

ТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ FeCoCrNiTiCu И FeCoCrNiTiMo

Юров Виктор Михайлович
кандидат физ.-мат. наук, доцент
Гученко Сергей Алексеевич
докторант PhD
Завацкая Ольга Николаевна
магистр

Карагандинский государственный университет имени Е.А. Букетова,
Казахстан, Караганда

Введение

В последние годы предложена и экспериментально подтверждена новая концепция создания металлических сплавов, основанная на достижении высокой энтропии смешения компонентов сплава [1-6]. Высокоэнтропийные сплавы относятся к классу металлических материалов. Эти многокомпонентные сплавы содержат 5 и более металлических элементов, при этом концентрация каждого может изменяться от 5 до 35 ат.% в зависимости от количества компонентов в сплаве. В работах [1-6] отмечается, что изначально, основой для таких ВЭСов служили исключительно тугоплавкие металлы, такие как W, Mo, Ta, Nb, V. Сплавы имели однофазную ОЦК структуру и демонстрировали высокую прочность (400 МПа при $T = 1600^{\circ}\text{C}$), но плотность, значительно большую ($> 12 \text{ г/см}^3$), чем промышленные никелевые суперсплавы. Стало очевидным, что увеличение удельной прочности, пусть и при проигрыше в температуре эксплуатации, должно быть первостепенным критерием при выборе составных компонентов.

Объекты и методика эксперимента

Были составлены 2 эквимольные смеси порошков из 7 элементов: Fe-Co-Cr-Ni-Ta-Ti-Cu и Fe-Co-Cr-Ni-Ta-Ti-Mo. Механическое легирование порошковой смеси выполняли в планетарной мельнице, скорость вращения размольных стаканов составляла 580 об/мин. Навеску смеси порошков определяли по соотношению массы порошка к массе размольных тел как 1:10, соответственно. Электронно-микроскопическое исследование было проведено на растровом электронном микроскопе MIRA 3 фирмы TESCAN. Исследования проводились при ускоряющем напряжении 20 кВ и рабочем расстоянии около 15 мм. Для каждого образца было сделано по 4 снимка с 4 точек поверхности при разных увеличениях: 245 крат, 1060 крат, 4500 крат и 14600 крат (2.2). Микротвердость изменялась прибором HVS – 1000. Коэффициент трения на установке, описанной в работе [7].

Результаты эксперимента и их обсуждение

Результаты электронно-микроскопического исследования (РЭМ-изображение) представлено на рис. 1.

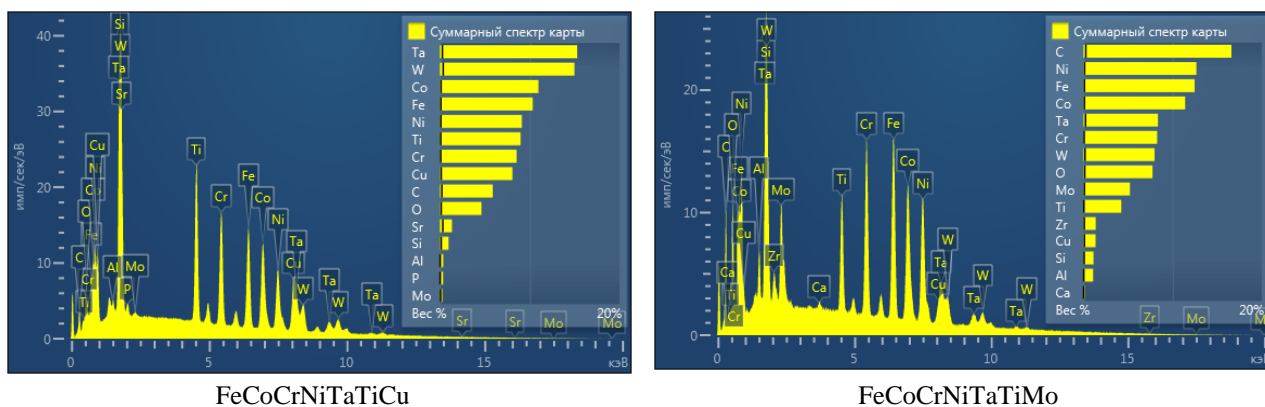


Рисунок 1- РЭМ – изображения ВЭСов

Для традиционных сплавов характерно формирование множества интерметаллидов, например, таких как Ni_3Ti , Ni_3Cu , Cr_2Ti . Тогда как в полученном многокомпонентном сплаве они не образуются, и он полностью состоит из простого ОЦК-твердого раствора, а общее число фаз значительно ниже равновесного количества, разрешенного правилом фаз Гиббса.

Нами использовался микротвердомер HVS-1000A. Он так же может использоваться для исследования структуры металлических материалов и для определения распределения цементита по поверхности и экспериментов с определением твердости по методу Кнупа ($1 \text{ ГПа} = 92,6 \text{ HV}$). Результаты измерений наших ВЭСов даны в табл. 1.

Таблица 1

МИКРОТВЕРДОСТЬ ПОКРЫТИЯ ВЭСОВ

Микротвердость HV	1	2	3	4	5	6	7	Сред.
FeCoCrNiTaTiCu	347,2	398,4	310,3	311,9	419,4	348,9	288,7	345,1
FeCoCrNiTaTiMo	342,3	287,5	342,1	292,6	299,3	292,0	370,3	307,2

Наши ВЭСы имеют плотность $\rho = 7.15$ и $\rho = 6.76$ г/см³, соответственно. Для сравнения, никелевый суперсплав 718 обладает плотностью $\rho = 8,19$ г/см³ при твердости равной 3,6 ГПа (~ 360 HV), что незначительно отличается от наших ВЭСов (табл. 1). Однако в аэрокосмической отрасли востребованы металлические материалы с более низкой плотностью для высокотемпературного применения в несущих конструкциях и системах тепловой защиты. Коэффициенты трения показаны в табл. 2 и табл. 3.

Таблица 2

КОЭФФИЦИЕНТЫ ТРЕНИЯ ВЭСОВ ПО МЕДИ И АЛЮМИНИЮ

покрытие	по меди		по алюминию	
	коэффициент трения	погрешность	коэффициент трения	погрешность
FeCoCrNiTaTiCu	0,136	0,006	0,141	0,002
FeCoCrNiTaTiMo	0,268	0,001	0,302	0,004

Таблица 3

КОЭФФИЦИЕНТЫ ТРЕНИЯ ДЛЯ ОДНОИМЕННЫХ ПАР МАТЕРИАЛОВ [8]

Комбинации материалов		Коэффициент трения
Алюминий	Алюминий	(1,05-1,35)
Медь	Медь	1,0
Сталь	Сталь	0,8
Железо	Железо	1,0
Кадмий	Кадмий	0,5
Хром	Хром	0,41
Магний	Магний	0,6
Никель	Никель	(0,7-1,1)
Платина	Платина	1,2
Серебро	Серебро	1,4
Цинк	Цинк	0,6

Таблица 4

**КОЭФФИЦИЕНТЫ ТРЕНИЯ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ПОКРЫТИЙ
CR-MN-SI-CU-FE-AL [9]**

Наименование образцов	Коэффициент трения	
	Алюминиевая пластина	Медная пластина
Cr-Mn-Si-Cu-Fe-Al	0,219	0,256
Cr-Mn-Si-Cu-Fe-Al+Ti аргон	0,365	0,426
Cr-Mn-Si-Cu-Fe-Al+Ti азот	0,273	0,269

Из табл. 2 и 3 видно, что трение наших ВЭСов значительно уступает трению одноименных пар материалов из табл. 3, и близко к трению многоэлементных покрытий. Для сравнения, никелевый суперсплав 718 обладает коэффициентом трения ~ 0,79.

Заключение

Разработанный нами высокоэнтропийные сплавы FeCoCrNiTaTiCu и FeCoCrNiTaTiMo получены недорогим и простым методом механического легирования. Они имеют плотность $\rho = 7.15$ и $\rho = 6.76$ г/см³, что значительно меньше обычных ВЭСов (~ 12 г/см³) и твердость на уровне никелевого суперсплава 718 (~ 3,6 ГПа). Они имеют малый коэффициент трения ~ 0,3, что со всей очевидностью приводят к экономии энергоресурсов.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке МОН РК. Гранты №0118PK000063 и №Ф.0781.

Литература:

1. Yeh J.W., Chen Y.L., Lin S.J. High-entropy alloys – a new era of exploitation // Materials Science Forum. 2007. Vol. 560. – P. 1-9.

2. Шайсултанов Д.Г. Структура и механические свойства высокоэнтропийных сплавов системы CoCrFeNiX (X=Mn, V, Mn и V, Al и Cu). - Дисс. канд. тех. наук, Белгород, 2015. – 142 с.
3. Горбань В.Ф., Крапивка Н.А., Фирстов С.А. Высокоэнтропийные сплавы - электронная концентрация - фазовый состав - параметр решетки – свойства // ФММ. 2017. Vol. 118. №10. – С. 1017-1029.
4. Ивченко М.В. Структура, фазовые превращения и свойства высокоэнтропийных эквиатомных металлических сплавов на основе AlCrFeCoNiCu // Дисс. канд. физ.-мат. наук. Екатеринбург. 2015. - 167 с.
5. [Санин В.Н.](#), [Юхвид В.И.](#), [Икорников Д.М.](#) и др. СВС-металлургия литых высокоэнтропийных сплавов на основе переходных металлов // ДАН НАН. 2016. Том. 470. №4. – С. 421-426.
6. Юрченко Н.Ю. Разработка и исследование высокоэнтропийных сплавов с высокой удельной прочностью на основе системы Al-Cr-Nb-Ti-V-Zr. – Диссер. кандидат. тех. наук. Белгород. 2019. – 187 с.
7. Юров В.М., Гученко С.А., Ибраев Н.Х. Определение коэффициента трения скольжения. // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2010. №8. – С. 148-152.
8. Крагельский И.В., Виноградова И.Э. Коэффициенты трения. - М.: Машгиз, 1962. – 220 с.
9. Юров В.М., Лауринас В.Ч., Гученко С.А., Завацкая О.Н. Поверхностное натяжение упрочняющих покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. - № 1. - С. 33-36.