

УДК 669.018: 539.216.2

## ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ТА МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ СПЛАВІВ Cu-Fe-Mn-Ni ІЗ ДОДАВАННЯМ Al ТА Si У ЛИТОМУ ТА ШВИДКОЗАГАРТОВАНОМУ СТАНІ

БАШЕВ В. Ф.<sup>1</sup>, *д.ф.-м.н., проф.*,  
КУШНЕРЬОВ О. І.<sup>2\*</sup>, *к.ф.-м.н., доц.*

<sup>1</sup> Кафедра експериментальної фізики та фізики металів, Дніпровський національний університет ім. О. Гончара, пр. Гагаріна, 72, 49010, Дніпро, Україна

<sup>2\*</sup> Кафедра експериментальної фізики та фізики металів, Дніпровський національний університет ім. О. Гончара, пр. Гагаріна, 72, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 776-58-86, e-mail: kushnrv@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9683-2041

**Анотація. Мета.** Дану роботу присвячено встановленню впливу складу та швидкості охолодження розплаву на мікротвердість, фазовий склад та параметри тонкої структури багатокомпонентних високоентропійних сплавів (ВЕС) системи Cu-Fe-Mn-Ni із домішками Al і Si в литому та рідкозагартованому стані. **Методика.** Литі зразки сплавів були отримані за допомогою печі Таммана із застосуванням мідної виливниці (швидкість охолодження  $\sim 10^2$  К/с). Гартування з рідкого стану (ЗРС) проводилося за відомою методикою splat-охолодження. Оцінена за товщиною фольги швидкість охолодження розплаву становила  $\sim 10^6$  К/с. Рентгеноструктурний аналіз проводився із використанням дифрактометра ДРОН-2.0. Мікротвердість вимірювалася за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3. Підбір компонентів досліджених ВЕС здійснювався, виходячи з прийнятих у літературі критеріїв компоновки та оцінки фазового складу ВЕС, оснований на обчисленні ентропії та ентальпії змішування, концентрацій валентних електронів а також різниці атомних радіусів компонентів. **Результати.** Встановлено, що сплави, загартовані з рідини мають однофазну структуру, в якій наявні прості тверді розчини із гранецентрованою кубичною (ГЦК) решіткою. Литі сплави також являють собою прості тверді розчини типу ГЦК, за виключенням сплаву CuFeMnNiSi<sub>0.5</sub>, у якому наявні також інтерметалічні фази. Значення параметрів решітки вказують на те, що в якості основи для формування твердих розчинів слід розглядати решітку  $\gamma$ -Fe, як елемента з найбільшою температурою плавлення. Показано, що збільшення рівня мікронапружень та густини дислокацій сприяють підвищенню механічних характеристик досліджених сплавів. Отримані результати також вказують на чітку залежність між величиною мікротвердості та вмістом Al та Si. Таким чином, підвищення міцності відбувається завдяки значному викривленню кристалічної решітки внаслідок відмінності атомних радіусів елементів. **Наукова новизна.** У даній роботі були вперше отримані і досліджені ВЕС системи Al-Cu-Fe-Mn-Ni-Si у литому і рідкозагартованому стані. Ці сплави не містять Co та Cr, які зазвичай використовуються у ВЕС і разом із покращенням експлуатаційних характеристик зазвичай значно збільшують їх вартість. **Практична значимість.** ВЕС характеризуються унікальною структурою та цілим комплексом виняткових експлуатаційних характеристик, таких як твердість, зносостійкість, стійкість до окислення, корозії та іонізуючих випромінювань, висока термічна стабільність та біологічна сумісність.

*Ключові слова:* високоентропійний сплав; гартування з рідкого стану; фазовий склад; структура; мікротвердість

## ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СПЛАВОВ Cu-Fe-Mn-Ni С ДОБАВЛЕНИЕМ Al ТА Si В ЛИТОМ И БЫСТРОЗАКАЛЕННОМ СОСТОЯНИИ

БАШЕВ В. Ф.<sup>1</sup>, *д.ф.-м.н., проф.*,  
КУШНЕРЕВ А. И.<sup>2\*</sup>, *к.ф.-м.н., доц.*

<sup>1</sup> Кафедра экспериментальной физики и физики металлов, Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара, пр. Гагарина, 72, 49010, Днепро, Украина

<sup>2\*</sup> Кафедра экспериментальной физики и физики металлов, Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара, пр. Гагарина, 72, 49010, Днепро, Украина, тел. +38 (056) 776-58-86, e-mail: kushnrv@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9683-2041

**Аннотация. Цель.** Настоящая работа посвящена установлению влияния состава и скорости охлаждения расплава на микротвердость, фазовый состав и параметры тонкой структуры многокомпонентных высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) системы Cu-Fe-Mn-Ni с добавками Al и Si в литом и жидкозакаленном состояниях. **Методика.** Литые образцы сплавов были получены при помощи печи Таммана с использованием медной изложницы (скорость охлаждения  $\sim 10^2$  К/с). Закалка из жидкого состояния (ЗЖС) проводилась по известной методике splat-охлаждения. Оцененная по толщине фольги скорость охлаждения расплава составляла  $\sim 10^6$  К/с. Рентгеноструктурный анализ проводился с использованием дифрактометра ДРОН-2.0. Микротвердость измерялась на микротвердомере ПМТ-3. Подбор компонентов исследованных ВЭС осуществлялся, исходя из принятых в литературе критериев компоновки и оценки фазового состава ВЭС, основанных на вычислении энтропии и энтальпии смешивания, концентраций валентных электронов а так же разницы атомных радиусов компонент. **Результаты.** Установлено, что жидкозакаленные сплавы имеют однофазную структуру, в которой

присутствуют простые твердые растворы с с гранцентрированной кубической (ГЦК) решеткой. Литые сплавы также представляют собой простые твердые растворы типа ГЦК, за исключением сплава CuFeMnNiSi<sub>0.5</sub>, в котором присутствуют также интерметаллические фазы. Значения параметров кристаллической решетки указывают на то, что основой для формирования указанных твердых растворов является решетка  $\gamma$ -Fe, как элемента с наибольшей температурой плавления. Показано, что повышение уровня микронапряжений и плотности дислокаций способствуют повышению механических характеристик исследованных сплавов. Полученные результаты также показывают четкую зависимость между величиной микротвердости и содержанием Al и Si. Таким образом, повышенные прочностные характеристики обусловлены сильным искажением кристаллической решетки вследствие различий в атомных радиусах элементов. **Научная новизна.** В данной работе были впервые получены и исследованы ВЭС системы Al-Cu-Fe-Mn-Ni-Si в литом и жидкозакаленном состоянии. Эти сплавы не содержат Co и Cr, которые обычно используются в ВЭС и вместе с улучшением эксплуатационных характеристик обычно значительно увеличивают их стоимость. **Практическая значимость.** ВЭС характеризуются уникальной структурой и целым комплексом замечательных эксплуатационных характеристик, таких как твердость, износостойкость, устойчивость к окислению, коррозии и ионизирующим излучениям, высокая термическая стабильность и биологическая совместимость.

*Ключевые слова:* высокоэнтропийный сплав; закалка из жидкого состояния; фазовый состав, структура; микротвердость

## STUDY OF STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF Cu-Fe-Mn-Ni MULTICOMPONENT ALLOYS WITH Al AND Si ADDITIONS IN THE AS-CAST AND SPLAT-QUENCHED STATE

BASHEV V. F.<sup>1</sup>, *Dr. Sc. (Phys.), Prof.*,  
KUSHNEROV O. I.<sup>2\*</sup>, *Ph.D. (Phys.), Assoc. Prof.*

<sup>1</sup> Department of Experimental Physics and Physics of Metals, Oles Honchar Dnipro National University, 72, Gagarin ave., Dnipro, 49010, Ukraine

<sup>2\*</sup> Department of Experimental Physics and Physics of Metals, Oles Honchar Dnipro National University, 72, Gagarin ave., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 776-58-86, e-mail: kushnriv@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9683-2041

**Abstract. Purpose.** This work is dedicated to establishing the effects of the composition and the melt cooling rate on microhardness, phase composition and parameters of the fine structure of multicomponent high-entropy alloys (HEA) of Cu-Fe-Mn-Ni system with Al and Si additions in the as-cast and splat-quenched state. **Methodology.** As-cast alloy samples were obtained by a laboratory Tamman furnace using a copper mold (cooling rate  $\sim 10^2$  K/s). Quenching from a liquid state was carried out by a known technique of splat-quenching (SQ). Cooling rate estimated by foil thickness was  $\sim 10^6$  K/s. The X-ray diffraction analysis was carried out with the use of the DRON-2.0 diffractometer. Microhardness was measured on the PMT-3 microhardnessmeter. Selection of components of the studied HEAs was carried out on the basis of the criteria adopted in the literature for the HEA composition based on a calculation of the entropy and enthalpy of mixing, valence electron concentrations as well as the difference between the atomic radii of the components. **Findings.** Simple solid solutions with a face-centered cubic structure are obtained in all of the splat-quenched alloys. The as-cast alloys also have a simple face-centered cubic structure, with the exception of CuFeMnNiSi<sub>0.5</sub>, in which the intermetallic phases are found. The values of lattice parameters of the investigated alloys indicate that solid solutions are formed on the base of the  $\gamma$ -Fe lattice, taking into account its higher melting temperature. The positive influence of microstrains level and dislocation density on the microhardness values of alloys are established. The obtained results clearly indicate also a strong dependence between the measured microhardness and content of Si and Al, thus improved mechanical characteristics are obviously ensured by the strong distortion of the crystal lattice due to the differences in atomic radii of elements. **Originality.** At present work were first obtained and studied HEAs of Al-Cu-Fe-Mn-Ni-Si system in the as-cast and splat-quenched state. These compositions are free of Co and Cr, which are usually used in HEA and favor an increase in their operating characteristics but substantially increase the alloy cost. **Practical value.** The HEAs possess many attractive properties, such as high hardness, outstanding wear resistance, irradiation resistance, excellent high-temperature strength, good thermal stability, biocompatibility and corrosion resistance.

*Keywords:* high-entropy alloy; splat-quenching; phase composition; structure; microhardness

### Introduction

In 2004, a new alloy concept, “multi-principal-element alloys” (MPEA’s) or “high-entropy alloys” (HEA’s) was proposed and investigated through increased experimental studies [5]. Such alloys usually contain from 5 to 13 major elements in equiatomic or near equiatomic concentrations (5 to 35%). Due to the high mixing entropy, multicomponent alloys typically consist of simple solid solutions with a BCC or FCC lattices. At the same time, through a purposeful selection

of the HEA components, an alloy comprised of the simple solid solution with a high plasticity and very hard and brittle intermetallic compounds (intermetallic phase,  $\sigma$ -phase, Laves phase) can be prepared. Also, the study results concerning high-entropy metallic glasses and alloys with shape memory are published [3,9]. HEA’s are characterized by the unique structure and properties, such as high hardness, outstanding wear resistance, irradiation resistance, excellent high-temperature strength, good thermal stability, and corrosion resistance [1-5].

This paper is devoted to the investigation of structure and properties of multicomponent alloys of Cu-Fe-Mn-Ni system with Al and Si additions. In order to establish the influence of the composition and the cooling rate of the melt on the microhardness and phase composition, the as-cast and splat-quenched alloys were investigated.

### Experimental Details

The samples of Al- and Si- modified Cu-Fe-Mn-Ni high-entropy alloys were prepared by a laboratory Tamman furnace in the flow of argon and poured into a copper mold (cooling rate of  $\sim 10^2 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

The quenching from the molten state (splat-quenching, SQ) was performed with using the well-known technique of melt spinning, i.e., spreading of melt droplets on the internal surface of a rapidly rotating copper cylinder. The rate of cooling as estimated from the thickness of the obtained foils was  $\sim 10^5\text{--}10^6 \text{ K/s}$ . The XRD studies were carried out with using a DRON-2.0 X-ray diffractometer in Cu  $K\alpha$  monochromatized radiation. The microhardness was measured with a PMT-3 microhardness-meter at a load of 200g.

### Results and Discussion

High-entropy alloys usually characterizing by the entropy of mixing  $\Delta S_{mix}$  and mixing enthalpy  $\Delta H_{mix}$ . But in order to describe the phase composition of HEA's, some empirical criteria were proposed, namely, an atomic-size difference which is described by the parameter  $\delta$ , valence electron concentration  $VEC$ , and the thermodynamic  $\Omega$  parameter, correlates the melting point, entropy of mixing, and the enthalpy of mixing. The definitions of these parameters were considered in many papers [5]. But these empirical criteria for prediction of phase composition were developed and tested with using as-cast HEA's, which often contain non-equilibrium phases, so they are not always conclusive [1,4].

Recently it has been established that the difference in atomic sizes affects the topological instability of atomic packing [13]. It was suggested that atoms with the maximum and minimum radii play a crucial role in determining the stability of the packing in high-entropy alloys. The solid angles of packing for the atoms with the smallest  $\omega_S$  and highest  $\omega_L$  sizes were chosen [13] to describe the effects of the atomic packing in HEAs quantitatively.

$$\omega_S = 1 - \frac{\sqrt{(r_S + \bar{r})^2 - \bar{r}^2}}{(r_S + \bar{r})^2}, \quad (1)$$

$$\omega_L = 1 - \frac{\sqrt{(r_L + \bar{r})^2 - \bar{r}^2}}{(r_L + \bar{r})^2}. \quad (2)$$

Here  $r_S$  and  $r_L$  are the atomic radii of smallest and largest atoms respectively,  $\bar{r} = \sum_{i=1}^n c_i r_i$ ,  $r_i$  – the atomic radius,  $c_i$  – atomic fraction of the  $i$ -th component.

Then, the normalized parameter of packing state was defined as the ratio between the solid angles for the atoms with smallest and largest sizes.

$$\gamma = \frac{\omega_S}{\omega_L}. \quad (3)$$

As pointed out in [13], the Hume–Rothery rule of 15% of the atomic size difference in binary alloys corresponds to a critical value of packing misfitting of  $\gamma = 1.167$ . The critical value of  $\gamma = 1.175$  can distinguish the simple solid solution alloys and alloys with intermetallic compounds [13].

Using the data from [7,11], the set of above-mentioned parameters ( $\Delta S_{mix}$ ,  $\Delta H_{mix}$ ,  $\delta$ ,  $VEC$ ,  $\Omega$ ,  $\alpha$ ,  $\gamma$ ) are calculated (Tab.2).

It should be noted that, in accordance with the calculated values of  $\Delta S_{mix}$  the majority of the alloys studied in this paper formally must be attributed to medium entropy alloys [5], however, taking into account the evaluation of the minimum entropy of mixing for the HEA's  $\Delta S_{mix} \geq 11 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ , given in [6], many researchers consider such alloys as high-entropy [12].

Table 1

Nominal chemical compositions of investigated HEA's, at. %

Alloy	Al	Cu	Fe	Mn	Ni	Si
CuFeMnNi	-	25	25	25	25	-
Al <sub>0.44</sub> CuFeMnNi	10	22.5	22.5	22.5	22.5	-
CuFeMnNiSi <sub>0.25</sub>	-	23.53	23.53	23.53	23.53	5.88
CuFeMnNiSi <sub>0.5</sub>	-	22.22	22.22	22.22	22.22	11.12

Table 2

Thermodynamic, electronic, and atomic-size parameters of investigated HEA's

Alloy	$\Delta H_{mix}$ , kJ/mol	$\Delta S_{mix}$ , J/(mol·K)	$\delta$	VEC	$\Omega$	$\gamma$
CuFeMnNi	2.75	11.52	3.68	9.0	6.72	1.104
Al <sub>0.44</sub> CuFeMnNi	-2.54	13.07	4.72	8.4	7.89	1.158
CuFeMnNiSi <sub>0.25</sub>	-5.26	12.7	4.11	8.71	3.88	1.174
CuFeMnNiSi <sub>0.5</sub>	-11.57	13.14	4.42	8.44	1.48	1.175

The phase composition of the investigated alloys, crystal lattice parameters, and the fine structure parameters (size of coherently scattering domains and microstrains) (Tab.3) were determined from the XRD patterns (Fig. 1, 2). The dislocation density  $\rho$  was obtained from the profile of the first diffraction peak.

From the results of analysis of the XRD patterns, it is apparent that all the as-cast samples, except the CuFeMnNiSi<sub>0.5</sub> one, have similar reflections of simple FCC solid solutions.

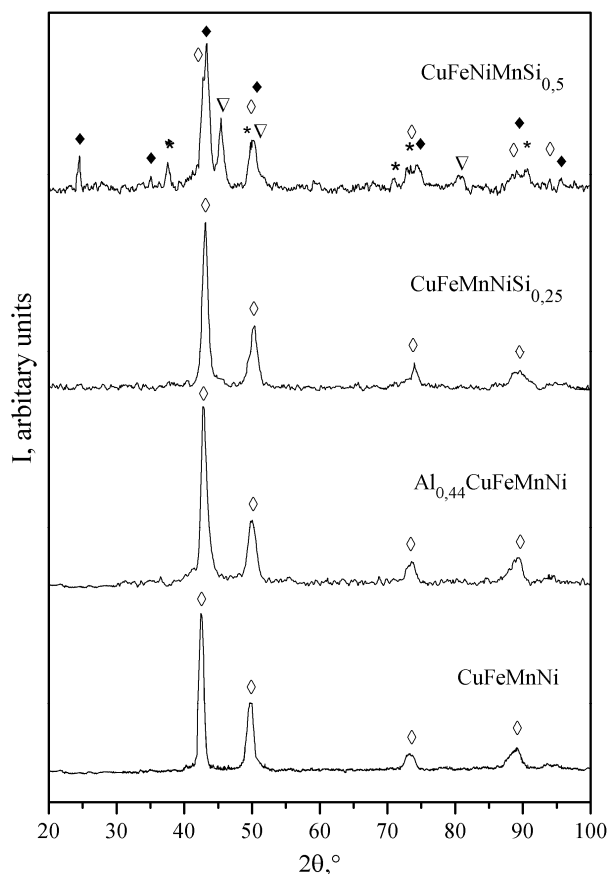


Fig.1. XRD patterns of as-cast HEAs of Al-Cu-Fe-Mn-Ni-Si alloy system:  $\diamond$ -FCC1,  $\blacklozenge$ - FCC2,  $\nabla$ -FeSi,  $*$ -FeSi<sub>2</sub>.

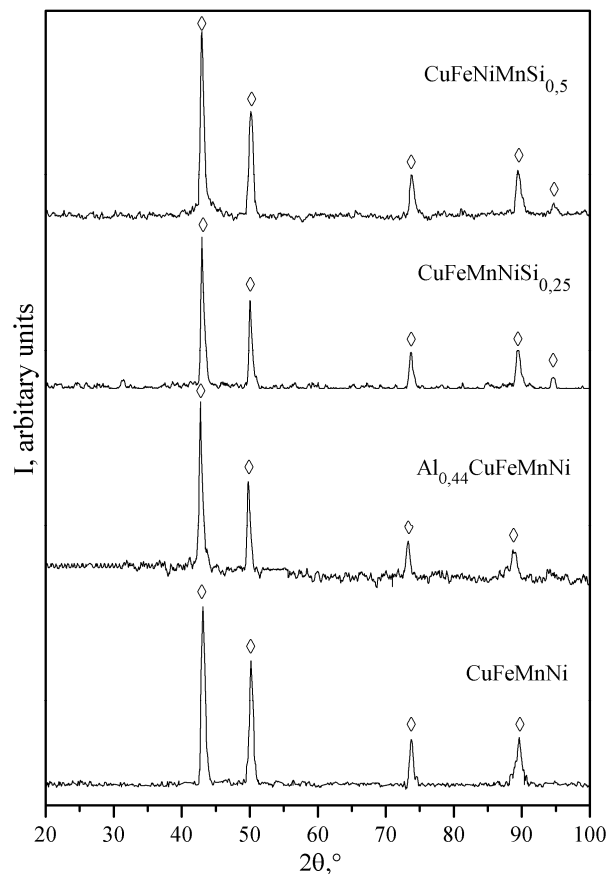


Fig.2. XRD patterns of splat-quenched HEAs of Al-Cu-Fe-Mn-Ni-Si alloy system:  $\diamond$ -FCC.

Table 3

Phase composition, size of coherently scattering domains ( $L$ ), degree of distortion of the crystal lattice ( $\Delta a/a$ ), dislocation density ( $\rho$ ) and microhardness ( $H_\mu$ ) of investigated alloys

Alloy	Phase composition	$L$ , nm.	$L$ , nm	$\rho$ , cm <sup>-2</sup>	$\Delta a/a$	$H_\mu$ , MPa
As-cast Al <sub>0.44</sub> CuFeMnNi	FCC ( $a=0.3645$ nm)	14±2	5.9·10 <sup>-3</sup>	2.6·10 <sup>12</sup>	5.9·10 <sup>-3</sup>	2000±200
SQ foil Al <sub>0.44</sub> CuFeMnNi	FCC ( $a=0.3619$ nm)	30±3	2.4·10 <sup>-3</sup>	6.3·10 <sup>11</sup>	2.4·10 <sup>-3</sup>	1600±100
As-cast CuFeMnNiSi <sub>0.5</sub>	FCC ( $a=0.3660$ nm)+ FCC ( $a=0.3620$ nm)+ FeSi + FeSi <sub>2</sub>	18±2 18±2	2.3·10 <sup>-3</sup>	1.6·10 <sup>12</sup>	2.3·10 <sup>-3</sup>	3300±200
SQ foil CuFeMnNiSi <sub>0.5</sub>	FCC ( $a=0.3646$ nm)	30±3	2.0·10 <sup>-3</sup>	6·10 <sup>11</sup>	2.0·10 <sup>-3</sup>	2200±200
As-cast CuFeMnNiSi <sub>0.25</sub>	FCC ( $a=0.3642$ nm)	16±2	4.5·10 <sup>-3</sup>	2.2·10 <sup>12</sup>	4.5·10 <sup>-3</sup>	3000±200
SQ foil CuFeMnNiSi <sub>0.25</sub>	FCC ( $a=0.3634$ nm)	32±3	2.5·10 <sup>-3</sup>	5.5·10 <sup>11</sup>	2.5·10 <sup>-3</sup>	2500±200
As-cast CuFeMnNi	FCC ( $a=0.3641$ nm)	20±2	4.4·10 <sup>-3</sup>	1.35·10 <sup>12</sup>	4.4·10 <sup>-3</sup>	1400±100
SQ foil CuFeMnNi	FCC ( $a=0.3632$ nm)	31±3	2.3·10 <sup>-3</sup>	5.6·10 <sup>11</sup>	2.3·10 <sup>-3</sup>	1000±100

This is consistent with the results of [12] for the CuFeMnNi alloy. The CuFeMnNiSi<sub>0.5</sub> alloy has a complicated phase composition, there two simple FCC solid solutions together with intermetallic FeSi and FeSi<sub>2</sub> phases are presented. This result is not unexpected since from Tab. 3 it is seen that  $\Delta H_{mix}$  for this alloy has a large negative value favoring the formation of intermetallic compounds. The parameter  $\gamma$  also nearly reaches the critical value of 1.175. At the same time,

nominal chemical compositions of all investigated alloys were chosen so that their  $VEC$  values were favored to the formation of an FCC phase. These factors put together leads to the formation of a mixture of FCC and intermetallic phases in CuFeMnNiSi<sub>0.5</sub> alloy only. It should be noted that the study of the fine structure of as-cast HEA's by the methods of high-resolution electron microscopy usually shows the presence of nanosized intermetallic precipitates [8].

Meanwhile the XRD patterns of SQ alloys do not have superlattice reflections and consequently, SQ HEA's contain only disordered FCC phases. In our opinion, the high cooling rate during the formation of SQ foil should prevent it from non-equilibrium phase decomposition and hinder the appearance of structures and phases typical for as-cast and equilibrium states.

Taking into account the values of lattice parameters of the investigated alloys, one can suggest that the solid solutions are formed on the base of the  $\gamma$ -Fe lattice ( $a = 0.3572$  nm [10]), in view of its higher melting temperature.

High microhardness values of Cu-Fe-Mn-Ni system alloys with Al and Si additions can be explained by the presence of the dissimilar atoms of elements with different size, electronic structure and thermodynamic properties in the crystal lattice. This leads to a significant distortion ( $\Delta a/a$ ) of the crystal lattice. Consequently the hardness of the alloys increases. As seen from Tab. 3, microhardness of the SQ alloys is lower than that of the as-cast alloys. This result is not surprising, since the microstructure and the phase composition of the as-cast alloy after decomposition are in a more equilibrium state, with the presence of hard and brittle intermetallic compounds, while highly non-

equilibrium SQ alloys yield a lower level of microstrains and dislocation density. The obtained results clearly indicate also a strong dependence between the measured microhardness and content of Si and Al additions, with a positive trend of microhardness as the Si content increases.

### Conclusions

Based on the study of the Al-Co-Cr-Fe-Mn-Ni-Si-V HEAs, produced in the as-cast and splat-quenched state, the following conclusions can be drawn:

We found that all the as-cast alloys except the CuFeMnNiSi<sub>0.5</sub> have simple single-phase FCC structure while CuFeMnNiSi<sub>0.5</sub> alloy has a complicated phase composition, there two simple FCC solid solutions together with intermetallic FeSi and FeSi<sub>2</sub> phases are presented. All the splat-quenched HEA's contain only disordered FCC phases. With the increase of cooling rate, the level of microstrains, dislocation density, and microhardness of Al-Cu-Fe-Mn-Ni-Si HEA's decreases. The Al and Si additions have a positive effect on the microhardness of Cu-Fe-Mn-Ni system HEAs.

### REFERENCES

1. Bashev V. F. and Kushnerov O.I. Structure and properties of cast and splat-quenched high-entropy Al-Cu-Fe-Ni-Si alloys// The Physics of Metals and Metallography. –2017, –V. 118, No. 1,–P. 39–47.
2. Bashev V. F. and Kushnerov O.I. Structure and properties of high entropy CoCrCuFeNiSn<sub>x</sub> alloys // The Physics of Metals and Metallography. –2014, –V. 115, No. 7,–P. 692–696.
3. Firstov G.S., Kosorukova T.A., Koval Y.N. and Odnosum V.V. High entropy shape memory alloys // Materials Today: Proceedings. – 2015. – V. 2. – P. S499–S503.
4. Gao M. C., Carney C.S., Doğan Ö. N., Jablonksi P. D., Hawk J. A. and Alman D. E. Design of refractory high-entropy alloys// JOM. – 2015. – V. 67, No. 11. –P. 2653-2669.
5. Gao M. C., Yeh J.-W., Liaw P. K. and Zhang Y. High-entropy alloys. Fundamentals and Applications.– Springer International Publishing, 2016. – 516 p.
6. Guo S. and Liu C.T. Phase stability in high entropy alloys: Formation of solid-solution phase or amorphous phase// Progress in Natural Science: Materials International.–2011.–V. 21, Iss. 6, –P. 433–446.
7. Li W.K., Zhou G.D. and Mak T.C.W. Advanced Structural Inorganic Chemistry. –New York: Oxford University Press, 2008. – 688 p.
8. Nadutov V.M., Makarenko S. Yu. and Volosevich P. Yu. Study of structure and distribution of chemical elements in cast high-entropy alloys of Al<sub>x</sub>FeNiCoCuCr system // Metallofiz. Noveishie Tekhnol. – 2014. – V. 36, No. 10. – P. 1327–1341.
9. Qi T., Li Y., Takeuchi A., Xie G. and Miao H. Soft magnetic Fe<sub>25</sub>Co<sub>25</sub>Ni<sub>25</sub>(B,Si)<sub>25</sub> high entropy bulk metallic glasses // Intermetallics. – 2015. –V. 66. – P. 8–12.
10. Ruhl R.C. and Cohen M. Splat quenching of iron-carbon alloys// Trans Met Soc AIME. -1969. -V. 245, № 2. -P. 241–251.
11. Takeuchi A. and Inoue A. Classification of bulk metallic glasses by atomic size difference, heat of mixing and period of constituent elements and its application to characterization of the main alloying element// Materials Transactions.–2005. –V. 46 – P. 2817-2829.
12. Veronesi P., Colombini E., Rosa R., Leonelli C. and Rosi F. Microwave assisted synthesis of Si-modified Mn<sub>25</sub>Fe<sub>x</sub>Ni<sub>25</sub>Cu(50-x) high entropy alloys // Materials Letters. – 2016. – V. 162. – P. 277–280.
13. Wang Z., Wang Z., Huang Y., Yang Y., Wang J., and Liu C.T. Atomic-size effect and solid solubility of multicomponent alloys // Scripta Materialia. – 2015. – V. 94. – P. 28–31.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., наук, проф. Лаухінім Д.В., д.т.н., проф. Сухомлиним Г.Д. (Україна)