

# 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 эквимоллярные 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 измерялась 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.

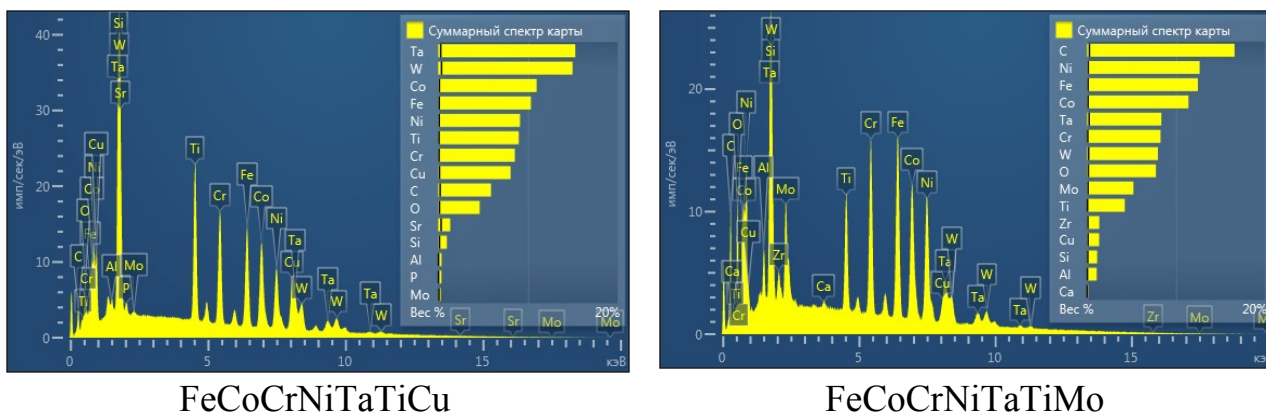


Рисунок 1- РЭМ – изображения ВЭСов

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	<b>345,1</b>
FeCoCrNiTaTiMo	342,3	287,5	342,1	292,6	299,3	292,0	370,3	<b>307,2</b>

Наши ВЭСы имеют плотность  $\rho = 7.15$  и  $\rho = 6.76$  г/см<sup>3</sup>, соответственно. Для сравнения, никелевый суперсплав 718 обладает плотностью  $\rho = 8,19$  г/см<sup>3</sup> 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
<i>продолжение таблицы 3</i>		
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  $\sim 0,79$ .

### **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/см<sup>3</sup>, что значительно меньше обычных ВЭСов ( $\sim 12$  г/см<sup>3</sup>) и твердость на уровне никелевого суперсплава 718 ( $\sim 3,6$  ГПа). Они имеют малый коэффициент трения  $\sim 0,3$ , что со всей очевидностью приводят к экономии энергоресурсов.

### **Благодарность**

Работа выполнена при финансовой поддержке МОН РК. Гранты №0118РК000063 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 эквивалентных 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.