

Влияние добавок Си на микроструктуру и свойства сплавов системы Al–Fe, полученных методом литья в электромагнитный кристаллизатор

© 2024

Медведев Андрей Евгеньевич^{*1}, кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник*Жукова Ольга Олеговна*², аспирант*Шайхулова Айгуль Фазировна*³, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник*Мурашкин Максим Юрьевич*⁴, кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Уфимский университет науки и технологий, Уфа (Россия)

*E-mail: medvedevae@uust.ru,
medvedevandreyrf@gmail.com

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8616-0042>²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1879-9389>³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3340-3880>⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9950-0336>

Поступила в редакцию 26.06.2023

Принята к публикации 14.02.2024

Аннотация: Современная электротехническая промышленность требует дешевых и легко воспроизводимых алюминиевых сплавов – материалов с повышенной механической прочностью и электропроводностью. В работе исследовано влияние малых (до 0,3 мас. %) добавок меди на микроструктуру и физико-механические свойства, а также фазовые трансформации в сплавах системы Al–Fe с содержанием железа 0,5 и 1,7 мас. %, полученных методом непрерывного литья в электромагнитный кристаллизатор. Были получены сплавы указанных выше химических составов, впоследствии отожженные при 450 °С в течение 2 ч. Во всех состояниях были изучены микроструктура (с помощью РЭМ), предел текучести, предел прочности при растяжении, удлинение до разрушения и электропроводность. Показано, что добавки меди приводят к увеличению прочности обоих сплавов и некоторому снижению их пластичности по сравнению с аналогичными материалами без меди. Повышение прочности и снижение пластичности за счет добавки меди связано с образованием более дисперсных интерметаллидных частиц в медьсодержащих сплавах системы Al–Fe. Дополнительный сфероидизирующий отжиг приводит к уменьшению протяженности межфазной границы между алюминиевой матрицей и частицами алюминидов железа за счет изменения их морфологии, что ведет к увеличению электропроводности. В целом медьсодержащие сплавы показали более высокую механическую прочность при меньшей электропроводности, а также повышенную термическую стабильность.

Ключевые слова: Al; Al–Fe–Cu; литье в электромагнитный кристаллизатор; фазовые превращения; механические свойства; электрическая проводимость; термическая стабильность.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-79-10133, <https://rscf.ru/project/20-79-10133/>.

Исследовательская часть работы выполнена на оборудовании ЦКП «Нанотех» Уфимского университета науки и технологий. Авторы выражают благодарность профессору В.Н. Тимофееву (Сибирский федеральный университет) за предоставленный материал исследования.

Статья подготовлена по материалам докладов участников XI Международной школы «Физическое материаловедение» (ШФМ-2023), Тольятти, 11–15 сентября 2023 года.

Для цитирования: Медведев А.Е., Жукова О.О., Шайхулова А.Ф., Мурашкин М.Ю. Влияние добавок Си на микроструктуру и свойства сплавов системы Al–Fe, полученных методом литья в электромагнитный кристаллизатор // Frontier Materials & Technologies. 2024. № 2. С. 77–85. DOI: 10.18323/2782-4039-2024-2-68-7.

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня основными потребителями алюминиевых сплавов являются высокотехнологичные отрасли экономики, такие как локомотивостроение, вагоно- и судостроение, аэрокосмическая, автомобильная, электротехническая промышленность, строительство и производство линий электропередачи [1]. Современные тенденции в металлургии и материаловедении заключаются в необходимости снижения веса, металлоемкости и повышения эффективности использования материалов. Эти тенденции во многом определяются разработкой новых материалов с необходимыми эксплуатационными характеристиками и внедрением технологий их производства.

Благодаря своим отличительным эксплуатационным характеристикам и техническим свойствам, алюминиевые сплавы выделяются среди других металлических материалов конструкционного и электротехнического назначения. Алюминий и его сплавы применяются в электротехнике и обычно производятся в виде катанки/проволоки, получаемой методами комбинированного литья и прокатки, литья, прокатки и прессования с последующей прокаткой или волочением [2; 3]. Однако, несмотря на относительно высокий уровень электропроводности (52–62 % IACS), их прочность и жаростойкость достаточно низки [4], что осложняется еще и тем, что повышение прочности и повышение электропроводности в Al сплавах обычно исключают друг друга [5]. В связи с этим современные исследования

направлены на поиск новых сплавов и технологий производства, которые позволят более эффективно использовать алюминий как с точки зрения физико-механических свойств, так и с финансовой точки зрения.

Шагом к более широкому применению алюминия стало внедрение алюминиевых сплавов системы Al-Fe таких марок, как 8030 и 8176, из которых изготавливают проводники сечением от 2 до 10 мм¹. Эти сплавы обладают большей прочностью, чем чистый алюминий, например, марки 1350, хорошей пластичностью и приемлемым уровнем пожаробезопасности. Улучшение физико-механических свойств сплавов системы Al-Fe достигнуто путем введения Fe (в диапазоне 0,4–1,0 мас. %) в состав алюминия [6; 7], а также небольших добавок Cu (до 0,3 мас. %) [8]. Присутствие Fe обеспечило повышение прочности сплава после его термообработки (отжига). Небольшие добавки Cu также улучшают прочностные характеристики проводников на основе Al-Fe сплавов. Однако ряд физических и технико-эксплуатационных показателей ограничивают применение таких проводников, побуждая исследователей искать дальнейшие пути повышения прочности и термической стабильности сплавов системы Al-Fe без потери их электропроводности.

В последние десятилетия уделяется внимание формированию наноструктурированных, нанофазосодержащих и ультрамелкозернистых структур в полуфабрикатах и изделиях из алюминиевых сплавов, что позволяет существенно улучшить комплекс физико-механических, а также функциональных и эксплуатационных характеристик [9; 10]. Кроме того, совершенствуются и развиваются традиционные методы получения и обработки сплавов на основе алюминия.

Одним из перспективных методов производства катушки и проволоки из алюминиевых сплавов электротехнического назначения является непрерывное литье в электромагнитный кристаллизатор (ЭМК), известное также как литье в электромагнитные формы. Использование ЭМК позволяет обеспечить уникальные физико-механические свойства проволоки за счет достижения чрезвычайно высоких скоростей охлаждения (10^3 – 10^4 К/с), обеспечивая уникальную структуру и свойства сплава (высокие прочность и электропроводность), как это было показано на примере сплавов Al-Zr [11] и Al-Ca-Fe-Si [12].

В данной работе приведены результаты исследований, которые являются продолжением работ группы ученых Уфимского университета науки и технологий, направленных на создание новых материалов электротехнического назначения на основе Al сплавов, полученных методом литья в ЭМК. В [13] был изготовлен сплав Al-La-Ce, а затем подвергнут кручению под высоким давлением (КВД). Показано, что КВД приводит не только к измельчению зерна, но и к образованию твердого раствора La и Ce в Al, хотя считается, что эта система имеет нулевую растворимость легирующих элементов. В [14] были проведены исследования, посвященные системе Al-Fe, показавшие, что Al-Fe сплавы, полученные методом ЭМК, имеют тенденцию

к обладанию более высокой механической прочностью и более мелким размером зерна по сравнению со сплавами, полученными традиционными методами. Литье в ЭМК также приводило к образованию метастабильной фазы Al₂Fe, обычно не присутствующей в сплавах системы Al-Fe [15]. В качестве материалов исследования использовались сплавы Al-0,5Fe и Al-1,7Fe (мас. %), полученные литьем в ЭМК, дополнительно легированные 0,3 мас. % Cu (далее Al-0,5Fe-0,3Cu и Al-1,7Fe-0,3Cu соответственно).

На основании предыдущих исследований был проведен отжиг исследуемых материалов. В [16; 17] показано, что отжиг в интервале 450–550 °С в Al сплавах с низкой несмешиваемостью легирующих элементов приводит к процессам коагуляции и сфероидизации интерметаллических частиц без фазовых превращений. Сфероидизация пластинчатых/пластинообразных интерметаллических частиц в сплавах системы Al-Fe, полученных литьем в ЭМК, сопровождается уменьшением площади межфазной поверхности и увеличением их электропроводности. Такая термообработка также приводит к повышению пластичности материала. Поскольку добавление Cu в сплав Al-Fe снижает пластичность сплава, можно проводить отжиг при 450 °С в качестве меры по увеличению пластичности.

Цель работы – установление влияния добавок меди и морфологии интерметаллических частиц на механические и электрические свойства сплавов Al-0,5Fe и Al-1,7Fe, полученных методом электромагнитного литья.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходные прутки диаметром 11 мм и длиной более 2 м из сплавов системы Al-Fe с содержанием железа 0,5 и 1,7 мас. % и добавкой меди 0,3 мас. % были изготовлены методом непрерывного литья в ЭМК на экспериментальном лабораторном литейном оборудовании ООО «Научно-производственный центр магнитной гидродинамики» (Красноярск, Россия). Химический состав исследованных сплавов представлен в таблице 1.

Образцы для исследования были выполнены из алюминия марки А85 с добавкой лигатуры Fe80Al20 в пропорциях, подобранных с учетом необходимой концентрации железа. После достижения температуры расплава более 800 °С проводили непрерывное литье на установке ЭМК со скоростью 12,4 мм/с. Литые заготовки обрабатывались методом холодного волочения до диаметра 3 мм за 8 проходов.

Термическую обработку образцов проводили в атмосферной печи Nabertherm В 180 (Лилиенталь, Германия) при температуре 450 °С в течение 2 ч.

Сканирующую электронную микроскопию (СЭМ) проводили на микроскопе JEOL JSM-6490LV (Токио, Япония) при ускоряющем напряжении 15 кВ. Для обработки изображений и количественных измерений элементов микроструктуры (средний размер зерна, средний размер частиц вторых фаз) использовали программу ImageJ и пакет программ Grain Size.

Испытания на растяжение проводили трехкратно на аппарате Instron 5982 (Норвуд, США) при комнатной температуре и скорости деформации 10^{-3} с⁻¹. Для получения статистически надежных результатов было протестировано не менее трех образцов для каждого условия

¹ ГОСТ Р 58019-2017. Катушка из алюминиевых сплавов марок 8176 и 8030. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2018. 20 с.

Таблица 1. Химический состав Al–Fe сплавов, мас. %
Table 1. Chemical composition of Al–Fe alloys, wt. %

Сплав	Cu	Fe	Si	Σ (Mn, Cr, Zn)	Al
Al–0,5Fe–Cu	0,30	0,50	0,02	<0,01	99,04
Al–1,7Fe–Cu	0,30	1,85	0,00	<0,01	97,71
AA8176 (ASTM B800)	–	0,40–0,50	0,07	<0,03	Остальное
AA8030 (ASTM B800)	0,15–0,20	0,35–0,45	0,07	<0,03	Остальное

Примечание. Для сравнения приведен химический состав сплавов AA8176 и AA8030, в настоящее время используемых в качестве материала для электропроводников в России и за рубежом.

Note. For comparison shows the chemical composition of AA8176 and AA8030 alloys currently used as a material for electrical conductors both in Russia and abroad.

испытаний. Предел текучести ($\sigma_{0,2}$), предел прочности на растяжение (σ_{UTS}) и удлинение до разрушения (δ) были получены с использованием плоских образцов размерами 2,0×1,0×6,0 мм.

Электропроводность (ω) определяли с погрешностью $\pm 2\%$ методом вихревых токов. Электропроводность относительно отожженной меди (Международный стандарт отожженной меди, % IACS) рассчитывали по уравнению

$$IACS = \frac{\omega_{Al}}{\omega_{Cu}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где ω_{Al} – измеренная электропроводность Al сплава;
 ω_{Cu} – электропроводность отожженной химически чистой меди (58 МС/м).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эволюция микроструктуры в результате термообработки

На рис. 1 представлена микроструктура заготовок сплавов Al–0,5Fe–0,3Cu и Al–1,7Fe–0,3Cu, полученных литьем в ЭМК. Анализ изображений, полученных методом СЭМ, показал, что алюминиевая матрица содержит включения интерметаллической фазы, образованной при кристаллизации. В сплаве Al–1,7Fe–0,3Cu частицы второй фазы образуют сплошную сетку с размером ячеек (2,1±0,3) мкм (рис. 1 b), а в сплаве Al–0,5Fe–0,3Cu интерметаллидная сетка имеет средний размер ячеек (5,7±0,9) мкм (рис. 1 a). Судя по размеру дендритных ячеек, скорость охлаждения во время кристаллизации заготовки составляла не менее 1000 °С/с. Детальное рассмотрение (рис. 1 c, 1 d) показывает, что в сплавах Al–0,5Fe–0,3Cu и Al–1,7Fe–0,3Cu интерметаллидная фаза кристаллизовалась в виде пластинок/игл толщиной до (0,6±1,0) мкм. Кроме того, интерметаллические частицы в медьсодержащих сплавах более фрагментированы, чем в сплавах без меди.

На рис. 2 представлена микроструктура сплавов Al–0,5Fe–0,3Cu и Al–1,7Fe–0,3Cu, полученных литьем

в ЭМК и путем дополнительного отжига при 450 °С в течение 2 ч. Количественный анализ показал, что отжиг не приводит к заметному изменению размеров дендритных клеток в обоих исследованных материалах. Однако в результате отжига частицы начали сфероидизироваться – в структуре обоих сплавов наблюдается изменение морфологии тонких пластинок/игл интерметаллической фазы – их сфероидизация.

На рис. 3 представлена микроструктура сплавов Al–1,7Fe и Al–1,7Fe–0,3Cu после литья в ЭМК и дополнительного отжига при температуре 450 °С в течение 2 ч. Наличие меди в сплаве снижает склонность сплава к сфероидизации после отжига при температуре 450 °С: в сплавах Al–1,7Fe–0,3Cu частицы имеют более острые и менее гладкие края.

Эволюция механических и электрических свойств в результате деформационной обработки

В таблице 2 представлены физико-механические свойства сплавов системы Al–Fe. В исходном состоянии предел прочности на растяжение сплава Al–0,5Fe–0,3Cu составляет (106±4) МПа, в сплаве Al–1,7Fe–0,3Cu $\sigma_{ппр}$ составляет (174±11) МПа. С добавлением 0,3 мас. % Cu электропроводность сплава Al–0,5Fe снижается на 1,7 % IACS, а электропроводность сплава Al–1,7Fe – на 8,2 % IACS (1). Такое изменение электропроводности свидетельствует о том, что она в основном контролируется содержанием железа и, соответственно, долей частиц алюминидов железа в сплавах.

Сфероидизирующий отжиг, направленный на уменьшение длины межфазной границы в сплавах, привел к снижению прочности и повышению пластичности и электропроводности исследуемых материалов. Так, в сплаве Al–0,5Fe–0,3Cu пластичность и электропроводность после отжига при 450 °С в течение 2 ч увеличились с 33,7 до 37,8 % и с 56,1 до 60,9 % IACS соответственно, а предел прочности снизился со 106 до 100 МПа (в пределах значения погрешности). В то же время в результате аналогичного отжига повышается пластичность и электропроводность в сплаве Al–1,7Fe–0,3Cu с 23,3 до 23,6 % и с 41,4 до 55,9 % IACS соответственно, а предел прочности снижается со 175 до 150 МПа.

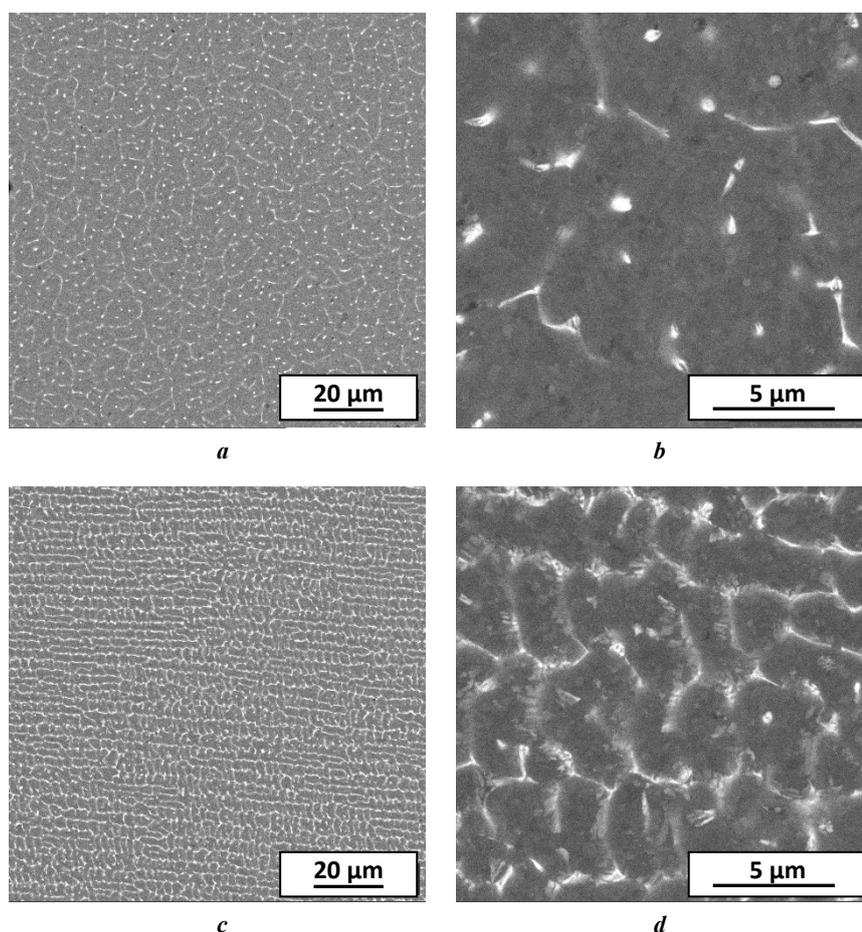


Рис. 1. Микроструктура сплавов, полученных литьем в электромагнитный кристаллизатор:

a, b – Al-0,5Fe-0,3Cu; **c, d** – Al-1,7Fe-0,3Cu, РЭМ

Fig. 1. Microstructure of electromagnetically cast alloys: **a, b** – Al-0.5Fe-0.3Cu; **c, d** – Al-1.7Fe-0.3Cu, SEM

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В данной работе обсуждается влияние легирования Cu на микроструктуру и физико-механические свойства сплавов системы Al-Fe, полученных методом литья в ЭМК. Установлено, что введение 0,3 мас. % Cu приводит к изменению морфологии интерметаллических частиц, образующихся при кристаллизации при скоростях выше 10^3 C/c. В сплавах без Cu частицы образуют дендритные ячейки, кристаллизующиеся в виде длинных пластинок/игл с равномерно закругленными краями, а в медьсодержащих сплавах такие частицы имеют заметно меньшую длину, образуя «фрагментированные» кластеры. Скорее всего, шероховатая форма интерметаллических частиц формируется за счет метода литья, поскольку в [18] показано, что в аддитивно изготовленном сплаве Al-Cu-Fe интерметаллические частицы имеют гладкие закругленные края. Аналогичную разницу демонстрируют и другие методы производства [19; 20].

Добавление меди также увеличивает количество ядер интерметаллических частиц, уменьшая расстояние между ними, тем самым сокращая путь свободных дислокаций и увеличивая прочность сплава. Добавление 0,3 мас. % Cu в сплавы с выбранным содержанием Fe приводит к увеличению предела прочности (с 90 до 106 МПа в сплаве Al-0,5Fe и со 150 до 174 МПа в сплаве Al-1,7Fe) и снижению электропроводности (с 57,8

до 56,1 % IACS в сплаве Al-0,5Fe и с 49,6 до 41,4 % IACS в сплаве Al-1,7Fe). Это изменение механической прочности и электропроводности чувствительно к содержанию Fe – величина разницы свойств пропорциональна содержанию железа. Таким образом, можно предположить, что медь не играет ведущей роли в изменении свойств исследованных сплавов.

Можно также отметить, что дополнительное легирование Cu наряду с увеличением прочности (что, вероятно, связано с образованием в алюминии твердого раствора атомами меди) привело к незначительному снижению пластичности исследованных материалов.

Важно отметить, что добавление такого же количества меди в серийно выпускаемый сплав 8030 не приводит к аналогичному повышению его прочности по сравнению со сплавом 8176, в котором медь отсутствует (таблица 2). Скорее всего, отмеченная в данном исследовании разница в механической прочности обусловлена различием способов получения полуфабрикатов. Как отмечалось выше, в сплавах, полученных непрерывным литьем в ЭМК, проволоки/прутки/заготовки быстро охлаждаются, и поэтому в процессе кристаллизации большая часть меди остается в твердом растворе алюминия. В серийных полуфабрикатах, полученных методом непрерывного литья и прокатки [21], содержание меди в твердом растворе алюминия заметно ниже из-за

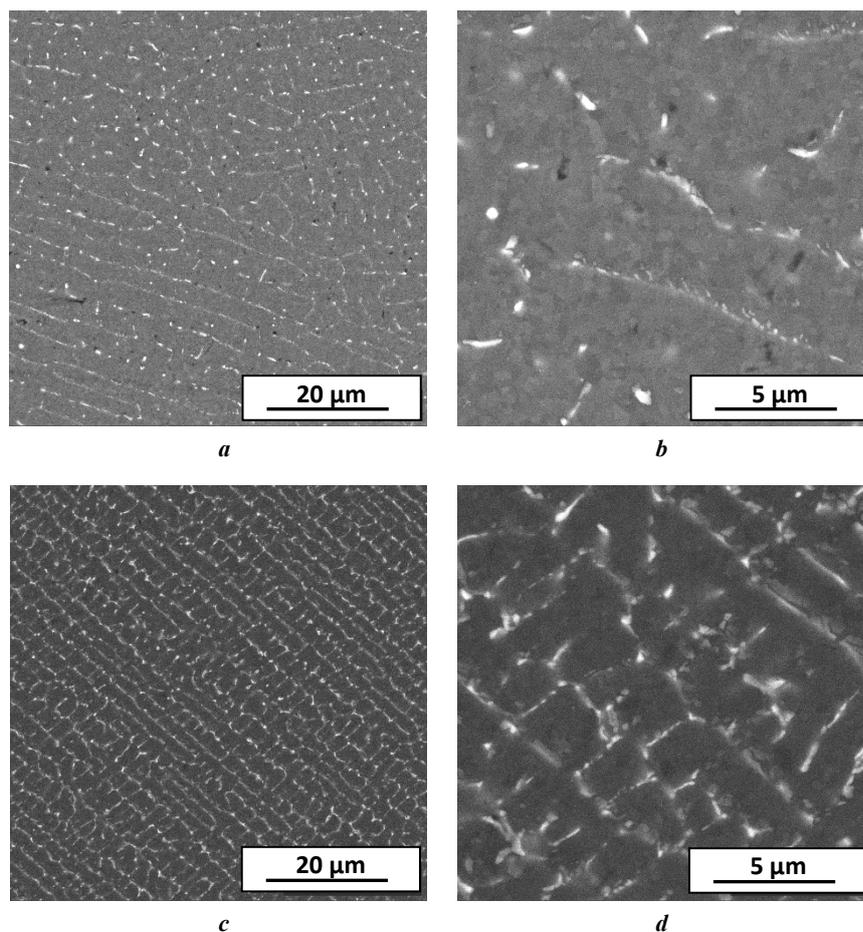


Рис. 2. Микроструктура сплавов после литья в электромагнитный кристаллизатор и дополнительного отжига при 450 °С, 2 ч:

a, b – Al-0,5Fe-0,3Cu; **c, d** – Al-1,7Fe-0,3Cu, РЭМ

Fig. 2. Microstructure of alloys after casting into electromagnetic crystallizer and additional annealing at 450 °C, 2 h:

a, b – Al-0.5Fe-0.3Cu; **c, d** – Al-1.7Fe-0.3Cu, SEM

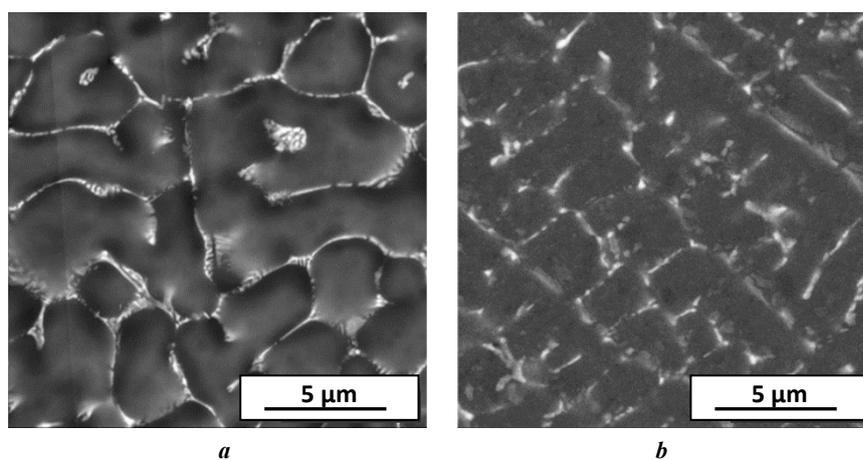


Рис. 3. Микроструктура сплавов Al-1,7Fe (**a**) и Al-1,7Fe-0,3Cu (**b**)

после литья в электромагнитный кристаллизатор и дополнительного отжига при 450 °С, 2 ч (РЭМ)

Fig. 3. Microstructure of Al-1.7Fe (**a**) and Al-1.7Fe-0.3Cu (**b**) alloys

after casting in на electromagnetic crystallizer and additional annealing at 450 °C, 2 h (SEM)

Таблица 2. Физические и механические свойства сплавов системы Al–Fe
 Table 2. Physical and mechanical properties of alloys of the Al–Fe system

Сплав	Состояние	Электрические свойства		Механические свойства		
		ω , МС/м	IACS, %	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_{UTS} , МПа	δ , %
Al–0,5Fe–0,3Cu	ЭМК	32,54±0,21	56,1±0,4	72±8	106±4	33,7±6,5
	ЭМК + 450 °С, 2 ч	35,32±0,20	60,9±0,6	65±8	100±13	37,8±2,8
Al–1,7Fe–0,3Cu	ЭМК	24,01±0,16	41,4±0,3	113±9	174±11	23,6±2,1
	ЭМК + 450 °С, 2 ч	32,42±0,18	55,9±0,5	85±5	149±4	23,9±2,1
Al–0,5Fe [14]	ЭМК	29,83±0,19	57,8±0,5	35±3	90±7	32,5±3,4
	ЭМК + 450 °С, 2 ч	–	–	–	–	–
Al–1,7Fe [14]	ЭМК	28,77±0,21	49,6±0,6	60±6	150±11	28,8±2,1
	ЭМК + 450 °С, 2 ч	33,04±0,17	57,0±0,4	68±5	133±3	33,5±2,8
AA8176 (ASTM B800)	–	–	60,6	–	103–152	–
AL2 (EN 50183:2000)	–	–	52,5	–	315	–
AT2 (IEC 62641:2023)	–	–	55,0	–	225–248	–
8030 (ГОСТ Р 58019-2017)	–	–	60,0	–	115–140	12
8176 (ГОСТ Р 58019-2017)	–	–	60,0	–	115–140	12

меньшей скорости кристаллизации (на ~2 порядка) и медленного охлаждения при последующей прокатке.

Природа интерметаллических частиц остается открытым вопросом. Считается, что железо имеет близкую к нулевой концентрацию твердого раствора в алюминии [22; 23], таким образом, в сплавах Al–Fe не должно присутствовать твердого раствора Fe, а все железо должно быть связано в интерметаллических частицах Al_xFe_y . Однако медь может образовывать твердый раствор в алюминии с концентрацией до 0,2 мас. % (~0,1 ат. %) в нормальном состоянии. Согласно диаграмме состояния тройной системы Al–Cu–Fe [24], при заданной концентрации интерметаллиды представлены фазами $Al_{13}Fe_4$ и Al_7Cu_2Fe . Поскольку общее количество Cu в сплаве Al–0,5Fe–0,3Cu составляет 0,3 мас. % и даже может считаться примесью, было бы довольно сложно разделить упрочняющее влияние твердого раствора меди в алюминии и фазу Al_7Cu_2Fe с приемлемым допуском. Таким образом, в данном исследовании влияние добавок Cu рассматривается как синергетическое влияние всех медьсодержащих свойств.

Можно было бы с уверенностью предположить, что медь, по крайней мере в литом состоянии, присутствует как в твердом растворе, так и в интерметаллических частицах, а также в сегрегациях по границам зерен. Дополнительный сфероидизирующий отжиг показал, что дополнительное легирование медью делает сплавы системы Al–Fe, полученные литьем в ЭМК, более чувствительными к изменению прочности и, как следствие, электропроводности, причем этот эффект усиливается с увеличением содержания Fe в алюминии. По сравне-

нию со сплавом Al–1,7Fe сплав Al–1,7Fe–0,3Cu демонстрирует лучшую термическую стабильность – он теряет механическую прочность до меньшей величины. Природу этого эффекта еще предстоит изучить.

Отжиг при 450 °С в течение 2 ч медьсодержащих сплавов Al–0,5Fe–0,3Cu и Al–1,7Fe–0,3Cu показал результат, аналогичный наблюдавшемуся ранее [14]. Коагуляция частиц, произошедшая в процессе термообработки, привела к сглаживанию острых краев частиц, в результате чего снизилась вероятность растрескивания образцов при деформации.

За счет использования ЭМК можно получить более выраженный эффект влияния меди на морфологию фаз и свойства полуфабрикатов по сравнению с теми, что получены традиционными методами. Было бы интересно узнать, переносится ли данный эффект на конечный продукт, например, на проволоку/полосу. На этом вопросе будут сосредоточены дальнейшие исследования.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что добавка 0,3 мас. % меди в сплавы Al–0,5Fe и Al–1,7Fe, полученные электромагнитным литьем, приводит к меньшему размеру интерметаллических частиц.

2. Добавление меди в сплавы Al–0,5Fe и Al–1,7Fe повышает их предел прочности (на 16 МПа в сплаве Al–0,5Fe и на 24 МПа в сплаве Al–1,7Fe). Это также привело к снижению электропроводности (на 1,7 % IACS в сплаве Al–0,5Fe и на 8,2 % IACS в сплаве Al–1,7Fe).

3. Содержание железа в исследованных сплавах оказывает большее влияние на свойства сплава, чем содержание меди.

4. Отжиг при 450 °С в течение 2 ч приводит к сфероидизации интерметаллических частиц, сглаживанию их краев и уменьшению площади межфазной границы «частица – матрица». Такая термообработка, приводящая к снижению механической прочности и повышению электропроводности, по-видимому, не влияет на пластичность сплавов.

5. Сплавы, содержащие дополнительную медь, демонстрируют более высокую термическую стабильность – они имеют меньшую величину разупрочнения при термообработке по сравнению с немедными сплавами. Метод литья в электромагнитный кристаллизатор обеспечивает заметное влияние присутствия меди, которое было бы незначительным при традиционных методах литья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Aamir M., Giasin K., Tolouei-Rad M., Vafadar A. A review: drilling performance and hole quality of aluminium alloys for aerospace applications // *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9. № 6. P. 12484–12500. DOI: [10.1016/j.jmrt.2020.09.003](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.09.003).
- Belov N.A., Korotkova N.O., Akopyan T.K., Pesin A.M. Phase composition and mechanical properties of Al–1.5%Cu–1.5%Mn–0.35%Zr(Fe,Si) wire alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. Vol. 782. P. 735–746. DOI: [10.1016/j.jallcom.2018.12.240](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.12.240).
- Cai S.L., Wan J.C., Hao Y.J., Koch C.C. Dual gradient microstructure to simultaneously improve strength and electrical conductivity of aluminum wire // *Materials Science and Engineering: A*. 2020. Vol. 783. Article number 139308. DOI: [10.1016/j.msea.2020.139308](https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139308).
- Lee Keunwon, Song Yongwook, Kim Sehoon, Kim Minsang, Seol Jaebok, Cho Kisub, Choi Hyunjoo. Genetic design of new aluminum alloys to overcome strength-ductility trade-off dilemma // *Journal of Alloys and Compounds*. 2023. Vol. 947. Article number 169546. DOI: [10.1016/j.jallcom.2023.169546](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.169546).
- Genc M., Eloi P., Blandin J.-J., Pascal C., Donnadiu P., De Geuser F., Lhuissier P., Desrayaud C., Martin G. Optimization of the strength vs. conductivity trade-off in an aluminium alloy designed for laser powder bed fusion // *Materials Science and Engineering: A*. 2022. Vol. 858. Article number 144139. DOI: [10.1016/j.msea.2022.144139](https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144139).
- Sasaki T.T., Ohkubo T., Hono K. Microstructure and mechanical properties of bulk nanocrystalline Al-Fe alloy processed by mechanical alloying and spark plasma sintering // *Acta Materialia*. 2009. Vol. 57. № 12. P. 3529–3538. DOI: [10.1016/j.actamat.2009.04.012](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.04.012).
- Zhao Qingru, Qian Zhao, Cui Xiaoli, Wu Yuying, Liu Xiangfa. Optimizing microstructures of dilute Al-Fe-Si alloys designed with enhanced electrical conductivity and tensile strength // *Journal of Alloys and Compounds*. 2015. Vol. 650. P. 768–776. DOI: [10.1016/j.jallcom.2015.08.052](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.08.052).
- Jiang Xinyang, Zhang Ying, Yi Danqing, Wang Haisheng, Deng Xianbo, Wang Bin. Low-temperature creep behavior and microstructural evolution of 8030 aluminum cables // *Materials Characterization*. 2017. Vol. 130. P. 181–187. DOI: [10.1016/j.matchar.2017.05.040](https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.05.040).
- Valiev R.Z., Langdon T.G. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement // *Progress in Materials Science*. 2006. Vol. 51. № 7. P. 881–981. DOI: [10.1016/j.pmatsci.2006.02.003](https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2006.02.003).
- Zhilyaev A.P., Langdon T.G. Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications // *Progress in Materials Science*. 2008. Vol. 53. № 6. P. 893–979. DOI: [10.1016/j.pmatsci.2008.03.002](https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2008.03.002).
- Belov N., Murashkin M., Korotkova N., Akopyan T., Timofeev V. Structure and properties of Al–0.6 Wt.%Zr wire alloy manufactured by direct drawing of electromagnetically cast wire rod // *Metals (Basel)*. 2020. Vol. 10. № 6. P. 1–11. DOI: [10.3390/met10060769](https://doi.org/10.3390/met10060769).
- Belov N., Akopyan T., Korotkova N., Murashkin M., Timofeev V., Fortuna A. Structure and properties of Ca and Zr containing heat resistant wire aluminum alloy manufactured by electromagnetic casting // *Metals (Basel)*. 2021. Vol. 11. № 2. Article number 236. DOI: [10.3390/met11020236](https://doi.org/10.3390/met11020236).
- Murashkin M.Y., Sabirov I., Medvedev A.E., Enikeev N.A., Lefebvre W., Valiev R.Z., Sauvage X. Mechanical and electrical properties of an ultrafine grained Al-8.5wt. % RE (RE=5.4wt.% Ce, 3.1wt.% La) alloy processed by severe plastic deformation // *Materials and Design*. 2016. Vol. 90. P. 433–442. DOI: [10.1016/j.matdes.2015.10.163](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.10.163).
- Медведев А.Е., Жукова О.О., Федотова Д.Д., Мурашкин М.Ю. Механические свойства, электропроводность и термостабильность проволоки из сплавов системы Al-Fe, полученных литьем в электромагнитный кристаллизатор // *Frontier Materials & Technologies*. 2022. № 3-1. С. 96–105. DOI: [10.18323/2782-4039-2022-3-1-96-105](https://doi.org/10.18323/2782-4039-2022-3-1-96-105).
- Medvedev A., Zhukova O., Enikeev N., Kazykhanov V., Timofeev V., Murashkin M. The Effect of Casting Technique and Severe Straining on the Microstructure, Electrical Conductivity, Mechanical Properties and Thermal Stability of the Al–1.7 wt.% Fe Alloy // *Materials*. 2023. Vol. 16. Article number 3067. DOI: [10.3390/ma16083067](https://doi.org/10.3390/ma16083067).
- Mogucheva A.A., Zybakin D.V., Kaibyshev R.O. Effect of annealing on the structure and properties of aluminum alloy Al–8% MM // *Metal Science and Heat Treatment*. 2012. Vol. 53. P. 450–454. DOI: [10.1007/s11041-012-9414-6](https://doi.org/10.1007/s11041-012-9414-6).
- Akopyan T.K., Letyagin N.V., Belov N.A., Koshmin A.N., Gizatulin D.S. Analysis of the Microstructure and Mechanical Properties of a New Wrought Alloy Based on the ((Al) + Al₄(Ca,La)) Eutectic // *Physics of Metals and Metallography*. 2020. Vol. 121. P. 914–919. DOI: [10.1134/S0031918X20080025](https://doi.org/10.1134/S0031918X20080025).
- Cheng Yue, Miyawaki T., Wang Wenyuan, Takata N., Suzuki A., Kobashi M., Kato M. Laser-beam powder bed fusion of Al-Fe-Cu alloy to achieve high strength and thermal conductivity // *Additive Manufacturing Letters*. 2024. Vol. 8. Article number 100191. DOI: [10.1016/j.addlet.2023.100191](https://doi.org/10.1016/j.addlet.2023.100191).
- Aghaali V., Rahimpour M.R., Faraji A., Ebadzadeh T. The effect of microwave radiation on the formation of quasi-crystalline phases in the Al-Cu-Fe system prepared by induction furnace // *Materials Today Commu-*

- nications. 2024. Vol. 38. Article number 107499. DOI: [10.1016/j.mtcomm.2023.107499](https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107499).
20. Zhao Yuliang, He Weixiang, Medina J., Song Dongfu, Sun Zhenzhong, Xue Yanlin, González-Doncel G., Fernández R. Contribution of the Fe-rich phase particles to the high temperature mechanical behaviour of an Al-Cu-Fe alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. 2024. Vol. 973. Article number 172866. DOI: [10.1016/j.jallcom.2023.172866](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.172866).
 21. Белый Д.И. Алюминиевые сплавы для токопроводящих жил кабельных изделий // *Кабели и провода*. 2012. № 1. С. 8–15. EDN: [PWOFCV](https://doi.org/10.1016/j.pwofcv).
 22. Mondolfo L.F. *Aluminum Alloys Structure and Properties*. Oxford: Butterworth, 1976. 971 p.
 23. Jiang Hongxiang, Li Shixin, Zhang Lili, He Jie, Zheng Qiuju, Song Yan, Li Yanqiang, Zhao Jiuzhou. The influence of rare earth element lanthanum on the microstructures and properties of as-cast 8176 (Al-0.5Fe) aluminum alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. 2021. Vol. 859. Article number 157804. DOI: [10.1016/j.jallcom.2020.157804](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157804).
 24. Draissia M., Debili M.-Y. Study of solid-solution hardening in binary aluminium-based alloys // *Open Physics*. 2005. Vol. 3. № 3. P. 395–408. DOI: [10.2478/BF02475646](https://doi.org/10.2478/BF02475646).
- ### REFERENCES
1. Aamir M., Giasin K., Tolouei-Rad M., Vafadar A. A review: drilling performance and hole quality of aluminium alloys for aerospace applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, vol. 9, no. 6, pp. 12484–12500. DOI: [10.1016/j.jmrt.2020.09.003](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.09.003).
 2. Belov N.A., Korotkova N.O., Akopyan T.K., Pesin A.M. Phase composition and mechanical properties of Al–1.5%Cu–1.5%Mn–0.35%Zr(Fe,Si) wire alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, vol. 782, pp. 735–746. DOI: [10.1016/j.jallcom.2018.12.240](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.12.240).
 3. Cai S.L., Wan J.C., Hao Y.J., Koch C.C. Dual gradient microstructure to simultaneously improve strength and electrical conductivity of aluminum wire. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, vol. 783, article number 139308. DOI: [10.1016/j.msea.2020.139308](https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139308).
 4. Lee Keunwon, Song Yongwook, Kim Sehoon, Kim Minsang, Seol Jaebok, Cho Kisub, Choi Hyunjoo. Genetic design of new aluminum alloys to overcome strength-ductility trade-off dilemma. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, vol. 947, article number 169546. DOI: [10.1016/j.jallcom.2023.169546](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.169546).
 5. Genc M., Eloi P., Blandin J.-J., Pascal C., Donnadiu P., De Geuser F., Lhuissier P., Desrayaud C., Martin G. Optimization of the strength vs. conductivity trade-off in an aluminium alloy designed for laser powder bed fusion. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, vol. 858, article number 144139. DOI: [10.1016/j.msea.2022.144139](https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144139).
 6. Sasaki T.T., Ohkubo T., Hono K. Microstructure and mechanical properties of bulk nanocrystalline Al-Fe alloy processed by mechanical alloying and spark plasma sintering. *Acta Materialia*, 2009, vol. 57, no. 12, pp. 3529–3538. DOI: [10.1016/j.actamat.2009.04.012](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.04.012).
 7. Zhao Qingru, Qian Zhao, Cui Xiaoli, Wu Yuying, Liu Xiangfa. Optimizing microstructures of dilute Al-Fe-Si alloys designed with enhanced electrical conductivity and tensile strength. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, vol. 650, pp. 768–776. DOI: [10.1016/j.jallcom.2015.08.052](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.08.052).
 8. Jiang Xinyang, Zhang Ying, Yi Danqing, Wang Haisheng, Deng Xianbo, Wang Bin. Low-temperature creep behavior and microstructural evolution of 8030 aluminum cables. *Materials Characterization*, 2017, vol. 130, pp. 181–187. DOI: [10.1016/j.matchar.2017.05.040](https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.05.040).
 9. Valiev R.Z., Langdon T.G. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement. *Progress in Materials Science*, 2006, vol. 51, no. 7, pp. 881–981. DOI: [10.1016/j.pmatsci.2006.02.003](https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2006.02.003).
 10. Zhilyaev A.P., Langdon T.G. Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications. *Progress in Materials Science*, 2008, vol. 53, no. 6, pp. 893–979. DOI: [10.1016/j.pmatsci.2008.03.002](https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2008.03.002).
 11. Belov N., Murashkin M., Korotkova N., Akopyan T., Timofeev V. Structure and properties of Al–0.6 Wt.%Zr wire alloy manufactured by direct drawing of electromagnetically cast wire rod. *Metals (Basel)*, 2020, vol. 10, no. 6, pp. 1–11. DOI: [10.3390/met10060769](https://doi.org/10.3390/met10060769).
 12. Belov N., Akopyan T., Korotkova N., Murashkin M., Timofeev V., Fortuna A. Structure and properties of Ca and Zr containing heat resistant wire aluminum alloy manufactured by electromagnetic casting. *Metals (Basel)*, 2021, vol. 11, no. 2, article number 236. DOI: [10.3390/met11020236](https://doi.org/10.3390/met11020236).
 13. Murashkin M.Y., Sabirov I., Medvedev A.E., Enikeev N.A., Lefebvre W., Valiev R.Z., Sauvage X. Mechanical and electrical properties of an ultrafine grained Al-8.5wt. % RE (RE=5.4wt.% Ce, 3.1wt.% La) alloy processed by severe plastic deformation. *Materials and Design*, 2016, vol. 90, pp. 433–442. DOI: [10.1016/j.matdes.2015.10.163](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.10.163).
 14. Medvedev A.E., Zhukova O.O., Fedotova D.D., Murashkin M.Yu. The mechanical properties, electrical conductivity, and thermal stability of a wire made of Al-Fe alloys produced by casting into an electromagnetic crystallizer. *Frontier Materials & Technologies*, 2022, no. 3-1, pp. 96–105. DOI: [10.18323/2782-4039-2022-3-1-96-105](https://doi.org/10.18323/2782-4039-2022-3-1-96-105).
 15. Medvedev A., Zhukova O., Enikeev N., Kazykhanov V., Timofeev V., Murashkin M. The Effect of Casting Technique and Severe Straining on the Microstructure, Electrical Conductivity, Mechanical Properties and Thermal Stability of the Al–1.7 wt.% Fe Alloy. *Materials*, 2023, vol. 16, article number 3067. DOI: [10.3390/ma16083067](https://doi.org/10.3390/ma16083067).
 16. Mogucheva A.A., Zyabkin D.V., Kaibyshev R.O. Effect of annealing on the structure and properties of aluminum alloy Al–8% MM. *Metal Science and Heat Treatment*, 2012, vol. 53, pp. 450–454. DOI: [10.1007/s11041-012-9414-6](https://doi.org/10.1007/s11041-012-9414-6).
 17. Akopyan T.K., Letyagin N.V., Belov N.A., Koshmin A.N., Gizatulin D.S. Analysis of the Microstructure and Mechanical Properties of a New Wrought Alloy Based on the ((Al) + Al₃(Ca,La)) Eutectic. *Physics of Metals and Metallography*, 2020, vol. 121, pp. 914–919. DOI: [10.1134/S0031918X20080025](https://doi.org/10.1134/S0031918X20080025).
 18. Cheng Yue, Miyawaki T., Wang Wenyuan, Takata N., Suzuki A., Kobashi M., Kato M. Laser-beam powder bed fusion of Al–Fe–Cu alloy to achieve high strength and thermal conductivity. *Additive Manufacturing*

- ting Letters, 2024, vol. 8, article number 100191. DOI: [10.1016/j.addlet.2023.100191](https://doi.org/10.1016/j.addlet.2023.100191).
19. Aghaali V., Rahimpour M.R., Faraji A., Ebadzadeh T. The effect of microwave radiation on the formation of quasi-crystalline phases in the Al-Cu-Fe system prepared by induction furnace. *Materials Today Communications*, 2024, vol. 38, article number 107499. DOI: [10.1016/j.mtcomm.2023.107499](https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107499).
20. Zhao Yuliang, He Weixiang, Medina J., Song Dongfu, Sun Zhenzhong, Xue Yanlin, González-Doncel G., Fernández R. Contribution of the Fe-rich phase particles to the high temperature mechanical behaviour of an Al-Cu-Fe alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, vol. 973, article number 172866. DOI: [10.1016/j.jallcom.2023.172866](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.172866).
21. Belyy D.I. Aluminum alloys for conductors of cable products. *Kabeli i provoda*, 2012, no. 1, pp. 8–15. EDN: [PWOFCV](https://www.edn.net/PWOFCV).
22. Mondolfo L.F. *Aluminum Alloys Structure and Properties*. Oxford, Butterworth Publ., 1976. 971 p.
23. Jiang Hongxiang, Li Shixin, Zhang Lili, He Jie, Zheng Qiuju, Song Yan, Li Yanqiang, Zhao Jiuzhou. The influence of rare earth element lanthanum on the microstructures and properties of as-cast 8176 (Al-0.5Fe) aluminum alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, vol. 859, article number 157804. DOI: [10.1016/j.jallcom.2020.157804](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157804).
24. Draissia M., Debili M.-Y. Study of solid-solution hardening in binary aluminium-based alloys. *Open Physics*, 2005, vol. 3, no. 3, pp. 395–408. DOI: [10.2478/BF02475646](https://doi.org/10.2478/BF02475646).

The influence of Cu additions on the microstructure and properties of Al–Fe system alloys produced by casting into electromagnetic crystallizer

© 2024

Andrey E. Medvedev¹, PhD (Physics and Mathematics), junior researcher

Olga O. Zhukova², postgraduate student

Aigul F. Shaikhulova³, PhD (Engineering), Associate Professor, senior researcher

Maxim Yu. Murashkin⁴, PhD (Engineering), senior researcher

Ufa University of Science and Technology, Ufa (Russia)

*E-mail: medvedevae@uust.ru,
medvedevandreyrf@gmail.com

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8616-0042>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1879-9389>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3340-3880>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9950-0336>

Received 26.06.2023

Accepted 14.02.2024

Abstract: The modern electrical engineering industry requires cheap and easily reproducible aluminum alloys with advanced mechanical strength and electrical conductivity. This work studies the influence of small (up to 0.3 wt. %) copper additions on the microstructure and physical and mechanical properties, as well as phase transformations in the Al–Fe system alloys with an iron content of 0.5 and 1.7 wt. %, produced by continuous casting into electromagnetic crystallizer. Alloys of the above chemical compositions were produced, and subsequently annealed at 450 °C for 2 h. In all states, the microstructure (via SEM), yield strength, ultimate tensile strength, elongation to failure, and electrical conductivity were studied. It has been shown that copper additions lead to an increase in the strength of both alloys and a slight decrease in their ductility compared to similar materials without copper. An increase in strength and a decrease in ductility due to the copper addition is associated with the formation of more dispersed intermetallic particles in copper-containing Al–Fe system alloys. Additional spheroidizing annealing leads to a decrease in the length of the interphase boundary between the aluminum matrix and iron aluminide particles due to a change in their morphology, which leads to an increase in electrical conductivity. In general, copper-containing alloys showed higher mechanical strength with lower electrical conductivity, as well as higher thermal stability.

Keywords: Al; Al–Fe–Cu; casting into electromagnetic crystallizer; phase transformations; mechanical properties; electrical conductivity; thermal stability.

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 20-79-10133, <https://rscf.ru/project/20-79-10133/>.

The research part of the work was carried out on the equipment of the Core Facility Centre “Nanotech” of Ufa University of Science and Technology. The authors express their gratitude to Professor V.N. Timofeev (Siberian Federal University) for providing the research material.

The paper was written on the reports of the participants of the XI International School of Physical Materials Science (SPM-2023), Togliatti, September 11–15, 2023.

For citation: Medvedev A.E., Zhukova O.O., Shaikhulova A.F., Murashkin M.Yu. The influence of Cu additions on the microstructure and properties of Al–Fe system alloys produced by casting into electromagnetic crystallizer. *Frontier Materials & Technologies*, 2024, no. 2, pp. 77–85. DOI: [10.18323/2782-4039-2024-2-68-7](https://doi.org/10.18323/2782-4039-2024-2-68-7).