

УДК 669.018

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-Cu-Fe-Ni-Si

БАШЕВ В. Ф.¹, *д.ф.-м.н., проф.*,
КУШНЕРЕВ А. И.^{2*}, *к.ф.-м.н., доц.*

¹ Кафедра экспериментальной физики и физики металлов, Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара, пр. Гагарина, 72, 49010, Днепропетровск, Украина

^{2*} Кафедра экспериментальной физики и физики металлов, Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара, пр. Гагарина, 72, 49010, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (097) 493-59-38, 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 высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) системы Al-Cu-Fe-Ni-Si в литом и жидкозакаленном состоянии. *Методика.* Литые образцы сплавов были получены 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 $\sim 10^5$ - 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, а так же разницы атомных радиусов компонентов. *Результаты.* Установлено, что изученные сплавы системы Al-Cu-Fe-Ni-Si представляют собой многофазные ВЭС, в структуре которых присутствуют неупорядоченные твердые растворы с решетками типа ОЦК и ГЦК. Подтверждено, что ведущую роль в определении типа твердого раствора, формирующегося в изученных ВЭС, играет элемент с наивысшей температурой плавления. Установлено, что увеличение в структуре исследованных ВЭС объемной доли твердого раствора типа ОЦК приводит к возрастанию микротвердости. Показано положительное влияние микронапряжений и плотности дислокаций на уровень механических характеристик исследованных сплавов. Установлено, что литые ВЭС системы Al-Cu-Fe-Ni-Si характеризуются более высокими значениями микротвердости, чем ЗЖС сплавы, что обусловлено их более равновесным многофазным состоянием. *Научная новизна.* В данной работе были впервые получены и исследованы ВЭС системы Al-Cu-Fe-Ni-Si в литом и жидкозакаленном состоянии. *Практическая значимость.* Сплавы данной системы характеризуются отсутствием дорогостоящих компонентов, таких как Co, V, Mo, Cr, обычно применяемых для изготовления ВЭС, и в то же время их характеристики не уступают таковым для более дорогих сплавов. Исследование тонких пленок ВЭС, полученных при помощи закалки из жидкого состояния, также представляет большой практический интерес, поскольку одним из перспективных применений ВЭС являются именно тонкопленочные покрытия.

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

ВПЛИВ ШВИДКОСТІ ОХОЛОДЖЕННЯ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ СПЛАВІВ СИСТЕМИ Al-Cu-Fe-Ni-Si

БАШЕВ В. Ф.¹, *д.ф.-м.н., проф.*,
КУШНЕРЬОВ О. І.^{2*}, *к.ф.-м.н., доц.*

¹ Кафедра експериментальної фізики та фізики металів, Дніпропетровський національний університет ім. О. Гончара, пр. Гагаріна, 72, 49010, Дніпропетровськ, Україна

^{2*} Кафедра експериментальної фізики та фізики металів, Дніпропетровський національний університет ім. О. Гончара, пр. Гагаріна, 72, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (097) 493-59-38, e-mail: kushnrv@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9683-2041

Анотація. *Мета.* Дану роботу присвячено встановленню впливу складу та швидкості охолодження розплаву на микротвердість, фазовий склад та параметри тонкої структури високоентропійних сплавів (ВЕС) системи Al-Cu-Fe-Ni-Si в литому та рідкозагартованому стані. *Методика.* Литі зразки сплавів були отримані 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 $\sim 10^5$ - 10^6 К/с. Рентгеноструктурний аналіз проводився із використанням дифрактометра ДРОН-2.0. Микротвердість вимірювалася за допомогою микротвердоміра 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, а також різниці атомних радіусів компонентів. *Результати.* Встановлено, що досліджені сплави системи Al-Cu-Fe-Ni-Si являють собою багатофазні ВЕС, в

структурі яких присутні неупорядковані тверді розчини с решітками типу ОЦК и ГЦК. Підтверджено, що провідну роль у визначенні типу твердого розчину, що формується у досліджених ВЕС, відіграє елемент із найвищою температурою плавлення. Встановлено, що збільшення в структурі досліджених ВЕС об'ємної долі твердого розчину типу ОЦК призводить до збільшення мікротвердості. Показано позитивний вплив мікронапружень та густини дислокацій на рівень механічних характеристик досліджених сплавів. Встановлено, що литі ВЕС системи Al-Cu-Fe-Ni-Si характеризуються більш високими значеннями мікротвердості, ніж ЗРС сплави, що вочевидь зумовлено їх більш рівноважним багатофазним станом. **Наукова новизна.** У даній роботі були вперше отримані і досліджені ВЕС системи Al-Cu-Fe-Ni-Si у литому і рідкозагартованому стані. **Практична значимість.** Сплави даної системи характеризуються відсутністю компонентів із високою вартістю, таких як Co, V, Mo, Cr, що зазвичай застосовуються для виготовлення ВЕС, і в той же час їх характеристики не поступаються таким для сплавів з більш високою вартістю. Дослідження тонких шпівок ВЕС, отриманих шляхом гартування з рідкого стану, також становить великий практичний інтерес, оскільки одним з перспективних застосувань ВЕС є саме тонкошпівкові покриття.

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

EFFECT OF COOLING RATE ON THE PROPERTIES OF MULTICOMPONENT ALLOYS OF Al-Cu-Fe-Ni-Si SYSTEM

BASHEV V. F.¹, *Dr. Sc. (Phys), Prof.*,
KUSHNEROV O. I.^{2*}, *Cand. Sc. (Phys), Doc.*

¹ Department of Experimental Physics and Physics of Metals, Oles Honchar Dnipropetrovsk National University, 72, Gagarin ave., Dnipropetrovsk 49010, Ukraine

^{2*} Department of Experimental Physics and Physics of Metals, Oles Honchar Dnipropetrovsk National University, 72, Gagarin ave., Dnipropetrovsk 49010, Ukraine, tel. +38 (097) 493-59-38, e-mail: kushnrv@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9683-2041

Abstract. Purpose. This work is dedicated to establish the effects of the composition and the melt cooling rate on microhardness, phase composition and parameters of the fine structure of high-entropy alloys (HEA) of Al-Cu-Fe-Ni-Si system in the as-cast and rapid quenched state. **Methodology.** As-cast alloy samples were obtained 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 $\sim 10^5$ - 10^6 K/s. The X-ray diffraction analysis was carried out with 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 calculation of the entropy and enthalpy of mixing, as well as the difference between the atomic radii of the components. **Findings.** It was found that the studied alloys of Al-Cu-Fe-Ni-Si is a multiphase HEAs, with the structure consisting of disordered solid solutions of BCC and FCC. Confirmed that the leading role in determining the type of solid solution formed in the studied HEAs plays an element with the highest melting point. It was found that an increase in the structure of the investigated HEAs volume fraction of the solid solution of BCC type leads to an increase in microhardness. Confirmed the positive effect of microstrains and dislocation density to the level of mechanical properties of the studied HEAs. It was found that the as-cast HEAs of Al-Cu-Fe-Ni-Si system are characterized by higher values of microhardness than SQ alloys, which is obviously due to their more multi-phase equilibrium state. **Originality.** At present work were first obtained and studied HEAs of Al-Cu-Fe-Ni-Si system in the as-cast and splat-quenched state. **Practical value.** The alloys of this system are characterized by the absence of expensive components, such as Co, V, Mo, Cr, usually used for the HEAs production while their characteristics are not inferior to those of the more expensive alloys. The study of thin films obtained by using quenching from the liquid state is also of great practical interest, since one of the promising applications of HEAs are thin film coatings.

Keywords: high-entropy alloy, splat-quenching, phase composition, structure, microhardness.

Введение

В течение длительного времени развития металлургии, как одного из наиболее важных направлений практической и научной деятельности человека, основой большинства созданных и особенно применяемых в технике сплавов является один, реже два или три металла. Соответственно огромное количество опубликованных до настоящего времени теоретических и экспериментальных работ ограничиваются изучением сплавов, основанных на одном – двух металлах, выступающих в качестве растворителя, с добавлением к ним небольшого количества легирующих примесей. Однако вследствие возрастающих потребностей техники в улучшенных конструкционных и функциональных металлических материалах непрерывно создаются новые технологии и на их основе

разрабатываются перспективные легированные стали и сплавы. При этом постепенно увеличивается число легирующих элементов, применяемых для повышения эксплуатационных характеристик сплавов..

Чуть более 10 лет назад были опубликованы первые работы, посвященные созданию и комплексному исследованию нового класса материалов, так называемых высокоэнтропийных многокомпонентных сплавов (ВЭС), включающих в себя обычно от 5 до 13 основных элементов, в эквимолярных или близких к эквимолярным концентрациях (от 5 до 35%) [13]. Подбором количества компонентов и соотношения их концентраций в сплаве создается повышенное значение энтропии смешения, которое сохраняется не только в расплавленном состоянии, но и после затвердевания. Вследствие высокой энтропии в структуре многокомпонентных сплавов при кристаллизации обычно образуются простые твердые

растворы замещения с ОЦК или ГЦК решетками. В то же время, путем целенаправленного подбора компонентов высокоэнтропийного сплава в его структуре можно получить комбинации простого твердого раствора, характеризующегося высокой пластичностью, и интерметаллических соединений (σ – фаза, фазы Лавеса), имеющих очень высокую твердость [6,13]. Опубликованы также работы, посвященные получению и исследованию высокоэнтропийных металлических стекол [3,13]. ВЭС характеризуются уникальной структурой и целым комплексом замечательных эксплуатационных характеристик, таких как твердость, износостойкость, устойчивость к окислению, коррозии и ионизирующим излучениям, высокая термическая стабильность [4,16,17,23,25]. Таким образом, ВЭС являются перспективными материалами для применений в электронике, атомной энергетике, транспортном машиностроении, ракетно-космической и многих других отраслях [4,13,14,18].

Цель

Настоящая работа посвящена изучению структуры и свойств нового семейства многокомпонентных сплавов системы Al-Cu-Fe-Ni-Si. С целью установления влияния величины состава и скорости охлаждения расплава на микротвердость, фазовый состав и параметры тонкой структуры исследовались сплавы в литом и жидкозакаленном состоянии.

Методика

Литые образцы сплавов системы Al-Cu-Fe-Ni-Si 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 путем размазывания капли расплава по внутренней поверхности быстро вращающегося медного цилиндра. Оцененная по толщине фольги скорость охлаждения расплава составляла $\sim 10^5$ - 10^6 К/с.

Рентгеноструктурный анализ (РСА) проводился с использованием дифрактометра ДРОН-2.0 в монохроматизированном медном излучении. Микротвердость измерялась на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 50г.

Подбор компонентов исследованных высокоэнтропийных сплавов осуществлялся, исходя из следующих соображений.

В соответствии с уравнением Гиббса имеем

$$\Delta G_{mix} = \Delta H_{mix} - T \Delta S_{mix} \quad (1)$$

Здесь ΔG_{mix} - потенциал Гиббса, ΔH_{mix} - энтальпия смешения, ΔS_{mix} - энтропия смешения, которая определяется из уравнения

$$\Delta S_{mix} = -R \sum_{i=1}^n c_i \ln c_i \quad (2)$$

c_i - атомная доля элемента с номером i , R - универсальная газовая постоянная.

Повышенное значение энтропии в соответствии с уравнением Гиббса приводит к снижению свободной энергии сплава, что и обуславливает устойчивость твердого раствора. Для сплава из n компонентов максимальное значение энтропии, очевидно, будет при их смешивании в равных атомных долях. В [12,13]

предложена следующая классификация: сплавы для которых $\Delta S_{mix} \leq IR$ отнесены к низкоэнтропийным, сплавы для которых $IR \leq \Delta S_{mix} \leq 1,5R$ - к среднеэнтропийным, и сплавы с $\Delta S_{mix} \geq 1,5R$ являются высокоэнтропийными. В высокоэнтропийных сплавах ΔS_{mix} обычно составляет 13-19 Дж/(моль·К). Однако, для того, чтобы в структуре сплава отсутствовали сложные интерметаллические соединения и аморфные фазы, необходимо также выполнение дополнительных условий. В соответствии с [2,24], фазовый состав высокоэнтропийного сплава можно предсказать, используя параметр Ω :

$$\Omega = \frac{T_m \Delta S_{mix}}{|\Delta H_{mix}|} \quad (3)$$

где T_m - средняя температура плавления сплава из n компонентов

$$T_m = \sum_{i=1}^n c_i (T_m)_i \quad (4)$$

$$\Delta H_{mix} = \sum_{i=1, j \neq i}^n \omega_{ij} c_i c_j \quad (5)$$

где $\omega_{ij} = 4\Delta H_{mix}^{AB} \cdot \Delta H_{mix}^{AB}$ - энтальпия смешения для бинарного сплава элементов А и В в жидком состоянии.

Компоненты сплава также не должны сильно отличаться друг от друга по атомным радиусам, что можно охарактеризовать следующим параметром:

$$\delta = 100 \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i \left(1 - \frac{r_i}{\bar{r}}\right)^2} \quad (6)$$

$$\bar{r} = \sum_{i=1}^n c_i r_i \quad (7)$$

r_i - атомный радиус элемента с номером i .

Согласно [2], в структуре высокоэнтропийных сплавов, для которых $\Omega \geq 1,1$ и $\delta \leq 6,6$, вместо сложных интерметаллических соединений и аморфных фаз образуются твердые растворы замещения (простые и упорядоченные). При этом полного отсутствия упорядочения следует ожидать при значениях энтальпии смешения -15 кДж/моль $< \Delta H_{mix} < 5$ кДж/моль и $\delta \leq 4,6$ [14,21,22].

Тип кристаллической решетки образующихся твердых растворов связан с расчетной концентрацией валентных электронов в сплаве (VEC) [11], определяемой по формуле

$$VEC = \sum_{i=1}^n c_i (VEC)_i \quad (8)$$

где $(VEC)_i$ - концентрация валентных электронов (с учетом d -электронов) для элемента с номером i . Согласно [10], при $VEC > 8$ в сплаве наблюдается формирование твердого раствора с решеткой типа ГЦК, при $VEC < 6,87$ - типа ОЦК, и при $6,87 < VEC < 8$ следует ожидать формирования двухфазных твердых растворов на основе ОЦК и ГЦК решеток.

В некоторых работах предлагается также метод прогнозирования структуры ВЭС, основанный на оценке разницы значений электроотрицательности и концентраций валентных электронов для компонентов сплава. Этот метод основан на использовании правил Юм-Розери, согласно

которым для образования бинарного твердого раствора замещения растворитель и растворяемый элемент должны характеризоваться близкими значениями валентности и электроотрицательности, а так же минимальной разницей в размерах атома. Однако, основываясь на результатах [7,8,9,12,19], можно сказать, что в общем случае для ВЭС такой метод не позволяет с достаточной степенью точности предсказать фазовый состав полученных сплавов.

Значения величин, необходимых для вычисления параметров, приведенных выше, а также результаты вычислений приведены соответственно в табл.1, табл.2 и табл.3.

Таблица 1

Атомные радиусы элементов, концентрации валентных электронов [1] и шихтовые концентрации элементов в сплавах системы Al-Cu-Fe-Ni-Si/ Atomic radii of elements, valence electron concentrations [1] and nominal chemical compositions of Al-Cu-Fe-Ni-Si system alloys

	Al	Cu	Fe	Ni	Si
Атомный радиус, нм.	0,143	0,128	0,126	0,125	0,118
VEC	3	11	8	10	4
Шихтовая концентрация в сплаве Al _{0,25} CuFeNiSi _{0,25} , ат. %	7,14	28,57	28,57	28,57	7,14
Шихтовая концентрация в сплаве Al _{0,5} CuFeNiSi _{0,25} , ат. %	13,33	26,67	26,67	26,67	6,66
Шихтовая концентрация в сплаве Al _{0,7} CuFeNi, ат. %	18,91	27,03	27,03	27,03	0
Шихтовая концентрация в сплаве CuFeNiSi _{0,5} , ат. %	0	28,57	28,57	28,57	14,29

Таблица 2

Значения ΔH_{mix}^{AB} (кДж/моль), вычисленные с использованием модели Miedema [5]/ Values of ΔH_{mix}^{AB} (kJ/mol), calculated by Miedema's model [5]

Элемент	Cu	Fe	Ni	Si
Al	-10	-11	-22	-19
Cu		13	4	-19
Fe			-2	-35
Ni				-40

Таблица 3

Значения ΔH_{mix} , ΔS_{mix} , δ , VEC и Ω для сплавов системы Al-Cu-Fe-Ni-Si/ Values of ΔH_{mix} , ΔS_{mix} , δ , VEC и Ω for Al-Cu-Fe-Ni-Si system alloys

Сплав	ΔH_{mix} , кДж/моль	ΔS_{mix} , Дж/(моль·К)	δ	VEC	Ω
Al _{0,25} CuFeNiSi _{0,25}	-6,18	12,06	4,00	8,79	3,09
Al _{0,5} CuFeNiSi _{0,25}	-8,36	12,52	4,95	8,4	2,31
Al _{0,7} CuFeNi	-3,18	11,43	5,11	8,41	5,39
CuFeNiSi _{0,5}	-10,45	11,23	2,51	8,86	1,76

Следует заметить, что в соответствии с вычисленными значениями ΔS_{mix} большинство сплавов, изученных в данной работе, формально следует отнести к среднеэнтропийным, однако, принимая во внимание оценку минимального значения энтропии для ВЭС

$\Delta S_{mix} \geq 11$ Дж/(моль·К), приведенную в [22], многие исследователи относят такие материалы к высокоэнтропийным сплавам [8,21].

Результаты

По дифрактограммам (рис.1,2) устанавливался фазовый состав, оценивались периоды кристаллических решеток и параметры тонкой структуры (области когерентного рассеяния (ОКР) и микронапряжения). Плотность дислокаций (ρ) определялась по профилю первого дифракционного максимума (табл.4).

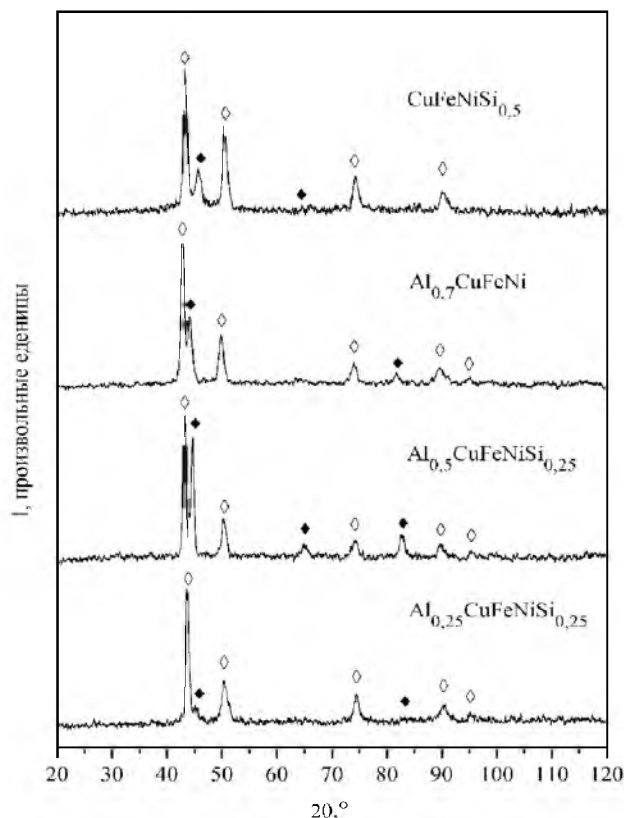


Рис.1. Дифрактограммы литых образцов многокомпонентных сплавов системы Al-Cu-Fe-Ni-Si: \diamond – ГЦК; \blacklozenge – ОЦК/ XRD patterns of the as-cast Al-Cu-Fe-Ni-Si system multicomponent alloys: \diamond -FCC, \blacklozenge -BCC

Анализ дифрактограмм позволил установить, что в структуре изученных сплавов системы Al-Cu-Fe-Ni-Si присутствуют неупорядоченные твердые растворы с решетками типа ОЦК и ГЦК. В то же время, принимая во внимание значения параметров VEC, приведенных в табл.3, во всех изученных сплавах следовало ожидать исключительно формирования структур типа ГЦК. По нашему мнению, подобное расхождение можно объяснить следующим образом:

1. Эмпирические критерии, предложенные в [10] были получены на основе статистической обработки данных для ограниченного числа исследованных на то время ВЭС, и требуют некоторого численного уточнения в связи с появлением значительного количества новых сплавов;
2. В многофазных ВЭС ниже точки кристаллизации каждая из фаз будет характеризоваться своим значением ΔS_{mix} , Ω и VEC [11,12], что во многих случаях

значительно снижает точность прогноза, основанного на значениях, вычисленных для сплава в жидком состоянии.

Подобные отклонения от прогнозируемого типа структуры были отмечены в нескольких работах [19,20], особенно при значении параметра *VEC* вблизи граничного. Однако, основываясь на оценке интенсивности максимумов, соответствующих структурам типа ОЦК и ГЦК на рис.1 и рис. 2, можно говорить о том, что критерий прогнозирования типа структуры, основанный на оценке значения *VEC* позволяет лишь качественно оценить изменение фазового состава ВЭС: с ростом значения *VEC* доля ОЦК фазы уменьшается. Таким образом, критерий нуждается лишь в некотором количественном уточнении.

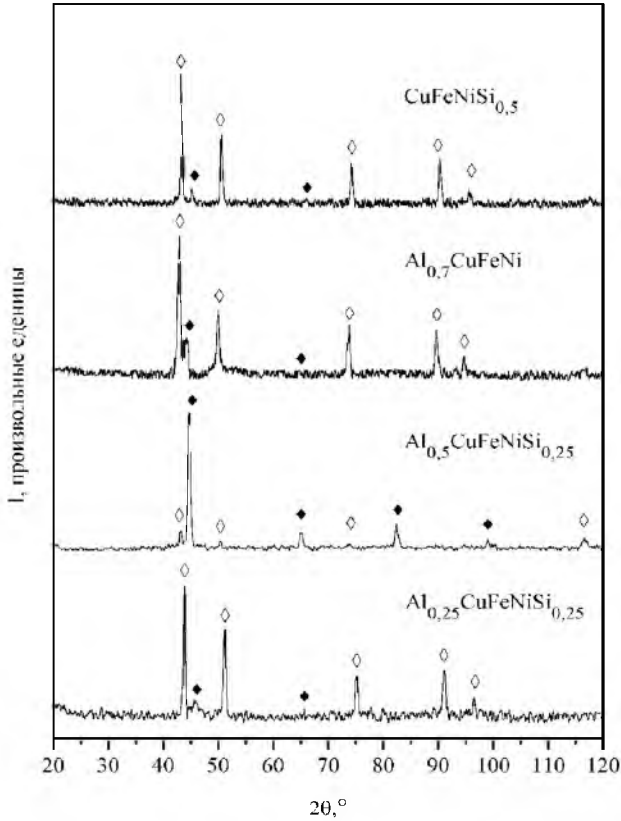


Рис.2. Дифрактограммы ЗЖС образцов многокомпонентных сплавов системы Al-Cu-Fe-Ni-Si: \diamond – ГЦК; \blacklozenge – ОЦК./ XRD patterns of the splat-quenched Al-Cu-Fe-Ni-Si system multicomponent alloys: \diamond -FCC, \blacklozenge -BCC

Оцененные параметры решетки позволяют предположить, что формирование твердых растворов происходит на базе компонентов с наивысшими температурами плавления: структура типа ГЦК формируется на основе никеля ($a=0,3524$ нм), а твердых растворов типа ОЦК – на основе железа ($a=0,2866$ нм). Высокую твердость можно объяснить наличием в кристаллической решетке твердого раствора замещения разнородных атомов элементов с разными размерами, электронным строением и термодинамическими свойствами. Все это приводит к существенному искажению ($\Delta a/a$) кристаллической решетки, и, как следствие, к ее значительному упрочнению. Особенно большие искажения вносят атомы алюминия и кремния, как наиболее отличающиеся по размерам от остальных. С увеличением концентрации этих атомов увеличиваются и искажения решетки, что способствует переходу от

структуры типа ГЦК, с наивысшей плотностью упаковки атомов, к менее плотноупакованной структуре типа ОЦК. Поскольку ОЦК-фазы обладают высокой твердостью и хрупкостью, в отличие от мягких и пластичных ГЦК-фаз, результирующая микротвердость сплавов увеличивается (табл.5).

Таблица 4

Фазовый состав, размеры ОКР (L), степень искажения решетки ($\Delta a/a$), микротвердость (H_μ) и плотность дислокаций (ρ) изученных сплавов/ Phase composition, coherent scattering areas (L), the degree of distortion of the crystal lattice ($\Delta a/a$) for the investigated alloys

Сплав	Фазовый состав	L, нм.	$\Delta a/a$	ρ , см ⁻²
Al _{0,25} CuFeNiSi _{0,25}	ГЦК ($a=0,3604$ нм) +	17±2	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{12}$
	ОЦК ($a=0,2844$ нм)	16±2	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{12}$
Al _{0,25} CuFeNiSi _{0,25} ЗЖС	ГЦК ($a=0,3602$ нм)+	30±2	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^{11}$
	ОЦК ($a=0,2844$ нм)	15±2	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{12}$
Al _{0,5} CuFeNiSi _{0,25}	ГЦК ($a=0,3626$ нм)+	24±2	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{12}$
	ОЦК ($a=0,2867$ нм)	15±2	$3,8 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{12}$
Al _{0,5} CuFeNiSi _{0,25} ЗЖС	ГЦК ($a=0,3619$ нм)+	23±2	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{12}$
	ОЦК ($a=0,2863$ нм)	36±2	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$4,3 \cdot 10^{11}$
Al _{0,7} CuFeNi	ГЦК ($a=0,3622$ нм)+	19±4	$4,4 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{12}$
	ОЦК ($a=0,2891$ нм)	13±2	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{12}$
Al _{0,7} CuFeNi ЗЖС	ГЦК ($a=0,3622$ нм)+	28±2	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$6,9 \cdot 10^{11}$
	ОЦК ($a=0,2879$ нм)	18±2		$1,7 \cdot 10^{12}$
CuFeNiSi _{0,5}	ГЦК ($a=0,3635$ нм)+	18±2	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{12}$
	ОЦК ($a=0,2801$ нм)	15±2		$2,6 \cdot 10^{12}$
CuFeNiSi _{0,5} ЗЖС	ГЦК ($a=0,3586$ нм)+	27±2	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$7,6 \cdot 10^{11}$
	ОЦК ($a=0,2801$ нм)	21±2		$1,3 \cdot 10^{12}$

Таблица 5

Микротвердость (H_μ) изученных сплавов/ Microhardness (H_μ) for the investigated alloys

Сплав	H_μ , МПа
Al _{0,25} CuFeNiSi _{0,25}	2800±200
Al _{0,25} CuFeNiSi _{0,25} , ЗЖС	2500±200
Al _{0,5} CuFeNiSi _{0,25}	4800±300
Al _{0,5} CuFeNiSi _{0,25} , ЗЖС	4300±300
Al _{0,7} CuFeNi	2800±150
Al _{0,7} CuFeNi, ЗЖС	2400±200
CuFeNiSi _{0,5}	3700±200
CuFeNiSi _{0,5} , ЗЖС	2700±200

Измерение микротвердости ЗЖС сплавов системы Al-Cu-Fe-Ni-Si показало, что значения H_μ для них несколько ниже, чем для соответствующих сплавов в литом состоянии (табл. 5). Этот результат не является неожиданным, поскольку, принимая во внимание результаты [15], можно сделать вывод о том, что в литом сплаве в процессе ликвации происходит образование микроструктуры с типичной морфологией дендритов и междендритных сочленений и их последующий распад. В то же время в структуре ЗЖС сплава обычно преобладают ультрамелкие зерна, и только последующий отжиг может приводить к фазовому распаду сплава. Таким образом, микроструктура и фазовый состав испытывавшего распад литого сплава существенно отличается своим более равновесным многофазным состоянием, обеспечивающим большие значения твердости, прочности и упругих свойств.

Научная новизна и практическая значимость

В данной работе были впервые получены и исследованы ВЭС системы Al-Cu-Fe-Ni-Si. Сплавы данной системы характеризуются отсутствием дорогостоящих компонентов, таких как Co, V, Mo, Cr, обычно применяемых для изготовления ВЭС, в то же время их характеристики не уступают таковым для более дорогих

сплавов [13,14,18]. Исследование тонких пленок ВЭС, полученных при помощи закалки из жидкого состояния, также представляет большой научный и практический интерес, поскольку одним из перспективных применений ВЭС являются именно тонкопленочные покрытия.

Выводы

1. Установлено, что изученные сплавы системы Al-Cu-Fe-Ni-Si представляют собой двухфазные ВЭС, в структуре которых присутствуют неупорядоченные твердые растворы с решетками типа ОЦК и ГЦК.
2. Подтверждено, что ведущую роль в определении типа твердого раствора, формирующегося в изученных

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Li, W.K. Advanced Structural Inorganic Chemistry/W.K. Li, G.D. Zhou, T.C.W. Mak. –New York: Oxford University Press, 2008. –688 p.
2. Zhang, Y. Alloy Design and Properties Optimization of High-Entropy Alloys/ Y. Zhang, X.Yang, P.K. Liaw//JOM.–2012. –V.64, Iss. 7. –P. 830–838.
3. Takeuchi, A. Alloy Designs of High-Entropy Crystalline and Bulk Glassy Alloys by Evaluating Mixing Enthalpy and Delta Parameter for Quinary to Decimal Equi-Atomic Alloys/ A. Takeuchi, K. Amiya, T. Wada, K. Yubuta, W. Zhang, A. Makino // Materials Transactions.–2014. –V. 55, № 1. –P. 165-170.
4. Yeh, J. W. Alloy Design Strategies and Future Trends in High-Entropy Alloys/J.W. Yeh // JOM.– 2013.– V. 65. – P. 1759–1771.
5. Takeuchi, 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/A. Takeuchi, A. Inoue// Materials Transactions.–2005. –V. 46, № 12. –P. 2817-2829.
6. Tsai, M. H. Criterion for Sigma Phase Formation in Cr- and V-Containing High-Entropy Alloys / M. H. Tsai, K.Y. Tsai, C. W. Tsai, C. Lee, C. C. Juan, J. W. Yeh// Materials Research Letters.–2013. –V.1, Iss. 4, –P. 207-212.
7. Senkov, O.V. Effect of aluminum on the microstructure and properties of two refractory high-entropy alloys/ O.N. Senkov, S.V. Senkova, C. Woodward// Acta Materialia. –2014. –V. 68. –P. 214-228.
8. Salishchev, G. A. Effect of Mn and V on structure and mechanical properties of high-entropy alloys based on CoCrFeNi system/ G.A. Salishchev, M.A. Tikhonovskiy, D.G. Shaysultanov, N.D. Stepanov, A.V. Kuznetsov, I.V. Kolodiy, A.S. Tortika, O.N. Senkov //Journal of Alloys and Compounds. –2014. –V. 591.–P.11-21.
9. Dong, Y. Effects of electro-negativity on the stability of topologically close-packed phase in high entropy alloys / Y. Dong, Y. Lu, L. Jiang, T. Wang, T. Li // Intermetallics. –2014. –V.52. –P. 105-109.
10. Guo, S. Effect of valence electron concentration on stability of fcc or bcc phase in high entropy alloys /S. Guo, C. Ng, J.Lu, C.T.Liu// Journal of Applied Physics.–2011.–V. 109, Iss. 10, – P. 103505-1–103505-5.
11. Poletti, M. G. Electronic and thermodynamic criteria for the occurrence of high entropy alloys in metallic systems / M.G. Poletti, L. Battezzati // Acta Materialia. –2014. –V. 75.–P. 297-306.
12. Miracle, D. B. Exploration and development of high entropy alloys for structural applications/ D. B. Miracle, J. D.

Статья рекомендована к публикации: д-ром.техн.наук, проф. Г. Д. Сухомлиным (Украина) и д-ром.техн.наук, проф. Д. В. Лаухиным (Украина)

Поступила в редколлегию 21.01.2015

Принята к печати 24.03.2015

высокоэнтропийных сплавах, играет элемент с наивысшей температурой плавления.

3. Установлено, что увеличение в структуре исследованных ВЭС объемной доли твердого раствора типа ОЦК приводит к возрастанию микротвердости.

4. Показано положительное влияние микронапряжений и плотности дислокаций на уровень механических характеристик исследованных сплавов.

5. Установлено, что литые ВЭС системы Al-Cu-Fe-Ni-Si характеризуются более высокими значениями микротвердости, чем ЗЖС сплавы, что очевидно обусловлено их более равновесным многофазным состоянием.

Miller, O. N. Senkov, C. Woodward, M. D. Uchic, J. Tiley // Entropy.–2014. –V.16, –P. 494-525.

13. Murty, B.S., Yeh J.W., Ranganathan S. High-Entropy Alloys/ B.S. Murty, J.W. Yeh, S. Ranganathan.– London: Butterworth-Heinemann, 2014.–218p.

14. Tsai, M. H. High-Entropy Alloys: A Critical Review/ M.H.Tsai, J.W. Yeh // Materials Research Letters.–2014.–V.2, Iss.3. –P.107-123.

15. Ivchenko, M. V. High-entropy equiatomic AlCrFeCoNiCu alloy: Hypotheses and experimental data/ M. V. Ivchenko, V. G. Pushin, N. Wanderka// Technical Physics. –2014, –V. 59, Iss. 2, –P 211-223.

16. Egami, T. Irradiation Resistance of Multicomponent Alloys/ T. Egami, W. Guo, P.D. Rack, T. Nagase // Metallurgical and Materials Transactions A.– 2014, – V. 45, – P. 180–183.

17. Wang, J. Microstructure and magnetic properties of mechanically alloyed FeSiBAlNi (Nb) high entropy alloys/ J. Wang, Z. Zheng, J. Xu, Y. Wang // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. –2014, –V. 355, –P. 58-64.

18. Zhang, Y. Microstructures and Properties of High-entropy Alloys/ Y. Zhang, T.T. Zuo, Z. Tang, M.C. Gao, K.A. Dahmen, P.K. Liaw, Z.P. Lu // Progress in Materials Science. –2014. –V. 61.–P. 1-93.

19. Singh, A.K. On the formation of disordered solid solutions in multi-component alloys/A.K. Singh, A. Subramaniam// Journal of Alloys and Compounds.–2014. –V.587. –P. 113-119.

20. Sriharitha, R. Phase formation in mechanically alloyed Alx-CoCrCuFeNi (x = 0.45, 1, 2.5, 5) high entropy alloys/ R. Sriharitha, B. S. Murty, R. S. Kottada// Intermetallics. –2013. – V.32. –P. 119-126.

21. Wang, Z. Phase Selection in High-Entropy Alloys: From Nonequilibrium to Equilibrium/ Z. Wang, S. Guo, C.T. Liu// JOM.–2014. –V.66, Iss. 10. –P. 1966-1972.

22. Guo, S. Phase stability in high entropy alloys: Formation of solid-solution phase or amorphous phase/S. Guo, C.T.Liu// Progress in Natural Science: Materials International.–2011.–V. 21, Iss. 6, –P. 433-446.

23. Tsai, M.H. Physical Properties of High Entropy Alloys/M.H. Tsai// Entropy. –2013, –15, P. 5338 – 5345.

24. Zhang, Y. Solid-Solution Phase Formation Rules for Multi-component Alloys/ Y. Zhang, Y.J. Zhou, J.P.Lin, G.L. Chen, P.C. Liaw//Advanced Engineering Materials.–2008. –V.10, Iss. 6. –P. 534–538.

25. Bashev, V. F. Structure and Properties of High Entropy CoCrCuFeNiSn_x Alloys/ V. F. Bashev, O. I. Kushnerov // The Physics of Metals and Metallography. –2014, –V. 115, No. 7, – P. 692–696.