

УДК 539.26

<sup>1,2</sup>М.В. Карпець, докт. фіз.-мат. наук, проф., <sup>2</sup>О.С. Макаренко, <sup>2</sup>О.М. Мисливченко,  
<sup>1</sup>М.О. Крапівка, канд. техн. наук, <sup>3</sup>Р.І. Цебрій, канд. фіз.-мат. наук, доц., <sup>4</sup>С.Ю.  
Макаренко

<sup>1</sup>Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України,

<sup>2</sup>Національний технічний університет України «КПІ»

<sup>3</sup>Тернопільський національний економічний університет

<sup>4</sup>Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України

## **ФОРМУВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ НА ОСНОВІ $\sigma$ -ФАЗИ В ВИСОКОЕНТРОПІЙНОМУ СПЛАВІ FeCoCrNiVAl**

<sup>1,2</sup>M.V. Karpets, Dr., Prof., <sup>2</sup>O.S. Makarenko, <sup>2</sup>O.M. Myslyvchenko,

<sup>1</sup>M.O. Krapivka, Ph.D., <sup>3</sup>R.I. Tsebrii, Ph. D., Assoc. Prof., <sup>4</sup>S.Yu. Makarenko

## **THE FORMATION OF A SURFACE LAYER ON THE BASIS OF $\sigma$ -PHASE IN Fe- CoCrNiVAl HIGH-ENTROPY ALLOY**

В останнє десятиріччя інтенсивно досліджується новий клас матеріалів, які отримали назву високоентропійні сплави. В даних сплавах присутні принаймні п'ять металічних елементів еквіатомного чи близького до еквіатомного складу. Такий інтерес до них обумовлений наявністю підвищених експлуатаційних характеристик даних сплавів в широкому температурному інтервалі [1].

Для дослідження було вибрано високоентропійний сплав FeCoCrNiVAl, в якого середня концентрація електронів  $C_{vec}=5,7$  ел./ат., а ентропія змішування елементів сплаву, розрахована виходячи з формули Больцмана,  $S_{mix}=14,9$  Дж·моль<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>. Згідно [1], при такому значенні  $C_{vec}$  у вихідному стані при високих температурах кристалічна структура сплаву – однофазний ОЦК твердий розчин, а висока ентропія змішування сплаву  $S_{mix}$  буде сприяти збереженню структури при кімнатній температурі.

Високотемпературні дифрактометричні дослідження в інтервалі температур 293 – 1073 К проводили в атмосфері гелію на дифрактометрі ДРОН-УМ1 (приставка УВД-2000) у монохроматичному CuK $\alpha$ -випромінюванні. Додаткові відпали при 1073-1273 К проводили в печі СШВ – 1,25/25И1.

Кристалічна структура литого багатокомпонентного високоентропійного сплаву FeCoCrNiVAl у вихідному стані при температурі 293 К – однофазний твердий розчин з ОЦК ґраткою (період  $a = 0,2872$  нм) та коефіцієнтом текстури  $\tau=0,48$  в напрямку [100]. Крім того, в ОЦК ґратці присутнє впорядкування атомів по кристалографічним позиціям по типу B2. В інтервалі температур 473 – 873 К зміни фазового складу не спостерігається, проте фіксується збільшення періоду кристалічної ґратки матричної фази, що пов'язано з термічним розширенням. При температурі 1073 К крім фази на основі впорядкованого ОЦК твердого розчину з періодом ґратки  $a = 0,2918$  нм зафіксовано тетрагональну  $\sigma$ -фазу типу CrFe в кількості 64 мас. % з періодами кристалічної ґратки  $a = 0,8929$ ,  $c = 0,4658$  нм. Охолодження до кімнатної температури не призводить до зміни фазового складу – реєструється матрична фаза зі структурою типу B2 і  $\sigma$ -фаза. Після зняття поверхневого шару товщиною 20 мкм дифракційні максимуми від  $\sigma$ -фази не фіксуються. Повторне високотемпературне рентгенівське дослідження до температури 1073 К підтвердило формування поверхневого шару на основі  $\sigma$ -фази в досліджуваному сплаві FeCoCrNiVAl.

Подальше проведення відпалу цього зразка в вакуумі при температурах 1073 К (рис. 1а) та 1273 К протягом двох годин, також підтвердило формування на поверхні сплаву шару на основі  $\sigma$ -фази. Так, після відпалу при температурі 1073 К рентгенографічно зафіксовано 71 мас. % фази зі структурою типу B2 ( $a = 0,2888$  нм,

$\tau = 0,46_{100}$ ) та 29 мас. %  $\sigma$ -фази ( $a = 0,8845$ ,  $c = 0,4571$  нм), а після відпалу при температурі 1273 К відбувся перерозподіл фазових складових – 8 мас. % фази зі структурою типу В2 ( $a = 0,2887$  нм,  $\tau = 0,74_{100}$ ) та 92 мас. %  $\sigma$ -фази ( $a = 0,8861$ ,  $c = 0,4581$  нм).

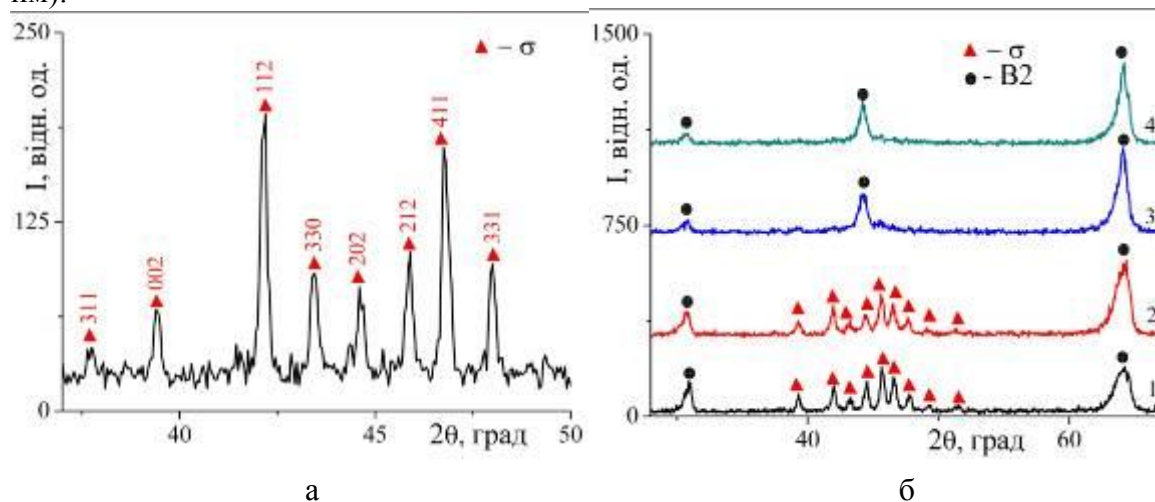


Рис. 1. Дифрактограми сплаву FeCoCrNiVAl: а) після відпалу в вакуумі при  $T = 1073$  К,  $t = 2$  год; б) після зняття поверхнього шару товщиною (мкм): 1 – 5; 2 – 10; 3 – 20; 4 – 22. Монохроматичне  $\text{Cu K}\alpha$  – випромінювання

Таблиця 1. Фазовий склад, періоди ґратки та коефіцієнт текстури фаз сплаву FeCoCrNiVAl після відпалу у вакуумі при температурі 1073 К протягом 2 год

Знято, мкм	Фазовий склад		Період ґратки, $a, c$ , нм	Коефіцієнт текстури
	Структура	Мас. %		
5	B2	27	0,2911	$(0,28)_{100}$
	$\sigma$ (CrFe)	73	0,8895 0,4597	
10	B2	33	0,2915	$(0,19)_{100}$
	$\sigma$ (CrFe)	67	0,8944	
20	B2	100	0,2923	$(0,38)_{100}$
	сліди $\sigma$ (CrFe)			
22	B2	100	0,2918	$(0,37)_{100}$

Пошаровий аналіз фазового складу поверхнього шару (5 – 22 мкм) сплаву FeCoCrNiVAl після відпалу в вакуумі при температурі 1073 К протягом 2 год приведено на рис.1б. Аналіз одержаних даних (табл. 1) свідчить про перерозподіл елементів сплаву по глибині зразка при формуванні нової фази.

Таким чином, методом високотемпературної рентгенівської дифракції було встановлено, що у високоентропійному однофазному сплаві FeCoCrNiVAl у вихідному стані ОЦК твердий розчин упорядкований по типу В2, а при температурах  $\sim 1073$  К на поверхні зразка формується шар товщиною  $\sim 20$  мкм на основі  $\sigma$ -фази. Формування на поверхні  $\sigma$ -фази відбувається як в гелієвій атмосфері високотемпературної приставки, так і в печі в атмосфері вакууму.

### Література

1.Фирстов С.А., Горбань В.Ф., Крапивка Н.А., Печковский Э.П., “Новый класс материалов – высокоэнтропийные сплавы и покрытия”. Вестник Томского ГУ, т.18, вып. 4, с.1938 – 1940, 2013.