

УДК 536.425

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ CoCrFeMnNi

Панченко Ирина Алексеевна, к.т.н., доцент

Гостевская Анастасия Николаевна

Коновалов Сергей Валерьевич¹, д.т.н., профессор

(e-mail: i.r.i.ss@yandex.ru)

*Сибирский государственный индустриальный университет,
Новокузнецк, Россия*

В статье проведено исследование изменения фазового состава высокоэнтропийного сплава Co-Cr-Fe-Mn-Ni при помощи расчетов термодинамических параметров (Ω , концентрация валентных электронов (КВЭ), разности в атомных радиусах δ и др.) в зависимости от варьирования содержания железа и марганца. Исходя из полученных данных и критериев образования твердого раствора, возможно, прогнозирования фазового состава. В ходе исследования было определено, что на образование ТПУ фазы преобладает при содержании Mn $20 \leq x < 60$ ат. %, и при содержании Fe $0 \leq x < 30$ ат. %. Образование твердого раствора прогнозируется при содержании Fe и Mn $0 \leq x < 100$ ат. %.

Ключевые слова: высокоэнтропийный сплав, Co-Cr-Fe-Mn-Ni, концентрация валентных электронов, термодинамические критерии.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 0809-2021-0013

Сплавы в виде твердых растворов, состоящие из нескольких основных элементов в примерно эквиатомных концентрациях, стали предметом быстро растущего числа исследований. Сплав в виде твердого раствора, состоящий из пяти или более элементов в эквиатомных соотношениях, представляет интерес из-за его потенциала для упрочнения твердого раствора (высокая прочность) в сочетании с хорошей пластичностью, если фаза твердого раствора обладает простой кристаллической структурой. Поскольку высокая прочность и пластичность важны для конструкционных материалов, исследовательские усилия, как правило, ориентированы на применение и направлены на поиск новых составов сплавов с многообещающими механическими свойствами.

Исследование высокоэнтропийных сплавов, формирующих структуру, состоящую из нескольких фаз с большой объемной долей, является актуальной темой исследований. К сплавам с однофазной структурой твердого раствора с ГЦК решеткой можно отнести высокоэнтропийный сплав CoCrFeMnNi [1]. В работе [2] исследователи выдвигали предположение, что такой сплав состоит из двух фаз, но данная теория была опровергнута так как авторы исследования [3] доказали, наличие в CoCrFeMnNi другие фазы. ВЭС системы CoCrFeMnNi интересен тем, что обладает хорошей

комбинацией свойств (высокая твердость, прочностные характеристики, износостойкость и коррозионную стойкость).

Целью работы является прогнозирование фазового состава высокоэнтروпийного сплава Co-Cr-Fe-Mn-Ni при изменении содержания Fe и Mn при помощи феноменологических критериев в диапазоне x от 0 до 100 ат. %.

Для прогнозирования фазового состава высокоэнтропийных сплавов был выбран сплав системы CoCrFeMnNi с варьированием концентрации содержания Fe и Mn.

Прогнозирование фазового состава в высокоэнтропийных сплавах с применением термодинамических параметров, была сделана в работе [4]. Параметры, отвечающие за образование фаз и формирование самого твердого раствора: разница атомных размеров (δ), энтальпия смешивания ($\Delta H_{\text{смеш}}$).

Для характеристики сплавов в зависимости от их состава, были использованы следующие параметры:

$$\Delta H_{\text{смеш}} = \sum \Omega_{i,j} c_i c_j, \text{ где}$$

Ω_{ij} ($=4\Delta H_{AB}^{\text{смеш}}$) – зависящий от концентрации параметр, характеризующий взаимодействие между элементами в твердом растворе; c_i и c_j – содержание (ат. %) соответственно i -того и j -того элемента в сплаве; $H_{AB}^{\text{смеш}}$ – энтальпия смешения компонентов A и B в жидком бинарном сплаве.

– средняя разность атомных радиусов:

$$\delta_r = 100\% \sqrt{\sum c_i \left(1 - \frac{r_i}{\bar{r}}\right)^2},$$

где c_i – содержание (ат. %) i -того элемента в сплаве, r_i – атомный радиус i -того элемента в сплаве, $\bar{r} = \sum c_i r_i$ – средний атомный радиус сплава.

В исследование, представленное в работе [5] показано, что для предсказания формирования структуры ВЭСов был авторами, использовали дополнительный термодинамический параметр:

$$\Omega = \frac{T_{\text{пл}} \Delta S_{\text{смеш}}}{|\Delta H_{\text{смеш}}|},$$

где $T_{\text{пл}} = \sum c_i T_{\text{пл}}$ и $T_{\text{пл}}$ – температура плавления элементов, c_i – молярная доля i -го компонента сплава. $\Delta S_{\text{смеш}}$ – конфигурационная энтропия смешения n -компонентного идеального раствора.

$$\Delta S_{\text{смеш}} = -R \sum c_i \ln c_i,$$

где R – универсальная газовая постоянная, c_i – содержание (ат. %) i -того элемента в сплаве.

Так же было определено, что ζ -фаза в ВЭСах классифицируется как «электронная» фаза, образование которой зависит от КВЭ.

Концентрация валентных электронов определяется как:

$$\sum c_i (\text{КВЭ})_i, \text{ где}$$

c_i – молярная доля i -го компонента и $(\text{КВЭ})_i$ – концентрация валентных электронов i -го компонента.

Основные параметры каждого элемента исследуемой системы приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Атомный радиус, концентрация валентных электронов (КВЭ), температура плавления составляющих элементов сплава

Элемент ВЭС	Радиус атома элемента, пм	Тпл, °К	КВЭ
Co	125,1	1768	9
Cr	124,91	2180	6
Fe	124,12	2128	8
Mn	135	1519	7
Ni	124,59	1728	10

Исходя из полученных данных было установлено, что твердый раствор высокоэнтропийных сплавов системы CoCrFeMnNi образуется при содержании Fe $0 \leq x < 100$ ат. % и при Mn $0 \leq x < 100$ ат. %.

Следует отметить, что образование ГЦК фазы происходит при изменении содержания железа в сплаве от $40 \leq x < 100$ ат. %. При изменении в системе CoCrFeMn_xNi образование ГЦК фазы замечено при изменении содержания Mn $0 \leq x < 10$ ат. %. Так, в сплаве CoCrFeMn_xNi на диапазоне $20 \leq x < 100$ ат. % значений x прогнозируется образование смеси ОЦК и ГЦК фаз. А в сплаве CoCrFeMn_xNi прогнозируется образование смеси ОЦК и ГЦК фаз при $0 \leq x < 40$ ат. % значений x. Следует отметить, что наличие Fe в сплаве не способствует изменению в концентрации валентных электронов формированию и образованию ОЦК фазы.

Было проведено исследование влияния Fe и Mn на фазовый состав высокоэнтропийного сплава Co-Cr-Fe-Mn-Ni при применении феноменологических критериев. В ходе исследования было выявлено:

1. Изменение содержания железа в сплаве Co-Cr-Fe-Mn-Ni не оказывает влияния на изменение концентрацию валентных электронов,
2. Было установлено, что твердый раствор сплава образуется в случае содержания Fe и Mn $0 \leq x < 100$ ат. %.

Список литературы

1. J. Yeh J., Chen S., Lin S.-J., Gan J.-Y., Chin T., Shun T., Tsau C., Chang S.-Y. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes // Adv. Eng. Mater. 2004. Vol. 6, № 5. P. 299–303.
2. Wang Y.P., Li B.Sh., Heng Zh. F. Solid Solution or Intermetallics in a High Entropy Alloy // Advanced Engineering Materials, 2009. № 8, P. 641-644.
3. Otto F., Dlouhy A., Somsen Ch., Bei H., Eggeler G., George E.P. The influence of temperature and microstructure on the tensile properties of a CoCrFeMnNi high-entropy alloy // Acta Materialia. 2013. №61. P.5743-5755.
4. Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys // Materials Science and Engineering A, 2004. 375– 377. P.213–218.
5. Zhang Y., Zhou Y.J., Lin J.P., Chen G.L., Liaw P.K. Solid-Solution Phase Formation Rules for Multi-component Alloys // Advanced Engineering Materials, 2008.10 №6. P.534-538.

Konovalov Sergey Valerievich¹, Doctor of Technical Sciences, Professor

Panchenko Irina Alekseevna¹, Ph.D., Associate Professor

Gostevskaya Anastasia Nikolaevna¹

¹Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, 654007 Russia

PREDICTION OF THE FORMATION OF THE STRUCTURE AND PHASE COMPOSITION OF HIGH-ENTROPY CANTOR ALLOYS CoCrFeMnNi

High-entropy Co-Cr-Fe-Mn-Ni alloy by calculating the thermodynamic parameters (Ω , valence electron concentration (VEC), differences in atomic radii, etc.) depending on the variation in the content of iron and manganese. Based on the data obtained and the criteria for the formation of a solid solution, it is possible to predict the phase composition. In the course of the study, it was determined that the formation of the TPU phase prevails when the content of Mn $20 \leq x < 60$ at. %, and when the content of Fe $0 \leq x < 30$ at. %. The formation of a solid solution is predicted when the content of Fe and Mn $0 \leq x < 100$ at. %.

Keywords: *high-entropy alloy, Co-Cr-Fe-Mn-Ni, valence electron concentration, thermodynamic criteria.*

УДК 621.793.79

ОРГАНИЗАЦИЯ УЧАСТКА ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИМ НАПЫЛЕНИЕМ

Пономарев Алексей Иванович, к.т.н.

(e-mail: apom2005@yandex.ru)

*Калужский филиал Московского государственного технического
университета имени Н.Э. Баумана, Калуга, Россия*

В данной статье рассматривается организация участка восстановления автомобильных деталей и рабочего места для газодинамического напыления с возможностью повторного использования порошка для напыления.

Ключевые слова: дефекты, газодинамическое напыление, порошок, очистка воздуха.

В процессе эксплуатации автомобилей надежность, заложенная в них при производстве, снижается вследствие изнашивания, коррозии, усталости и старения материалов автомобильных деталей. Отсюда возникает потребность в текущем ремонте, заключающемся, в том числе, в устранении различных дефектов деталей для поддержания автомобиля в работоспособном состоянии.

Большое количество тонкостенных деталей современных автомобилей изготавливают из сплавов алюминия. Распространенными дефектами таких деталей являются поры, раковины, сколы, мелкие трещины. Одним из оптимальных способов устранения таких дефектов может быть технология газодинамического напыления (ГДН), выгодно отличающаяся от других способов отсутствием значительного нагрева восстанавливаемых деталей и не требующая тщательной подготовки к напылению.