

УДК 621.745:
669.8

A.Z. Issagulov
Sv.S. Kvon
V.Yu. Kulikov
Sh.N. Tulegenova

Аннотация

Summary

Влияние технологических режимов плавки на механические свойства квази-высокоэнтропийных сплавов

Influence of technological modes for smelting quasi-high entropine alloys on their mechanical properties

А.З. Исагулов, С.С. Квон, В.Ю. Куликов, Ш.Н. Тулегенова
(Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова», г. Караганда, Респ. Казахстан)

В работе представлены результаты исследования некоторых свойств квази-высокоэнтропийных сплавов на базе системы Cr-Co-Ni-Mn-Fe (сплав Кантора), выплавленных с частичным использованием ферросплавов. Применение ферросплавов в шихте использовали с целью упрощения и удешевления технологии выплавки. С использованием чистых кобальта и никеля, а также феррохрома, феррониобия и ферромарганца были получены опытные образцы сплавов, которые имеют по сравнению со сплавом Кантора более высокую износостойкость, твердость, предел прочности. У опытных образцов достаточно низкая жидкотекучесть, однако при увеличении температуры выпуска расплава из печи до 1700°C она повышается на ~25%.

Ключевые слова

Высокоэнтропийный сплав, состав, жидкотекучесть, прочность, износостойкость, твердость, плавка, шихта.

The paper presents the results of a study of some properties of quasi-high entropy alloys (QHEA) based on the Cr-Co-Ni-Mn-Fe system (Cantor's alloy), smelted with partial use of ferroalloys. The use of ferroalloys in the charge was used to simplify and reduce the cost of smelting technology. Using pure cobalt and nickel, as well as ferrochrome, ferroniobium and ferromanganese, prototypes of alloys were obtained that have higher wear resistance, hardness, and tensile strength compared to Cantor's alloy. The prototypes have a fairly low fluidity, however, when the melt release temperature from the furnace is increased to 1700°C, the fluidity increases by ~25%.

Key words

High-entropy alloy, composition, fluidity, strength, wear resistance, hardness, remelting, charge.

Одно из современных направлений развития металлургии – получение высокоэнтропийных сплавов (ВЭС). Используется несколько способов изготовления из них заготовок: литье, холодная прокатка с последующим отжигом, механическое легирование и др. [1...3]. Наиболее

изученным и распространенным является пятикомпонентный ВЭС – сплав Кантора, включающий Co, Cr, Fe, Ni, Mn. В результате хорошего сочетания пластичности и прочности его используют в различных отраслях промышленности. Исследователями изучается роль легирования этого сплава

бором, ванадием, алюминием, кремнием, ниобием, азотом и углеродом (1...5% ат.) [4, 5].

При производстве ВЭС шихтовыми материалами, как правило, являются чистые металлы. Это значительно повышает стоимость сплавов и усложняет технологию их получения, что обусловлено высокой температурой плавления чистых металлов.

Одним из возможных способов упрощения технологии плавки ВЭС может быть частичная замена чистых металлов ферросплавами. В этом случае уместно говорить о получении квазивысокоэнтропийных сплавов (КВЭС).

Цель работы – исследование частичной замены чистых металлов в шихте ферросплавами при плавке ВЭС системы Co-Cr-Fe-Ni-Mn. В состав шихты входили технически чистые железо и кобальт, ферромарганец ФМ85, феррониобий ФН665 и феррохром ФХ70 (таблицы 1 и 2).

Шихтовые материалы измельчали в шаровой мельнице до фракции в 200 мкм и плавил в алундовых тиглях в индукционной печи марки УИП-16-10-0,005(Fe)-УХЛ4. После окончания плавки алундовые тигли с расплавом извлекали из печи и охлаждали на воздухе. Химсостав сплава в слитках контролировали на спектрометрах NITON XL2-100G (США) и СПАС-05 (Россия).

Исследовали образцы двух сплавов – композиций (образцы 2 и 3), состав которых приведен в табл. 3. В качестве образца сравнения использовали сплав Кантора.

Видно, что все образцы по составу близки к сплаву Кантора, что доказывает возможность получения ВЭС с частичной

Таблица 1

Материал	Химсостав, %						
	Cr	Co	Ni	Mn	Nb	Fe	C
FeCr	70	–	–	–	–	30	–
Co	–	99,8	–	–	–	–	0,2
Ni	–	–	90	–	–	10	–
FeMn	–	–	–	85	–	10	5
FeNb	–	–	–	–	65	35	–

Таблица 2

Материал	Масса, г	Доля элементов в сплаве от шихтовых материалов в расчете на 100 г					
		Cr	Co	Ni	Mn	Nb	Fe
FeCr	22,7	15,9	–	–	–	–	6,8
Co	16,1	–	16	–	–	–	–
Ni	17,8	–	–	16	–	–	–
FeMn	18,8	–	–	–	16	–	2,8
FeNb	24,6	–	–	–	–	16	8,6
Итого	100	15,9	16	16	16	16	18,2

Таблица 3

Элементы	Содержание, %		
	Сплав Кантора	Образец 2	Образец 3
Cr	20,2	20	17
Co	19,6	20	17
Ni	19,8	20	17
Mn	20,6	–	16
Nb	–	20	16
Fe	19,8	18	15
C	–	2	2

заменой чистых металлов ферросплавами. Присутствие углерода в опытных сплавах связано с его содержанием в ферросплавах. Так как полученные образцы не в полной мере соответствовали ВЭС, но созданы на основе энтропийного подхода, логично называть их КВЭС.

Непосредственно после плавки образцы имели ярко выраженное зернистое строение, кроме того наблюдалась значительная пористость. Очевидно, что от этих образцов не следует ожидать высоких механических свойств. С целью гомогенизации структуры и устранения

Таблица 4

Номер образца	Температура заливки, °С	Твердость, HV	Предел прочности при сжатии, МПа	Износостойкость (остаточная масса после испытаний), %
1	1650	244	562	72,8
	1675	246	562	74,6
	1700	247	565	76,8
2	1650	371	627	82,9
	1675	379	644	86,3
	1700	382	649	88,4
3	1650	437	706	93,1
	1675	444	712	93,9
	1700	446	715	94,0

дефектов опытные образцы были подвергнуты переплаву, после которого внешние дефекты в них отсутствовали. Их использовали для определения твердости, предела прочности при сжатии и износостойкости.

Часть расплавов разливали при 1650...1700°С, в том числе и спиральные пробы на жидкотекучесть. Влияние температуры разлива на механические свойства сплава представлено в табл. 4.

Видно, что присутствие ниобия положительно сказывается на исследуемых свойствах. Во всех опытных образцах твердость, предел прочности на сжатие и износостойкость на 15...20% выше, чем у сплава Кантора.

При использовании феррониобия более высокая температура плавления оказывает положительное влияние на усвояемость и однородность химсостава сплава. Поэтому для образцов 2 и 3 рекомендуемая температура заливки составляет ~1675°С. Для образца 1 температура 1650°С является вполне удовлетворительной, так как выше нее значительного увеличения механических свойств не наблюдали. Надо отметить, что все опытные сплавы имели низкую жидкотекучесть, обусловленную наличием хрома и ниобия, которые образуют прочные оксидные пленки. Для увеличения жидкотекучести целесообразно повышение температуры выпуска из печи до 1675...1700°С, либо корректировка состава.

Таким образом, KBЭС системы Cr-Co-Ni-Mn-Nb-Fe-C обладают повышенной (на 15...20%) по сравнению со сплавом Кантора износостойкостью, твердостью и прочностью, но имеют низкую жидкотекучесть. При этом увеличение температуры

выпуска расплава из печи на 50°С повышает жидкотекучесть на ~25%.

Исследования проведены в рамках реализации программы Комитета науки МОН Республики Казахстан BR21882240 «Создание квазивысокоэнтропийного сплава с использованием казахстанского сырья и технологии производства прецизионных деталей на его основе».

**СПИСОК
ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Пат. 2790708 RU С1, 28.02.2023. Высокоэнтропийный сплав и способ его деформационно-термической обработки / А.О. Семенов, Е.А. Поволяева, С.В. Жеребцов, Н.Д. Степанов. Заявка № 2022110576 от 19.04.2022.
2. Yeh J.W., Chen Y.L., Lin S.J., Chen S.K. High Entropy Alloys – A New Era of Exploitation // Mat. Sci. 2007. Forum 560. P. 1–9.
3. Ivchenko M.V., Pushin V.G., Uksusnikov A.N. et al. Specific Features of Cast HighEntropy AlCrFeCoNiCu Alloys Produced by Ultrarapid Quenching from the Melt // The Physics of Metals and Metallography, 2013, Vol. 114, № 6. P. 503–513.
4. Громов В.Е., Коновалов С.В., Чен С. и др. Вектор развития улучшения свойств ВЭС Кантора // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2023. № 2 (44). С. 3-12.
5. Panchenko M.Y., Melnikov E.V., Gurtova D.Y., Astafurova E.G. Effect of carbon alloying on hydrogen embrittlement of a Cantor alloy // Letters on Materials. 2022. V. 12. №4. P. 282–286.