УДК 669.018.2, 669.14.018.44:669.13
Сергієнко Р.А.[1], Щерецький О.А.[2], Верховлюк А.М.[3]
[1] канд. техн. наук, ст. наук. співр., ФТІМС НАН України, Київ
[2] д-р техн. наук, пров. наук. співр., ФТІМС НАН України, Київ
[3] д-р техн. наук, професор, зав. відділу фізико-хімії сплавів ФТІМС НАН України, Київ

ПІДБІР СИСТЕМ ВИСОКОЕНТРОПІЙНІХ ЛИВАРНИХ СПЛАВІВ ДЛЯ ЕКСТРЕМАЛЬНИХ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Склади перспективних високоентропійних сплавів підбиралися таким чином, щоб забезпечити їх максимальну жаростійкість та зносостійкість. Виконано літературний аналіз та проведено термодинамічні розрахунки, щодо можливостей отримання ливарних високоентропійних сплавів, які містять не менше 5-6 хімічних елементів і мають невеликий інтервал плавлення–кристалізації, тобто сплави близькі до евтектичного складу. Розрахунки проводили за допомогою програмного забезпечення фірми "Thermo-Calc AB" (Швеція) та міжнародних спеціалізованих баз експериментальних термодинамічних даних: COST2, PKP, BIN, SSOL. Літературний аналіз показав, що у високоентропійних сплавах (ВЕС) в залежності від елементного складу формуються переважно однофазні тверді розчини заміщення (ОЦК, ГЦК), а в залежності від методу отримання та обробки сплаву, можливо формування інших впорядкованих та невпорядкованих субмікро-, нанорозмірних фаз. Підвищене значення ентропії змішування і, як наслідок, знижена вільна енергія багатокомпонентних сплавів забезпечують високу термічну стійкість твердого розчину, опір зносу і корозії, високу твердість.

При виборі складів перспективних систем сплавів було застосовано чотири основних критерії для оцінки формування твердих розчинів в високоентропійних сплавах. Перший критерій – це величина ентропії змішування $11 \leq \Delta S_{mix} \leq 22$ Дж/(моль·К), який показує ймовірність формування рівноважної однофазної структури на основі твердого розчину і розраховується як:

$$\Delta S_{mix} = -R\sum_{i=1}^{N} x_i \ln(x_i), \quad (1)$$

де x_i – молярна частка компонента розплаву; R – універсальна газова стала.

Другий критерій – величина ентальпії змішування, який дозволяє оцінити можливість формування саме твердого розчину в структурі і розраховується за формулою:

$$\Delta H_{mix} = \sum_{i=1;j\neq i} 4\Delta H_{ij}^{mix} x_i x_j, \quad (2)$$

де ΔH_{ij}^{mix} – ентальпія змішування двокомпонентного еквіатомного сплаву; x_i, x_j – молярні частки компонентів у відповідному бінарному сплаві. Цей критерій для ВЕС знаходиться в інтервалі значень -22 кДж/моль $\leq \Delta H_{mix} \leq 5$ кДж/моль.

Третій критерій – емпіричний параметр, який розраховує різниці атомних розмірів, δ, і не повинен перевищувати 8,5 %. Обчислюється як:

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} c_i (1 - \frac{r_i}{\bar{r}})^2}, \quad (3)$$

де c_i – вміст i-го компонента в атомних відсотках; r_i – атомний радіус i-го компонента; $\bar{r}$ – середній атомний радіус.

Четвертий критерій – узагальнений безрозмірний термодинамічний параметр ($\Omega > 1{,}1$), який визначається як ентропійний параметр для середньої температури T_m плавлення елементів за формулою:

$$\Omega = \frac{T_m \Delta S_{mix}}{\Delta H_{mix}}, \quad (4)$$

На основі розрахунків та аналізу літератури були обрані перспективні системи сплавів, які включають до 5-6 основних елементів, кожен у великій концентрації (від 5 до 35 ат. %) – CoCrFeMnNiCX, CoCrFeCuNiCX, AlCrFeCuNiCX, CoCrFeCuMnNiCX, AlCoCrFeCuNiCX, які додатково леговані вуглецем від 0,5 до 15 ат. %, а також, сьомими і восьмими елементами в кількості менше 4-5 ат. % (X = B, Si, Ti, V, Zr, Nb, Mo, W, Sn). Тугоплавкі легуючі елементи, такі як Nb, V, W, Mo і Zr відповідають за жароміцні властивості матеріалу. Легуючі елементи нікель, хром, алюміній, кремній в процесі нагрівання утворюють захисні оксидні плівки (Al, Cr, Fe)$_2O_3$, SiO_2 і забезпечують жаростійкість сплаву. Для підвищення властивостей ВЕС можливо легування їх рідкісноземельними елементами, а також зміцнення ВЕСів за допомогою оксидів ітрію, цирконію та алюмінію.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Cantor B. Multicomponent and High Entropy Alloys. *Entropy* 2014. vol. 16. P. 4749 – 4768.

2. Трофименко Н.Н., Ефимочкин И.Ю., Большакова А.Н. Проблемы создания и перспективы использования жаропрочных высокоэнтропийных сплавов. *Авиационные материалы и технологии*. 2018. №2, (том 51). С. 3-8.

3. Ремпель А.А., Гельчинский Б.Р. Высокоэнтропйные сплавы: получение, свойства, практическое применение. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2020. № 3-4, (том 63). С. 248 – 253.

4. Погребняк А.Д., Багдасарян А.А., Якущенко И.В., Береснев В.М. Структура и свойства высокоэнтропийных сплавов и нитридных покрытий на их основе. *Успехи химии*. 2014. № 11, (том 83). С. 1027 – 1061.

5. Щерецький О.А. Високоентропійні сплави, структуроутворення та кристалізація. *Металознавство та обробка металів*. 2013. №1. С. 15-20.

6. Древаль Л.А., Аггравал П. Г.,Турчанин М.А. Высокоэнтропийные сплавы как материалы, имеющие в основе множество базовых элементов. *ВІСНИК Донбаської державної машинобудівної академії*. 2014. № 1, (том 32). С. 58 – 64.