

# Литейное Производство 1.2 2025

FOUNDRY TECHNOLOGY & EQUIPMENT



## НАШЕМУ ЖУРНАЛУ 95 ЛЕТ!

СОДЕРЖАНИЕ • CONTENTS

РЕДАКЦИОННО-  
ИЗДАТЕЛЬСКИЙ  
СОВЕТ

ПИРАЙНЕН В.Ю.  
Главный редактор журнала

АФОНАСКИН А.В.

БАСТ Ю.

БУДАНОВ Е.Н.

ДЕЕВ В.Б.

ИВАНОВА В.А.

ИЛЛАРИОНОВ И.Е.

КЕЧИН В.А.

КИДАЛОВ Н.А.

КОНОВАЛОВ С.В.

КОРОТЧЕНКО А.Ю.

ЛЕУШИН И.О.

МАРУКОВИЧ Е.И.

НИКИТИН К.В.

НУРАЛИЕВ Ф.А.

ПАНОВ А.Г.

ПАНФИЛОВ Э.В.

ПОПОВ А.

СУЛИЦИН А.В.

ШАТУЛЬСКИЙ А.А.

2 От Главного редактора

Литейные сплавы. Отливки

3 Марукович Е.И., Стеценко В.Ю., Стеценко А.В. Кристаллизация белых чугунов  
Marukovich E.I., Stetsenko V.Y., Stetsenko A.V. Crystallization of white cast iron

8 Болдырев Д.А. Об интенсификации плавки чугуна с применением природного известняка • Boldyrev D.A. On intensification of cast iron smelting using natural limestone

11 Худокормов Д.А., Черненко А.В., Налимов А.Ю., Осипов В.А. Использование рафинирующего модификатора MR20 при плавке чугуна • Khudokormov D.A., Chernenko A.V., Nalimov A.Yu., Osipov V.A. Use of MR20 refining modifier for cast iron

15 Миненко Г.Н. Влияние электрического поля на процессы модифицирование стали 20Л

• Minenko G.N. Influence of electric field on steel modification processes 20L

19 Куликов В.Ю., Байсеитова Е.А., Квон С.С., Ковалев П.В., Тулегенова Ш.Н. Исследование образцов, выплавленных с использованием брикетов из стружки стали ШХ15

• Kulikov V.Yu., Baiseitova E.A., Kvon S.S., Kovalyov P.V., Tulegenova Sh.N. Examination of samples smelted using steel chip briquettes ShKh15

24 Верин А.С. Карбиды в  $Ni_3Al$ , полученные по методу ОНК и ДНК

• Verin A.S. Carbides in  $Ni_3Al$  obtained by CDS and DDS methods

27 Трапезников Н.В., Рожков М.Ю., Шумков А.А., Ёлохов Р.Т. Особенности структурных превращений в жаропрочных сплавах, обработанных РЗМ • Trapeznikov N.V., Rozhkov M.Yu., Shumkov A.A., Elokhov R.T. Features of structural transformations in heat-resistant alloys treated with Rare Earth metals

34 Абильдина А.Р., Квон С.С., Куликов В.Ю., Окишев К.Ю. Влияние молибдена на некоторые свойства квазивысокоэнтропийного сплава системы Co-Cr-Fe-Ni-Mn-Nb  
• Abildina A.R., Kvon S.S., Kulikov V.Yu., Okishev K.Yu. Influence of Mo on some properties of a quasi-high-entropy alloy of the Co-Cr-Fe-Ni-Mn-Nb system

39 Левин Д.О., Сулицин А.В., Брусницын С.В., Усов Д.А. Исследование влияния содержания никеля на структуру и свойства литой латуни • Levin D.O., Sulitsin A.V., Brusnitsyn S.V., Usov D.A. Investigation of nickel content on structure and properties of cast brass

Специальные способы литья

43 Знаменский Л.Г., Захаров Н.А., Синицын Е.А. Применение отечественных муллитизированных материалов в точном литье

• Znamensky L.G., Zakharov N.A., Sinitsyn E.A. The use of domestic mulitized materials in precision casting

49 Сон В.Ю., Журавлев Я.А., Фурман И.Е., Фурман Е.Л., Овчинникова А.О., Болтрушко Д.С. Проектирование литейной оснастки для ЛВМ методом аддитивных технологий

• Son V.Yu., Zhuravljov Ya.A., Furman I.E., Furman E.L., Ovchinnikova A.O., Boltrushko D.S. Construction of foundry equipment for investment casting using additive technology method

Из истории литейного производства

53 К 95-летию выхода первого номера журнала «Литейное дело»

56 К 185-летию со дня рождения Д.К. Чернова

УДК 621.74:  
622.272.2

A.R. Abildina,  
S.S. Kvon,  
V.Yu. Kulikov,  
K.Yu. Okishev

Аннотация

Summary

## Влияние молибдена на некоторые свойства квазивысокоэнтропийного сплава системы Co-Cr-Fe-Ni-Mn-Nb

### Influence of Mo on some properties of a quasi-high-entropy alloy of the Co-Cr-Fe-Ni-Mn-Nb system

**А.Р. Абильдина, С.С. Квон, В.Ю. Куликов**  
(Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, Респ. Казахстан),  
**К.Ю. Окишев** (УрФУ, г. Екатеринбург)

Исследовали влияние содержания молибдена на структуру, твердость и жидкотекучесть квазивысокоэнтропийных сплавов (КВЭС) системы Co-Cr-Fe-Ni-Mn-Nb. Для оценки жидкотекучести использовали метод спиральной пробы. Результаты показали, что добавление Mo в концентрациях 5...15% значительно повышает твердость сплавов, изменяет характер структуры и несколько снижает жидкотекучесть расплава. При содержании 5...10% Mo жидкотекучесть изменяется незначительно, но при концентрации 15% Mo жидкотекучесть падает на ~12%. Полученные данные необходимо учитывать при получении отливок сложной конфигурации из данного КВЭС.

**Ключевые слова:**

Квазивысокоэнтропийный сплав (КВЭС), жидкотекучесть, молибден, твердость, структура.

The effect of molybdenum content on the structure, hardness, and fluidity of quasi-high-entropy alloys (QHEA) of the Co-Cr-Fe-Ni-Mn-Nb system was investigated in this paper. The fluidity was estimated using the spiral sample method. The results showed that adding molybdenum in concentrations of 5-15% significantly increases the hardness of the alloys, changes the nature of the structure, and slightly reduces the fluidity of the melt. With a content of 5-10% Mo, the fluidity changes insignificantly, but with a concentration of 15% Mo, the fluidity drops by about 12%. The data obtained must be taken into account when producing castings of complex configuration from this QHEA.

**Key words:**

Quasi-high-entropy alloy, fluidity, molybdenum, hardness, structure.

**Таблица 1**

Элемент, %	Mn	Nb	Fe	Cr	Ni	Co	Mo	C	Si	P	S
FeMn80C05	75,1	–	25,2	–	–	–	–	0,1	1,85	до 0,3	до 0,03
ФХ001А	–	–	32,04	68,2	–	–	–	0,01	0,82	до 0,02	до 0,02
ФН660	–	62	35,5	–	–	–	–	0,3	1,8	0,04	0,05
Ni H-1y	–	–	–	–	99,95	–	–	0,01	0,002	0,001	0,001
Со К1Ау	0,03	–	0,2	–	–	99,3	–	0,02	–	0,003	0,004
ФМо60	–	–	38,8	–	–	–	60,2	0,08	0,8	0,05	0,01

Начиная с 2000-х годов, одним из перспективных трендов создания новых сплавов является создание многокомпонентных систем по принципу высокой энтропии, так называемых высокоэнтропийных сплавов (ВЭС).

На сегодняшний день одним из наиболее изученных ВЭС является пятикомпонентный сплав Кантора Co-Cr-Fe-Ni-Mn [1], который обладает достаточно высокими механическими свойствами: предел прочности – 491 МПа, предел текучести – 292 МПа, при этом относительное удлинение может достигать 50%, что представляет уникальное сочетание прочности и пластичности, которое невозможно достичь в классических сплавах.

Процесс получения ВЭС

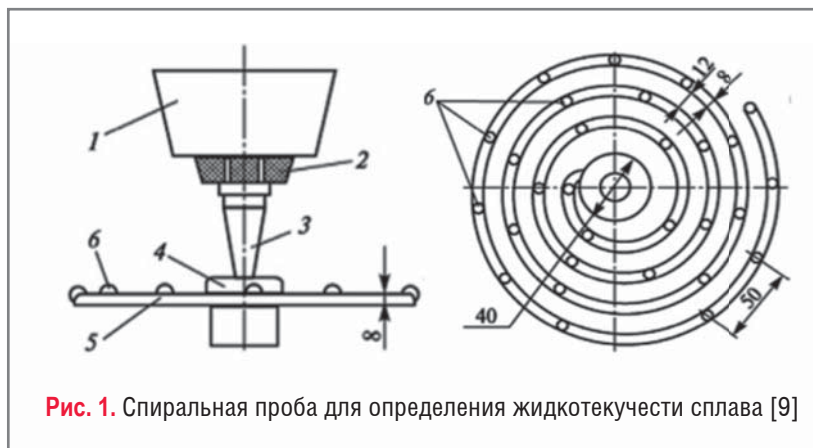
является дорогим и сложным из-за особенностей выплавки шихтовых материалов, в качестве которых используются чистые металлы. Снизить себестоимость ВЭС возможно путем упрощения технологии получения или удешевления шихтовых материалов. В этом вопросе наиболее перспективным направлением является создание так называемых квази-высокоэнтропийных сплавов (КВЭС) [2...4].

В ранее проведенных исследованиях [4, 5] было показано, что возможно получение КВЭС с частичным использованием ферросплавов в шихте, причем дополнительное введение других элементов, в частности Nb, приводит к увеличению прочности и износостойкости по сравнению с аналогичными

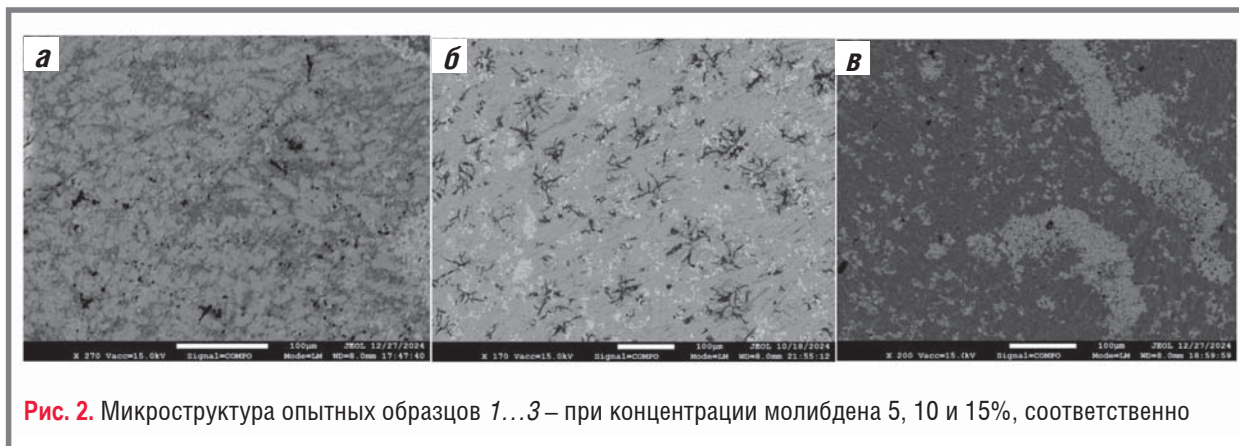
параметрами сплава Кантора. В работе [6] было исследовано влияние технологических режимов на жидкотекучесть КВЭС системы Co-Cr-Fe-Ni-Mn-Nb. Было показано, что введение Nb снижает жидкотекучесть сплава, что связано, по-видимому, с образованием новых фаз.

В работах [7, 8] исследуется влияние молибдена в качестве дополнительного элемента в сплаве Кантора. Молибден имеет большой атомный радиус, что приводит к значительному искажению решетки и увеличению ее твердости. Он препятствует движению дислокаций, что делает материал более устойчивым к пластической деформации и повышает его прочностные характеристики.

Однако, это может сопровождаться снижением жидкотекучести при литье, поскольку высокопрочные материалы имеют тенденцию к меньшей текучести в расплавленном состоянии. Для обеспечения оптимальной жидкотекучести и высокого качества отливок необходимо сбалансированно подходить к составу сплава, контролировать количество



**Рис. 1.** Спиральная проба для определения жидкотекучести сплава [9]



**Рис. 2.** Микроструктура опытных образцов 1...3 – при концентрации молибдена 5, 10 и 15%, соответственно

молибдена и учитывать его влияние на вязкость и фазовую структуру расплава.

Цель работы – исследование влияния различного содержания молибдена (5, 10 и 15%) на твердость, структуру и жидкотекучесть КВЭС системы Co-Cr-Fe-Ni-Mn-Nb.

В состав шихты входили ферромарганец марки FeMn80C05, феррохром марки ФК005, никель катодный марки Н1, металлический кобальт марки К1Ау, феррониобий марки ФН660 и ферромolibден марки ФМо60. При помощи анализаторов NITON XL2-100G (США) и СПАС 05 (Россия) был проведен химический анализ состава компонентов шихты (**табл. 1**).

Состав шихты рассчитывался таким образом, чтобы количество Мо составляло 5, 10 и 15%, содержание остальных элементов составляло примерно равные концентрации.

Дисперсность всех компонентов на 90% была представлена фракцией 2...3 мм. Фракционный состав материалов определялся на аналитической просеивающей машине AS 200 control (Retsch, Германия). Далее шихтовая смесь тщательно перемешивалась в течение 15 мин в лабораторном смесителе Шатца. Слиток был получен путем двойного переплава при нормаль-

ных условиях в тигельной индукционной печи. Повторный переплав проводился с целью гомогенизации структуры и устранения ликвации по телу слитка.

Определение жидкотекучести проводили на спиральной пробе (**рис. 1**) треугольного сечения высотой 15 мм, шириной 10 мм, площадью поперечного сечения 75 мм<sup>2</sup>. Приспособление состоит из следующих элементов: 1 – литниковая чаша, 2 – сетка, 3 – стояк, 4 – зумпф, 5 – спиральные каналы, 6 – выступы. Для упрощения замеров длины полученной отливки, в спиральных каналах были выполнены мерные углубления через каждые 50 мм, которые воспроизводятся на отливке в виде выступов и облегчают измерение длины спирали.

В **табл. 2** приведен химсостав исследуемых образцов. В качестве образца сравнения рассматривался образец №0 (без добавок молибдена).

На **рис. 2** приведены микроструктуры опытных образцов. Микрошлифы изготовили с использованием стандартной металлографической методики. Образцы были отрезаны с помощью станка «Struers Discotom» и после запрессовки обработаны на шлифовально-полировальном станке «Struers Planopol» с использованием по-

**Таблица 2**

Образец	Co	Cr	Fe Ni	Ni	Mn	Nb	C	Mo	Si
0	16,94	16,82	18,50	16,73	16,53	14,23	0,23	–	0,002
1	15,64	15,67	18,02	16,02	15,28	14,20	0,28	4,86	0,003
2	14,12	14,84	17,95	14,28	15,15	14,33	0,28	9,05	0,002
3	13,29	13,127	17,42	13,08	14,52	14,02	0,29	14,25	0,003

Примечание. Во всех образцах – следы P и S.

Таблица 3

Образец	Твердость, HV	Жидкотекучесть, мм
0	243	125
1	482	123
2	639	120
3	689	110

следовательности шлифовальных кругов разной зернистости. После шлифовки и полировки микрошлифы были подвержены обезжириванию и травлению для выявления микроструктуры. Травление проводилось при температуре 20...25°C, с продолжительностью от 10 до 60с. Структуры были получены с использованием электронного микроскопа S-3400N.

Анализ структур показал, что при концентрации молибдена 5% (рис. 2, а) микроструктура является относительно однородной, зерна мелкие и равномерно распределены, при содержании 10% (рис. 2, б) наблюдается некоторая сегрегация молибдена, а также темные включения, что указывает на образование более сложных фаз. При содержании 15% молибдена (рис. 2, в) микроструктура становится еще более неоднородной, наблюдается значительная сегрегация молибдена. Более детальный анализ микроструктуры в данной работе не проводился.

На опытных образцах была измерена твердость образцов с помощью прибора Willson 1150. Все измерения проводились не менее 5 раз, усредненные результаты приведены в сводной табл. 3.

Для исследования жидкотекучести опытных образцов были подготовлены специальные пробы. Образец с заданным составом (см. табл. 2) расплавляли в печи и перегревали до температуры 1700°C, что на ~ 100°C выше температуры ликвидуса. Далее через литниковую чашу (см. рис. 1) заливали расплав в форму пробы, после кристаллизации и полного охлаждения отливку извлекали из формы и определяли длину прутковой части с точностью  $\pm 0,5$  мм по количеству выступов, умножая на 50 мм и длине прутка после последнего выступа. Жидкотекучесть определили по длине пути, пройденному жидким металлом до его затвердевания. Полученные

данные приведены в табл. 3.

Результаты экспериментов, приведенные в табл. 3, показали, что добавление молибдена в указанных концентрациях положительно влияет на твердость опытных образцов, твердость возрастает более, чем в 2,5 раза.

Однако с повышением твердости жидкотекучесть образцов падает. При содержании Mo в образце до 10% жидкотекучесть изменяется незначительно (~ 4%), это подтверждается более быстрым заполнением спиральных каналов и меньшим количеством дефектов в формах. При содержании 15% Mo падение жидкотекучести составляет уже 12%, канал пробы заполнялся медленно, с образованием пор и пустот, что указывает на повышение вязкости расплава и недостаточную текучесть. Такое изменение жидкотекучести может быть связано либо с образованием новых тугоплавких фаз внедрения, которые не присутствуют в структуре при меньшем содержании Mo, либо с большим количеством уже известных фаз внедрения. Для точного объяснения падения жидкотекучести и повышения твердости необходимо провести более детальное исследование фазового состава образцов.

Проведенное исследование показало, что молибден оказывает значительное влияние на свойства KBЭС системы Co-Cr-Fe-Ni-Mn-Nb. Введение Mo в количестве 5...15% оказывает влияние на характер структуры, значительно увеличивает твердость сплава, но снижает его жидкотекучесть. При содержании Mo до 10% жидкотекучесть ухудшается незначительно (~4%), однако при повышении до 15% Mo жидкотекучесть ухудшается уже на 12%, что необходимо учитывать при разработке режимов процесса литья. Для отливок сложной конфигурации стоит ограничиться содержанием Mo до 10% или повысить температуру заливки.

Таким образом, добавление молибдена в квазивысокоэнтропийные сплавы может быть полезным для улучшения их прочностных характеристик, но его концентрация должна быть ограничена 15%, чтобы избежать ухудшения литейных свойств.

СПИСОК  
ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B.** Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, vol. 375–377, pp. 213–218.
2. **Strochko I., Ubyivovk E., Parkhomenko M., Magomedova D., Zanaeva E.** Structure and Properties of Amorphous Quasi-High-Entropy Fe-Co-Ni-Cr-(Mo,V)-B Alloys with Various Boron Content. *Metals* 2023, 13, 1464.
3. **Yang L., Li Y., Wang Z., Zhao W., Qin C.** Nanoporous Quasi-High-Entropy Alloy Microspheres. *Metals* 2019, 9, 345.
4. **Kvon S., Issagulov A., Kulikov V., Arinova S.** Niobium's Effect on the Properties of a Quasi-High-Entropy Alloy of the CoCrFeMnNi System. *Metals* 2024, 14, 564.
5. **Kvon S., Issagulov A., Kulikov V., Arinova S.** The use of ferroalloys for the smelting of a quasi-high-entropy alloy // *CIS Iron and Steel Review*. Москва: Изд-во «Руда и металлы». Vol. 26 (2024), № 2. Pp.21-25.
6. **Исагулов А.З., Куликов В.Ю., Квон С.С., Тулегенова Ш.Н.** Влияние технологических режимов плавки на механические свойства квази-высокоэнтропийных сплавов // *Литейное производство*. 2024. № 4. С. 2–4.
7. **Liu W., Lu Z., He J., Luan J., Wang Z., Liu B., Liu Y., Chen M., Liu C.** CoCrFeNiMo x high entropy alloys strengthened by hard intermetallic phases // *Acta Mater*. 2016. P. 332–342.
8. **Sanin V.N., Ikornikov D.M., Golosova O.A., Andreev D.E., Yukhvid V.I.** Centrifugal SHS Metallurgy of Cast Co-Cr-Fe-Ni-Mn High-Entropy Alloys Strengthened by Precipitates Based on Mo and Nb Borides and Silicides // *Physical Mesomechanics*. 2021. Vol. 24. Iss. 6. P. 692–700.
9. **ГОСТ 16438-70.** Форма песчаная и металлическая для получения проб жидкотекучести металлов. Дата введения 01.01.72. (переиздание с изменениями). М.: Изд-во стандартов, 1999.

Работа выполнена в рамках реализации Программы ИРН BR21882240 «Создание квазивысокоэнтропийного сплава с использованием казахстанского сырья и технологии производства прецизионных деталей на его основе» (договор с КН МНВО РК № 378-ПЦФ-23-25 от 15.11.2023 г.), финансируемой Министерством науки и высшего образования Республики Казахстан.

## Сведения об авторах

**Абильдина Айжан Рымкулкызы** – докторант, НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», г. Караганда, Республика Казахстан. Тел.: 8 (771) 207 34 42. E-mail: aizhan--1984@mail.ru

**Квон Светлана Сергеевна** – канд. техн. наук, проф., там же.

**Куликов Виталий Юрьевич** – канд. техн. наук, проф., там же.

**Окишев Константин Юрьевич** – д-р физ.-мат. наук, доц., ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.