ($\rho = 5,8 \text{ г/см}^3$ для AlCoFeCrVNi та $\rho = 5,2 \text{ г/см}^3$ для AlCoFeCrVTi), дані сплави можуть бути застосовані в багатьох галузях. Наприклад, в машинобудуванні, авіа- та ракетобудуванні, також можливе їх застосування для виготовлення відповідальних деталей, а також в якості захисних покриттів.

Література

1. Murty B.S., Yeh J.-W., Ranganathan S., Bhattacharjee P.P. High-Entropy Alloys, 2nd Edition. – Amsterdam: Elsevier, – 2019. – 388 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816067-1.00009-6>.
2. Gao M. C., Yeh J.-W., Liaw P. K., Zhang Y. High-Entropy Alloys. Fundamentals and Applications. Elsevier, 2015. – 516 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-27013-5>.
3. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts // Acta Materialia. – 2017. – V.122. – P. 488–511. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.08.081>.
4. Ye Y.F., Wang Q., Lu J., Liu C.T., Yang Y. High-entropy alloys: challenges and prospects // Materials Today. – 2016. – Vol. 19. – № 6. – P. 349-362. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2015.11.026>.
5. Alanemea K.K., Bodunrin M.O., Oke S.R. Processing, alloy composition and phase transition effect on the mechanical and corrosion properties of high entropy alloys: a review // Journal of Materials Research and Technology. – 2016. – Vol. 5, Issue 4. – P. 384-393. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2016.03.004>.
6. Tsai M.-H., Yeh J.-W. High-Entropy Alloys: A Critical Review // Materials Research Letters. – 2014. – V.2, № 3. – P. 107-123. <https://doi.org/10.1080/21663831.2014.912690>.
7. Vaidya M., Muralikrishna G. M., Murty B. S. High-entropy alloys by mechanical alloying: A review // Journal of Materials Research – 2019. V.35, No 5. – P. 664-686. <https://doi.org/10.1557/jmr.2019.37>.
8. Sherif El-Eskandarany M. Mechanical alloying: nanotechnology, materials science and powder metallurgy. – Amsterdam: Elsevier, – 2015. – 348 p.
9. Yurkova A.I., Chernyavsky V.V., Bolbut V., and et. al. Structure formation and mechanical properties of high-entropy AlCuNiFeCr alloy prepared by mechanical alloying and spark plasma sintering // Journal of Alloys and Compounds. – 2019. – V. 786. – P. 139-148. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.01.341>.
10. Yurkova A.I., Chernyavsky V.V., Gorban V.F. Structure and Mechanical Properties of High-Entropy AlCuNiFeTi and AlCuNiFeCr Alloys Produced by Mechanical Activation Followed by Pressure Sintering // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2016. – Vol. 55, Issue 3. – P. 152 –163. <https://doi.org/10.1007/s11106-016-9790-3>.
11. Чернявський В.В., Юркова О.І., Кушнір В.В., Степанов О.В. Високоентропійні AlCoFeCrVNі та AlCoFeCrVTі сплави, отримані механічним легуванням і наступним спіканням // Металознавство та обробка металів. – 2018. – № 4. – С. 35-42. <https://doi.org/10.15407/mom2018.04.035>.
12. Milman Yu.V. Plasticity Characteristic Obtained by Indentation // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2008. – Vol. 41. – P. 1-9. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/41/7/074013>.
13. Oliver W.C., Pharr G.M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments // J. Mater. Res. – 1992. – V.7, No.6. – P. 1564-1583. <https://doi.org/10.1557/JMR.1992.1564>.
14. Игнатович С.Р., Закиев И.М. Универсальный микро/нано-индентометр «Микрон-гамма» // Заводская лаборатория. – 2011. – Т. 77, № 1. – С. 61-67.
15. Патент № 93248 Україна. МПК G01N 3/00, G01N 3/40. Спосіб визначення коефіцієнта Пуассона / Бякова О.В., Мільман Ю.В., Власов А.О., Юркова О.І. – № а200814568; заявл. 12.05.2009; опубл. 25.01.2011. Бюл № 2/2011, 4 с.
16. Galanov B.A., Milman Yu.V., Chugunova S.I., Goncharova I.V. Investigation of mechanical properties of high-hardness materials by indentation // Superhard

- materials. – 1999. – No 3. – P. 23-35.
17. Tabor D. The Hardness of Metals. – Oxford: Clarendon Press, 2000. – 130 p.
18. Yurkova A.I., Milman Yu.V., Byakova A.V. Structure and Mechanical Properties of Iron Subjected to Surface Severe Plastic Deformation by Attrition: II. Mechanical Properties of Nano and Submicrocrystalline Iron // Russian Metallurgy (Metally). – 2010. – Vol. 2010, No. 4. – P. 258-263. <https://doi.org/10.1134/S0036029510040026>.

References

1. Murty B.S., Yeh J.-W., Ranganathan S., Bhattacharjee P.P. *High-Entropy Alloys*, 2nd Edition, Amsterdam: Elsevier, 2019, 388 p. [in English]. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816067-1.00009-6>.
2. Gao M. C., Yeh J.-W., Liaw P. K., Zhang Y. High-Entropy Alloys. *Fundamentals and Applications*, Elsevier, 2015, 516 p. [in English]. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-27013-5>.
3. Miracle D.B., Senkov O.N., *Acta Materialia*, 2017, Vol.122, pp. 488–511 [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.08.081>.
4. Ye Y.F., Wang Q., Lu J., Liu C.T., Yang Y., *Materials Today*, 2016, Vol. 19, No. 6, pp. 349-362 [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2015.11.026>.
5. Alanemea K.K., Bodunrin M.O., Oke S.R., *Journal of Materials Research and Technology (JMRT)*, 2016, Vol. 5, Issue 4, pp. 384-393 [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2016.03.004>.
6. Tsai M.-H., Yeh J.-W., *Materials Research Letters*, 2014, Vol. 2, No. 3, pp. 107-123 [in English]. <https://doi.org/10.1080/21663831.2014.912690>.
7. Vaidya M., Muralikrishna G. M., Murty B. S., *Journal of Materials Research*, 2019, V.35, No 5. – P. 664–686. [in English]. <https://doi.org/10.1557/jmr.2019.37>.
8. Sherif El-Eskandarany M. *Mechanical alloying: nanotechnology, materials science and powder metallurgy*, Amsterdam: Elsevier, 2015, 348 p. [in English].
9. Yurkova A.I., Chernyavsky V.V., Bolbut V., and et. al., *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, Vol. 786, pp. 139-148 [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.01.341>.
10. Yurkova A.I., Chernyavsky V.V., Gorban V.F., *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2016, Vol. 55, Issue 3, pp. 152-163. [in English]. <https://doi.org/10.1007/s11106-016-9790-3>.
11. Chernyavsky V.V., Yurkova A.I., Kushnir V.V., Stepanov O.V. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, 2018, No. 4, pp. 35-42 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/mom2018.04.035>.
12. Milman Yu.V., *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2008, Vol. 41, pp. 1-9 [in English]. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/41/7/074013>.
13. Oliver W.C., Pharr G.M., *J. Mater. Res.*, 1992, Vol. 7, No. 6, pp. 1564-1583 [in English]. <https://doi.org/10.1557/JMR.1992.1564>.
14. Ignatovich S.R., Zakiev I.M., *Zavodskaya Laboratoriya*, 2011, Vol.77, No. 1, pp. 61-67 [in Russian].
15. Patent No. 93248 Ukraine. MPK G01N 3/00, G01N 3/40. *Sposib vyznachennya koefitsiyenta Puassona* [Method for determining Poisson's ratio], Byakova O.B., Milman Yu.V., Vlasov A.O., Yurkova O.I., No. a200814568; zayavl. 12.05.2009; opubl. 25.01.2011, Bul. No. 2/2011, 4 p. [in Ukrainian].
16. Galanov B.A., Milman Yu.V., Chugunova S.I., Goncharova I.V., *Superhard materials*, 1999, No 3, pp. 23-35 [in English].
17. Tabor D. The Hardness of Metals. Oxford: Clarendon Press, 2000, 130 p. [in

English].

18. Yurkova A.I., Milman Yu.V., Byakova A.V. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2010, Vol. 2010, No. 4, pp. 258-263 [in English]. <https://doi.org/10.1134/S0036029510040026>.

Одержано 22.11.19

А. И. Юркова, В. В. Кушнир, В. В. Чернявский, Л. О. Бирюкович

Механические свойства высокоэнтропийных AlCoFeCrVNi и AlCoFeCrVTi сплавов после спекания под давлением

Резюме

В работе приведены результаты исследования комплекса механических характеристик (микротвердости, характеристики пластичности, предела текучести и упругости) высокоэнтропийных AlCoFeCrVNi и AlCoFeCrVTi сплавов, полученных механическим легированием и последующим спеканием под давлением. После механического легирования порошковых смесей исходных компонентов формируются наноструктурные сплавы, которые состоят в основном из ОЦК твердого раствора, незначительного количества ГЦК твердого раствора, а также карбида вольфрама в виде мелких частиц, образовавшихся в результате намола. После спекания под давлением 5 ГПа при температуре 800 °С сплавы содержат твердые растворы с ОЦК и ГЦК структурой и незначительное количество карбида WC, однако преобладающей фазой в обоих сплавах является ГЦК твердый раствор. Механические характеристики сплавов определяли в условиях микроиндентирования при статическом вдавливании. Микротвердость HV и характеристику пластичности δ_H рассчитывали по результатам измерений отпечатков, полученных пирамидой Виккерса. Границу текучести σ_s и границу упругости σ_e определяли по кривым «напряжение-деформация», которые строили с применением комплекта трехгранных инденторов с различными углами заточки. После спекания под давлением сплавы имеют высокие характеристики прочности благодаря эффектам твердорозчинного упрочнения, сильного искажения кристаллической решетки и дисперсионного упрочнения частицами карбида вольфрама. Микротвердость AlCoFeCrVNi и AlCoFeCrVTi сплавов составляет 11,7 ГПа и 13,7 ГПа, а предел текучести 3,45 ГПа и 4,1 ГПа, соответственно. Добавление Ti вместо Ni способствует повышению прочностных характеристик сплава.

Ключевые слова: спекания, давление, высокоэнтропийные сплавы, механические свойства, модуль Юнга.

A. Y. Yurkova, V. V. Kushnir, V. V. Cherniavskiy, L. O. Biryukovich

Mechanical properties of AlCoFeCrVNi and AlCoFeCrVTi high-entropy alloys obtained by sintering under pressure

Summary

The complex of mechanical characteristics, such as microhardness, HV , plasticity characteristic, δ_H , yield strength, σ_s , and elastic limit, σ_e , of equi-atomic AlCoFeCrVNi and AlCoFeCrVTi high entropy alloys obtained by mechanical alloying and subsequent sintering under pressure was determined. After mechanical alloying of the powder mixtures

Структура і фізико-механічні властивості

of the starting components, nanostructured alloys are formed, which mainly consist of a bcc solid solution, a small amount of fcc solid solution, and tungsten carbide in the form of small particles due to milling. After sintering under pressure of 5 GPa at a temperature of 800 °C, the alloys contain solid solutions with a bcc and fcc structure and a small amount of WC carbide, however, the main phase in both alloys is a fcc solid solution. The mechanical characteristics of the alloys were determined by microindentation technique under static indentation. The microhardness number, HV, and the plasticity characteristic δ_H were calculated from the results of measurements of impressions obtained by the Vickers pyramid. The yield strength σ_s and the elasticity limit σ_e were determined from the “stress-strain” curves, which were constructed using a set of trihedral indenters with different sharpening angles. After sintering under pressure, the alloys have high strength characteristics due to the effects of solid-solution strengthening, strong distortion of the crystal lattice, and dispersion hardening by tungsten carbide particles. The microhardness numbers, HV, of AlCoFeCrVNi and AlCoFeCrVTi alloys are 11.7 GPa and 13.7 GPa, and the yield strength σ_s are 3.45 GPa and 4.1 GPa, respectively. The addition of Ti instead Ni of into the alloy shows the best strengthening effect in our experiments.

Keywords: sintering, pressure, high-enthalpy alloys, mechanical properties, Young's modulus.

Шановні колеги!

Триває передплата на науково-технічний журнал «Металознавство та обробка металів» на 2020 р.
Для регулярного одержання журналу потрібно перерахувати вартість заказаних номерів на розрахунковий рахунок Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України.
Вартість одного номера журналу – 50 грн., передплата на рік – 200 грн.

Ціна архівних номерів 1995 – 2018 рр. – 10 грн.

Розрахунковий рахунок для передплатників, спонсорів і рекламодавців:

р/р UA828201720313251001201012215

банк ДКСУ в м. Києві, код банку 820172

Отримувач – ФТІМС НАН України, код ЄДРПОУ 05417153,

з посиланням на журнал “ММ”.

Копію документа передплати та відомості про передплатника **просимо надсилати до редакції,** вказавши номер і дату платіжного документа.

