

6. Colucci, R., De Paula Barbosa, H. F., Günther, F., Cavassin, P., & Faria, G. C. (2019). Recent advances in modeling organic electrochemical transistors. *Flexible and Printed Electronics*, 5(1), 013001. <https://doi.org/10.1088/2058-8585/ab601b>
7. Bernards, D. A., & Malliaras, G. G. (2007b). Steady-State and transient behavior of organic electrochemical transistors. *Advanced Functional Materials*, 17(17), 3538–3544. <https://doi.org/10.1002/adfm.200601239>
8. Guo, J., Chen, S. E., Giridharagopal, R., Bischak, C. G., Onorato, J. W., Yan, K., Shen, Z., Li, C., Luscombe, C. K., & Ginger, D. S. (2024). Understanding asymmetric switching times in accumulation mode organic electrochemical transistors. *Nature Materials*. <https://doi.org/10.1038/s41563-024-01875-3>
9. Ilyassov, B., Zavgorodniy, A., Alekseev, A., Aldasheva A. (2025). Rectifying behavior of organic electrochemical transistors. *Physica B: Condensed Matter*, 696, 416620 <https://doi.org/10.1016/j.physb.2024.416620>
10. Kim, Y., Kim, G., Ding, B., Jeong, D., Lee, I., Park, S., Kim, B. J., McCulloch, I., Heeney, M., & Yoon, M. (2021b). High-Current-Density organic electrochemical diodes enabled by asymmetric active layer design. *Advanced Materials*, 34(7). <https://doi.org/10.1002/adma.202107355>

УДК 669.017.16

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ МОЛИБДЕНА И КРЕМНИЯ НА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫЙ СПЛАВ КАНТОРА

Исагулов А.З., НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», г. Караганда, Казахстан

Квон Св.С., НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», г. Караганда, Казахстан

Куликов В.Ю., НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», г. Караганда, Казахстан

В работе [1] авторами предложен новый тонкоструктурный ВЭС $\text{CrFeNiAl}_{0,27}\text{Si}_{0,11}\text{Mo}_{0,22}$, полученный методом дуговой плавки. В результате проведенных экспериментальных наблюдений получены сплавы с довольно высокими механическими свойствами. Также данный сплав обладает превосходной коррозионной стойкостью за счет образования тонкой пленки оксида молибдена.

Такое значительное увеличение прочностных характеристик авторы работы связывают с образованием тонкой дуальной структуры, образованной пластинками ВСС и АСС-растворами.

Надо отметить, что данные этого исследования хорошо согласуются с результатами работы [2], где также было отмечено, что введение Мо положительно влияет на прочность при сохранении высокой пластичности. В исследовании [3] авторами разработан новый сплав FeCoCrNiMoSi_x с различным содержанием Si в соответствии с атомным соотношением $\text{Fe:Co:Cr:Ni:Mo:Si} = 1:1:1:1:1:x$ (где $x=0,5;1,0;1,5$). Авторами было установлено, что введение кремния в сплав системы FeCoCrNiMo преобразует двухфазную структуру сплава в трехфазную типа FCC + НСР + ВСС. С увеличением содержания кремния структура приобретает дендритный столбчатый характер, а при увеличении содержания Si до $x = 0,9$ и $1,0$ в сплаве образуется твердая силикатная фаза, причем при этом наблюдается четкая сегрегация элементов.

Таким образом, результаты исследований в вышеуказанных работах показали, что легирование ВЭС молибденом и кремнием приводит к значительному упрочнению, причем в ряде случаев пластичность сплавов сохраняется на прежнем уровне или даже возрастает. Надо отметить, что молибден оказывает большое влияние на прочность сплава, чем кремний.

Проведенный информационный анализ показал положительное влияние Мо и Si на прочность и пластичность сплавов системы Fe-Cr-Co-Ni-Mn. Упрочнение сплавов при сохранении или даже повышении пластичности происходит за счет образования новых фаз внедрения типа σ - и μ - фаз и фаз Лавеса, равномерно распределенных в вязкой матрице твердого раствора. Однако, все исследования касаются только «классических» ВЭС, поэтому полученные результаты невозможно просто транслировать на КВЭС, т.к. они представляют собой совершенно другие исходные фазовые системы. Не исследовались также другие свойства ВЭС, например, жидкотекучесть, которая является важной технологической характеристикой. Соответственно, исследования влияния Мо и Si на прочность, пластичность и другие свойства являются актуальной и перспективной задачей.

В лаборатории Международного центра материаловедения НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова» были проведены лабораторный испытания по выплавке опытных образцов.

В качестве шихтовых материалов использовались ферромарганец марки FeMn80C05 , феррохром марки ФК005 , феррониобий марки ФНб60 , никель катодный марки Н1 , металлический кобальт марки К1Au и ферромolibден марки ФМо60 . Химический состав компонентов шихты приведены в таблице 1. Состав шихты рассчитывался таким образом, чтобы содержание Мо составляло 5, 10, 15% масс., содержание Nb около 14% масс, остальные элементы примерно в равных долях.

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 и проплавлялась в индукционной печи УИП-0,5 с усиленной системой охлаждения в атмосфере воздуха. Далее полученный расплав разливался в алундовые тигли, охлаждался, затем снова переплавлялся и снова разливался. Повторный переплав проводился с целью гомогенизации структуры и устранения ликвации по телу слитка.

После полного охлаждения из слитка были подготовлены образцы для анализа. На опытных образцах исследовались химический состав, твердость, прочность на сжатие, пластичность (относительное удлинение) и структура. Химический состав определялся с помощью спектрометра Poly Spec-F (Италия). Анализ структуры проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа S-3400N, оснащенного рентгеновским энерго-дисперсионным спектрометром NORAN фирмы Hitachi High Technologies Corporation.

Таблица 1 – Состав шихтовых материалов

Элемент, %масс материал	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
Co K1Ay	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

Определение твердости проводили на приборе Willson 1150, измерения проводили не менее, чем в 5 точках. Предел прочности определяли на испытательной машине INSTRON с 3 дублями.

Рентгено-фазовый анализ проводился на рентгеновском дифрактометре D2Phaser Bruker с рентгеновской трубкой Siemens KFL-CU-2K Cu-2K (медный анод). Идентификация и количественный расчет содержания фаз проводился в программах DIFFRAC.EVA и DIFFRAC.TOPAS.

Было выплавлены опытные образцы, на которых затем исследовались технологические (жидкотекучесть) и эксплуатационные свойства, а также структура и фазовый состав. В качестве образца сравнения рассматривался образец №0 (без добавок молибдена). В таблице 2 приведен химический состав опытной партии образцов.

Таблица 2 – Химический состав образцов опытной партии (с молибденом и ниобием).

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

Одним из важнейших технологических свойств сплавов при литье является их жидкотекучесть, т.к. именно жидкотекучесть определяет заполняемость формы, точность отпечатка и качество готовой отливки в целом.

Опытный КВЭС имеет достаточно высокую температуру плавления и широкий интервал солидус-ликвидус, поэтому вопрос о жидкотекучести сплава является первостепенным.

Определение жидкотекучести проводили на спиральной пробе треугольного сечения высотой 15 мм, шириной 10 мм, площадью поперечного сечения 75 мм.

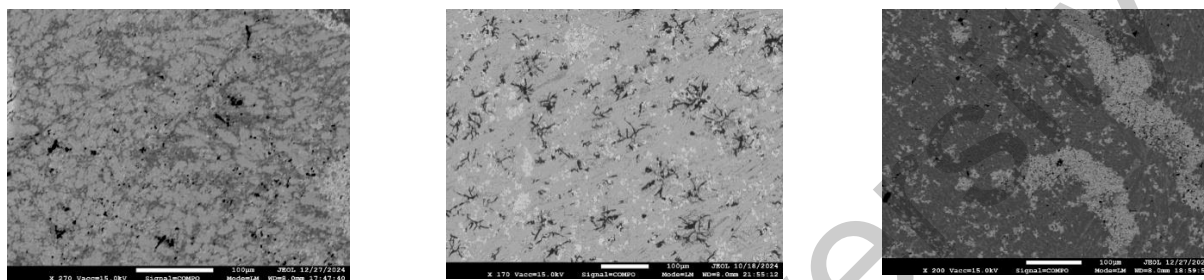
Для исследования жидкотекучести опытных образцов были подготовлены специальные пробы. Образец с заданным составом расплавляли в печи и перегревали до температуры 1700⁰С, что составляет примерно на 100⁰С выше температуры ликвидуса. Далее через литниковую чашу залили расплав в форму пробы, после кристаллизации и полного охлаждения отливку извлекали из формы и определяли длину прутковой части с точностью ±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. После полного охлаждения на полученных пробах была определена твердость. Полученные данные приведены в таблице 3. Результаты экспериментов, приведенные в таблице 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 молибдена в образце до 10% жидкотекучесть меняется незначительно (около 4%), это подтверждается более быстрым заполнением спиральных каналов и меньшим количеством дефектов в формах. При содержании 15% Мо 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 Мо, либо с большим количеством уже известных фаз внедрения. Для точного объяснения падения жидкотекучести и повышения твердости было проведено более детальное исследование фазового состава образцов.

Таблица 3 – Результаты испытаний на жидкотекучесть и твердость

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

На рисунке 1 приведены микроструктуры опытных образцов. Микрошлифы изготовили с использованием стандартной металлографической методики. Образцы были отрезаны с помощью станка «Struers Discotom». После запрессовки образцы были обработаны на шлифовально-полировальном станке «Struers Planopol» с использованием последовательности 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 60 сек. Структуры были получены с использованием электронного микроскопа S-3400N.



Образец 1

Образец 2

Образец 3

Рисунок 1 – Микроструктуры опытных образцов

Проведенный анализ структур показал, что при концентрации молибдена 5% (рисунок 1,а) микроструктура является относительно однородна, зерна мелкие и равномерно распределены, при содержании 10% (рисунок 1,б) наблюдается некоторая сегрегация молибдена, а также темные включения, что указывает на образование более сложных фаз. При содержании 15% молибдена (рисунок 1,в) микроструктура становится еще более неоднородной, наблюдается значительная сегрегация молибдена. Более детальный анализ микроструктуры в данной работе не проводился.

Проведенное исследование показало, что молибден оказывает значительное влияние на свойства КВЭС 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 (около 4%), однако при повышении до 15% Mo жидкотекучесть ухудшается уже на 12%, что необходимо учитывать при разработке режимов процесса литья. Для отливки 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 использованных источников

1. Li, X., Liu, X., Lei, N., Zhang, G., Wei, R., Wang, T., Wu, S., Cai, Y., Chen, C. / Microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of an as-cast fine-structure Cr-Fe-Ni-Al-Si high entropy alloy with Mo addition// Materials Today Communications. - Том 35, June 2023, Номер статьи 106020.
2. W. Liu, Z. Lu, J. He, J. Luan, Z. Wang, B. Liu, Y. Liu, M. Chen, C. Liu // CoCrFeNiMox high entropy alloys strengthened by hard intermetallic phases// Acta Mater. – 2016. – P. 332–342.
3. Yucheng Yang, Yaojia Ren, Yanwen Tian, Kaiyang Li, Lichun Bai, Qianli Huang, Quan Sha, Yingtao Tian, Hong Wu// Microstructure and tribological behaviors of FeCoCrNiMoSix high-entropy alloy coatings prepared by laser cladding/ - Surface and Coatings Technology. -Volume 432, - 25 February 2022, 128009.

УДК 621.7

ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Кабылгани Ч.К. Карагандинский университет имени академика Е.А. Букетова, Караганда, Казахстан
Болатбекова М.М. Карагандинский университет имени академика Е.А. Букетова, Караганда, Казахстан

Аддитивные технологии- это процесс изготовления деталей, который основан на создании физического объекта по электронной модели путем добавления материала, как правило, слой за слоем [1, 2].

FDM (или FFF «fused filament fabrication» («производство способом наплавления нитей»)) – метод моделирования послойного наплавления, данная технология широко используется для создания 3D моделей и отлично подходит для прототипирования, и промышленного производства. Для печати используются термопластики (филамент)[3].