

УДК 669.01

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ЖЕЛЕЗА НА ПРОЧНОСТЬ И ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-Fe, ПОДВЕРГНУТЫХ ИПД

О. О. БАЙКЕЕВА¹, А. Е. МЕДВЕДЕВ², Е. Б. МЕДВЕДЕВ³, М. Ю. МУРАШКИН⁴

¹olga.baykeeva@yandex.ru, ²medvedevandreyrf@gmail.com, ³medvedevufa@mail.ru, ⁴m.murashkin.70@gmail.com

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 25.03.2021

Аннотация. Изучена возможность улучшения свойств Al-Fe сплавов с содержанием железа от 1,7 до 3,4 мас.% за счет формирования в них ультрамелкозернистой структуры, используя метод равноканального углового прессования (РКУП). Установлено, что повышение концентрации железа в алюминии приводит в литом состоянии к увеличению объемной доли и размера интерметаллидной фазы Al_xFe_y и сопровождается повышением прочности и снижением электропроводности. Показано, что увеличение циклов обработки заготовок сплавов методом РКУП с 2 до 4 приводит к повышению прочностных характеристик без заметного изменения электропроводности. Дополнительная холодная прокатка позволяет достигнуть более высоких значений механических свойств сплавов.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы; ультрамелкозернистая структура; интенсивная пластическая деформация; равноканальное угловое прессование; микроструктура; предел текучести; прочность; электропроводность; холодная прокатка.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы возрос интерес к альтернативным, по отношению к меди, материалам для изготовления проводов, прежде всего к алюминию, к основным преимуществам которого относят низкую стоимость и сравнительно небольшой вес [1], что весьма важно, например, при использовании проводов как воздушных линий электропередач, а также в оборудовании и машинах различного назначения. В связи с этим разработка научно-обоснованных технических и технологических решений, направленных на повышение комплекса физико-механических и эксплуатационных свойств изделий из алюминиевых сплавов различного назначения, является актуальным направлением современного материаловедения и физики металлов. Известно, что заметное

улучшение свойств может быть достигнуто за счет управления химическим составом и микроструктурой проводниковых сплавов таких систем, как Al-Mg-Si, Al-P3M, Al-Zr и др. Так, в работах [2–5] было показано, что формирование ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры в данных сплавах, используя интенсивную пластическую деформацию (ИПД), позволяет заметно улучшить их прочность без снижения электропроводности и термостойкости.

В данной работе на примере сплавов системы Al-Fe с содержанием железа 1,7 и 3,4 мас.% были проведены исследования, направленные на улучшение свойств проводников на основе алюминия, за счет их обработки ИПД, осуществленной методом равноканального углового прессования (РКУП).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве заявленных материалов для научно-исследовательской работы выступали сплавы на основе алюминия с содержанием железа 1,7 и 3,4 мас.%. Исходные материалы были изготовлены методом литья в водоохлаждаемую изложницу в виде прутков диаметром 22 мм на кафедре обработки металлов давлением НИТУ МИСиС группой проф. Н.А. Белова. Исходные литые заготовки были подвергнуты холодной прокатке на лабораторном сортовом 2-х валковом реверсивном стане фирмы HANKOOK M-TECH INDUSTRIES.

Для деформационной обработки образцов алюминиевых сплавов методом РКУП использовалась установка с углом сопряжения пересекающихся каналов 120° . РКУП обработку заготовок проводили за 2 и 4 цикла при комнатной температуре по маршруту В_С с поворотом вокруг оси на 90° после каждого цикла. В результате такой обработки были получены заготовки размером $10 \times 10 \times 65$ мм.

Дополнительную холодную прокатку (ХП) УМЗ заготовок проводили при комнатной температуре с суммарной степенью обжатия 85 %.

Микроструктура образцов была проанализирована методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) на микроскопе JEOL JSM-6490LV. Съёмка на всех состояниях производилась в режиме вторичных элек-

тронов (SEI). Тонкую структуру исследовали на просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) Jeol JEM-2100.

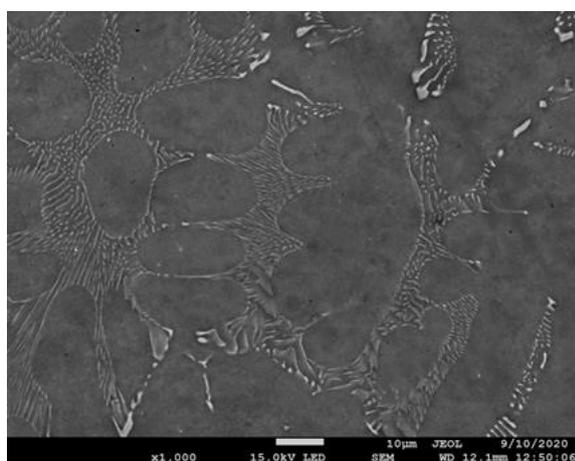
Механические испытания проводили при комнатной температуре на разрывной машине Instron 5982 со скоростью деформации 10^{-3} с^{-1} . Характеристики прочности (условные пределы текучести ($\sigma_{0,2}$) и предел прочности (σ_b)) и пластичности (относительное удлинение до разрушения (δ)) образцов определяли по результатам растяжения образцов с размером рабочей части $1,0 \times 2,0 \times 6,0 \text{ мм}^3$.

Измерение электропроводности осуществляли вихретоковым измерителем цветных металлов ВЭ-27НЦ/4-5 в соответствии с ГОСТ 27333-87.

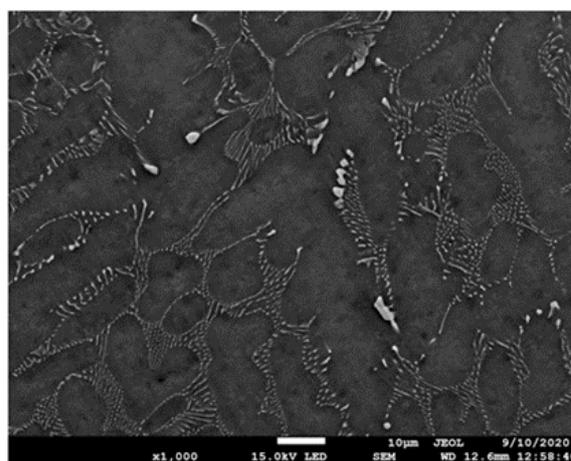
Для обработки изображений и количественных измерений применялось программное обеспечение Image J. Размер структурных элементов оценивался с помощью программного пакета Grain Size.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 1 и 2 представлены изображения микроструктуры исходных литых образцов сплавов Al-Fe. Анализ полученных изображений показал, что микроструктура в центральной зоне литых образцов и на их периферии практически не отличается, что говорит о равномерно прошедшей кристаллизации. В алюминиевой матрице наблюдаются частицы вторых фаз кристаллизационного происхождения.

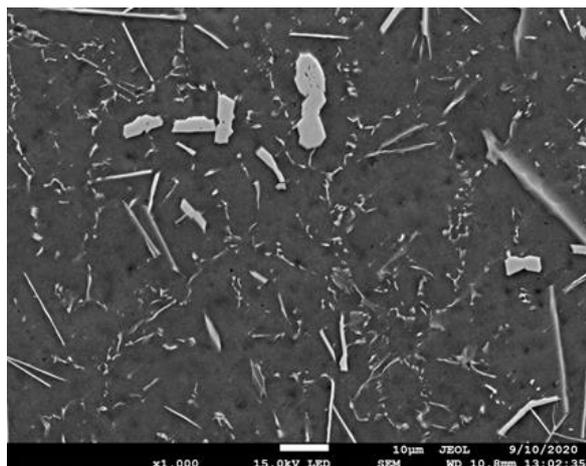


а

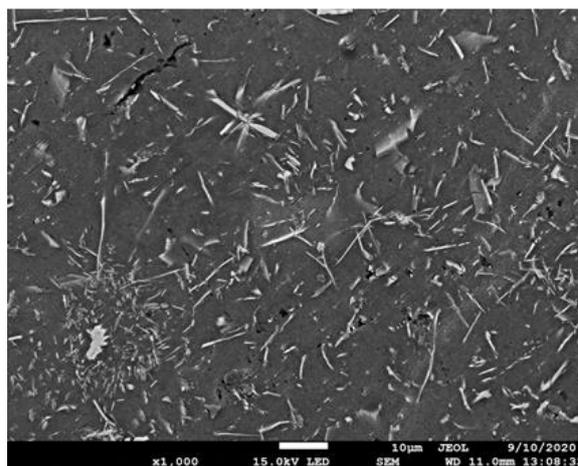


б

Рис. 1. Микроструктура сплава Al-1,7Fe, РЭМ. Темно-серый цвет – алюминиевая матрица, светло-серый цвет – вторая фаза Al_xFe_y (кристаллизационного происхождения): а – центр образца; б – периферия



а



б

Рис. 2. Микроструктура сплава Al-3,4Fe, РЭМ.

Темно-серый цвет – алюминиевая матрица, светло-серый цвет – вторая фаза Al_xFe_γ (кристаллизационного происхождения): а – центр образца; б – периферия

На рис. 1 приведена микроструктура сплава Al-1,7Fe, которая представляет собой смесь алюминия и алюминидов железа, закристаллизованных в виде корсета. Алюминий содержится в матрице и интерметаллидных частицах. Интерметаллидные частицы характеризуются одинаковым размером и отсутствием вариации размера/формы частиц от периферии к центру образца. Оставшееся пространство – чистый алюминий со средним размером дендритной ячейки 11 ± 4 мкм. Интерметаллидные частицы занимают площадь порядка 850 мкм^2 , объемная доля – 8 %.

На рис. 2 проиллюстрирована микроструктура сплава Al-3,4Fe. Она значительно отличается от микроструктуры сплавов с более низким содержанием железа. В ней наблюдаются более грубые интерметаллидные частицы, имеющие преимущественно форму в виде стержней различной длины до 12 ± 4 мкм и шириной до 2 ± 1 мкм, которые хаотично ориентированы в алюминиевой матрице. Площадь, занимаемая интерметаллидными частицами, составляет порядка 1385 мкм^2 , что соответствует 11 % объемной доли.

На рис. 3 представлена микроструктура, сплава Al-1,7Fe после 4 циклов РКУП и дополнительной ХП. Электронно-микроско-

пический анализ методом ПЭМ демонстрирует, что структура после РКУП и дополнительной ХП имеет УМЗ структуру. Количественный анализ показал, что размер зерна составляет 600 ± 30 нм.

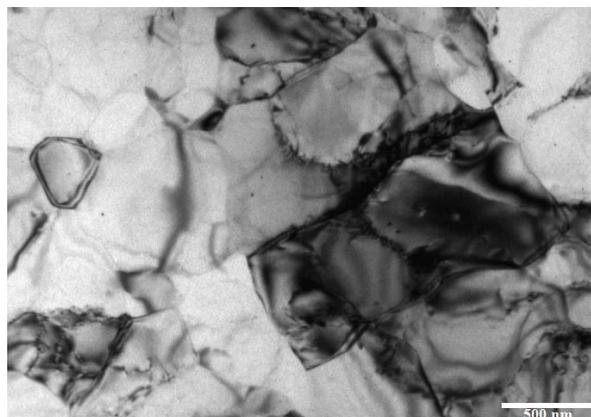


Рис. 3. Микроструктура сплава Al-1,7Fe после 4 цикла РКУП и дополнительной ХП, ПЭМ

Энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия, проведенная прецизионно с частиц вторых фаз и алюминиевой матрицы, позволила установить, что во всех сплавах железо отсутствует в матрице (рис. 4, 5). Кроме того, в составе исследуемых материалов было обнаружено незначительное содержание кремния менее 0,5 мас.% как примеси.

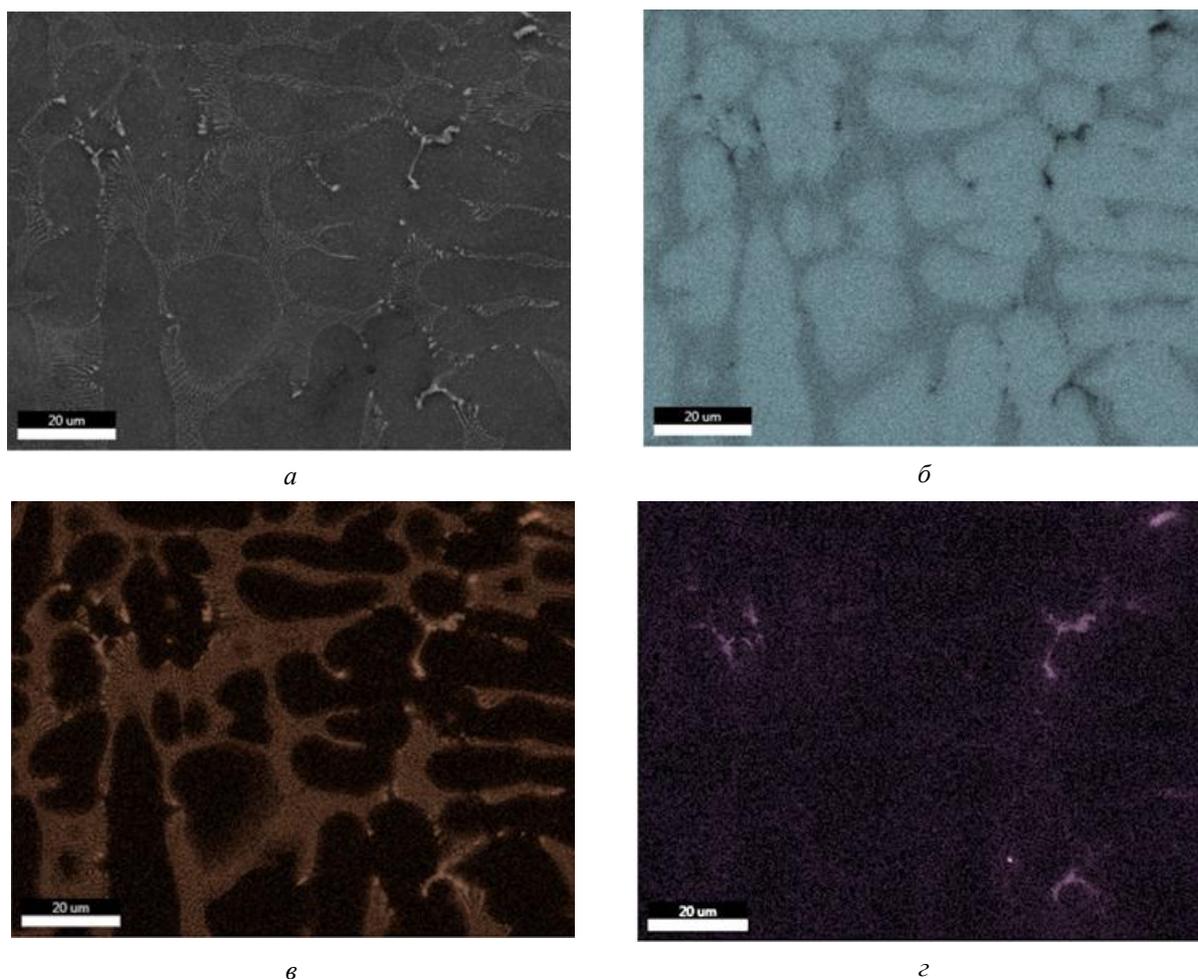


Рис. 4. Поэлементарное картирование микроstructures сплава Al-1,7Fe (а), РЭМ. Распределение химических элементов: б – Al; в – Fe; з – Si

Результаты исследования электропроводности и характеристик прочности алюминиевых сплавов в исходном состоянии и после обработки методом РКУП и после обработки методом РКУП и дополнительной ХП представлены в табл. 1 и 2 соответственно.

Таблица 1

Электропроводность сплавов

| Сплав | Состояние | ω , МСм/м | IACS, % |
|----------|-------------------|------------------|----------------|
| Al-1,7Fe | Литое | $30,36 \pm 0,26$ | $52,2 \pm 0,5$ |
| Al-3,4Fe | | $28,65 \pm 0,48$ | $49,4 \pm 0,8$ |
| Al-1,7Fe | 2 цикла РКУП | $30,56 \pm 0,18$ | $52,7 \pm 0,3$ |
| Al-3,4Fe | | $29,75 \pm 0,28$ | $51,3 \pm 0,5$ |
| Al-1,7Fe | 4 цикла РКУП | $30,27 \pm 0,34$ | $52,2 \pm 0,6$ |
| Al-3,4Fe | | $29,16 \pm 0,32$ | $50,3 \pm 0,5$ |
| Al-1,7Fe | 4 цикла РКУП + ХП | $30,93 \pm 0,19$ | $53,3 \pm 0,4$ |

Таблица 2

Механические свойства сплавов

| Сплав | Состояние | $\sigma_{0,2}$, МПа | σ_B , МПа | δ , % |
|----------|-------------------|----------------------|------------------|----------------|
| Al-1,7Fe | Литое | 140 ± 7 | 185 ± 4 | $9,3 \pm 0,5$ |
| Al-3,4Fe | | 146 ± 6 | 178 ± 3 | $6,9 \pm 0,5$ |
| Al-1,7Fe | 2 цикла РКУП | 179 ± 5 | 186 ± 5 | $10,9 \pm 0,7$ |
| Al-3,4Fe | | 160 ± 7 | 200 ± 3 | $11,3 \pm 1,0$ |
| Al-1,7Fe | 4 цикла РКУП | 179 ± 8 | 201 ± 4 | $9,6 \pm 0,2$ |
| Al-3,4Fe | | 160 ± 5 | 205 ± 4 | $13,0 \pm 1,2$ |
| Al-1,7Fe | 4 цикла РКУП + ХП | 220 ± 4 | 257 ± 1 | $15,9 \pm 1,3$ |

Исследования установили, что увеличение содержания Fe приводит к повышению условного предела текучести и предела прочности, а также уменьшению электропроводности. Наибольшая электропроводность в исходных образцах наблюдается

в наименее легированном сплаве Al-1,7Fe. По-видимому, повышенное содержание интерметаллидных фаз и, соответственно, большая протяженность межфазных границ, приводит к повышению прочности и уменьшению электропроводности в сплаве с большим содержанием железа.

Обработка методом РКУП не оказывает влияние на уровень электропроводности материалов исследования (рис. 6, *а*). Однако РКУП приводит к заметному повышению прочностных свойств сплавов (рис. 6, *б*).

Алюминиевый сплав Al-1,7Fe после 4 циклов РКУП и дополнительной холодной прокатки с суммарной степенью обжатия

85 % показал более высокие значения механических свойств по сравнению с таким же сплавом без дополнительной ХП. Электропроводность данного сплава существенно не изменилась. Как правило, основной причиной изменения электропроводности в металлических материалах является количество содержащихся в них примесей и легирующих элементов [1, 6]. Судя по полученным данным, можно полагать, что в сплавах в результате РКУП не происходит изменения концентрации железа в алюминиевой матрице. Ранее это наблюдалось в подобных сплавах после обработки методом кручения под высоким давлением [7].

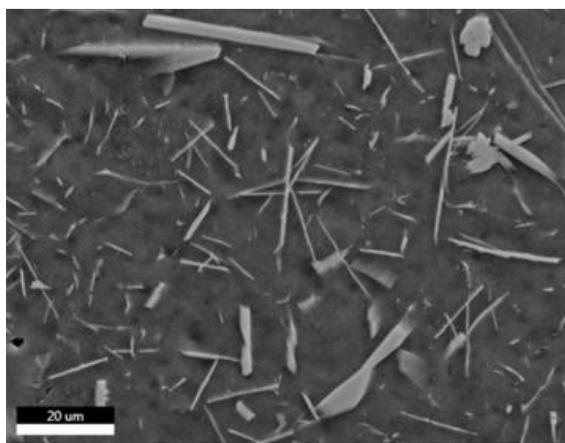
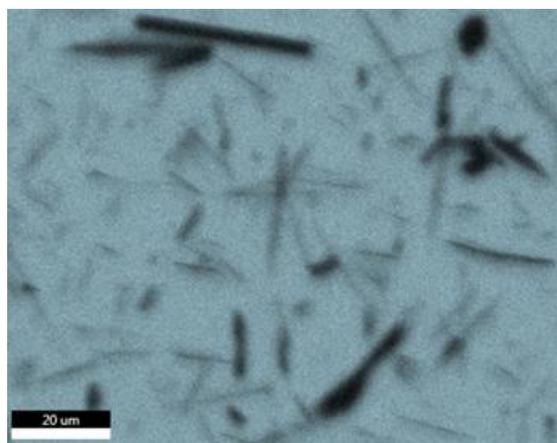
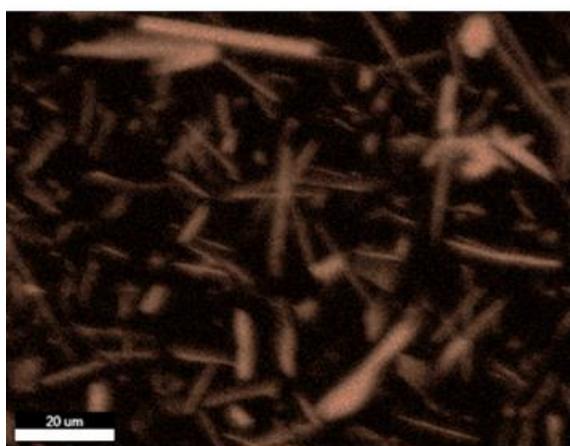
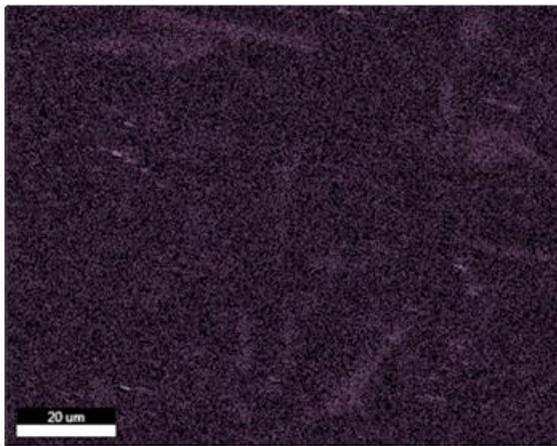
*а**б**в**г*

Рис. 5. Поэлементарное картирование микроструктуры сплава Al-3,4Fe (*а*), РЭМ. Распределение химических элементов: *б* – Al; *в* – Fe; *г* – Si

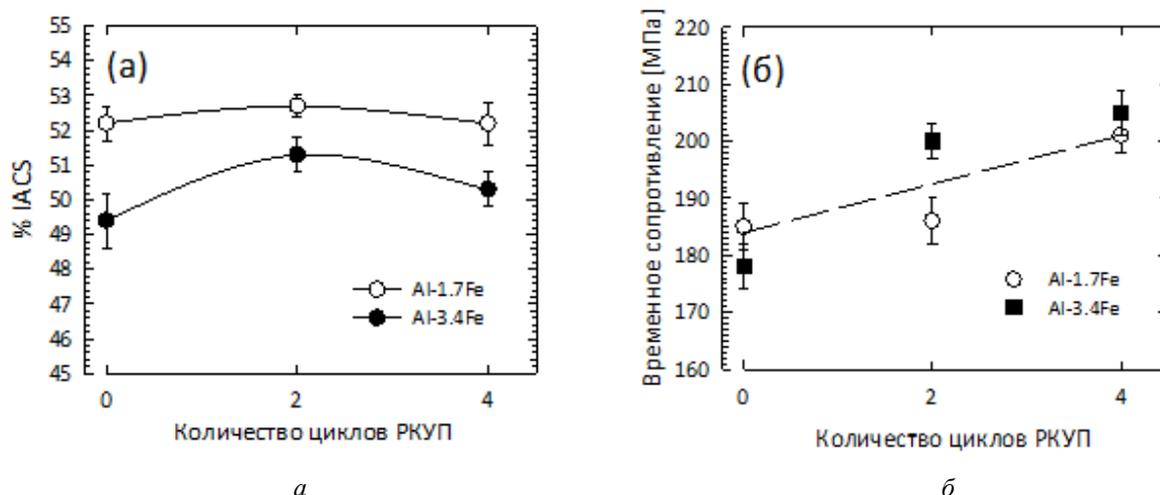


Рис. 6. Изменение свойства сплавов Al-Fe после обработки РКУП:
а – электропроводности; б – временного сопротивления

Известно, что повышение прочности алюминиевых сплавов, подвергнутых интенсивной пластической деформации, например методом РКУП, обусловлено уменьшением среднего размера зерна алюминиевой матрицы, повышением плотности дефектов кристаллического строения (решеточных дислокаций и т.д.), а также наличием в УМЗ структуре наноразмерных частиц вторых фаз [2–7]. Все перечисленные выше особенности микроструктуры характерны и для исследуемых сплавов Al-Fe, обработанных методом РКУП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данной работы исследована взаимосвязь изменения содержания железа в сплавах системы Al-Fe с их физико-механическими свойствами после обработки РКУП при комнатной температуре и холодной прокатки.

Установлено, что повышение в алюминии содержания железа с 1,7 до 3,4 мас.%, приводит к увеличению объемной доли и размера интерметаллидной фазы кристаллизационного происхождения на основе алюминия и железа и сопровождается снижением электропроводности с 52,4 до 44,4 % IACS.

Отмечено, что дополнительная холодная прокатка приводит к более высоким результатам механических свойств алюминиевого сплава за счет уменьшения среднего разме-

ра зерна алюминиевой матрицы, повышения плотности дислокаций.

Полученные промежуточные результаты свидетельствуют о том, что увеличение циклов обработки РКУП с 2 до 4 сопровождается повышением прочности и снижением электропроводности заготовок сплавов.

Авторы выражают особую благодарность Центру коллективного пользования «Нанотех» Уфимского государственного авиационного технического университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Totten G. E.** Physical Metallurgy and Processes. Handbook of Aluminum. NY, USA: CRC Press, 2003. 1310 p. [G. E. Totten, *Physical Metallurgy and Processes. Handbook of Aluminum*. NY, USA: CRC Press, 2003.]
2. **Nanostructured Al and Cu alloys with superior strength and electrical conductivity / M. Yu. Murashkin, et al.** // *Journal of Materials Science*. 2016. Vol. 51, no. 1. Pp. 33-49. [M. Yu. Murashkin, et al., "Nanostructured Al and Cu alloys with superior strength and electrical conductivity", in *Journal of Materials Science*, vol. 51, no. 1, pp. 33-49, 2016.]
3. **Fatigue Properties of Ultra-Fine Grained Al-Mg-Si Wires with Enhanced Mechanical Strength and Electrical Conductivity / A. Medvedev, et al.** // *Metals*. 2018. Vol. 8, no. 12. Pp. 103-109. [A. Medvedev, et al., "Fatigue Properties of Ultra-Fine Grained Al-Mg-Si Wires with Enhanced Mechanical Strength and Electrical Conductivity", in *Metals*, vol. 8, no. 12, pp. 103-109, 2018.]
4. **Mechanical and electrical properties of an ultrafine grained Al-8.5 wt.% RE (RE = 5.4wt.% Ce, 3.1wt.% La) alloy processed by severe plastic deformation / M. Yu. Murashkin, et al.** // *Materials and Design*. 2016. Vol. 9. Pp. 433-442. [M. Yu. Murashkin, et al., "Mechanical and electrical properties of an ultrafine grained Al-8.5 wt.% RE (RE = 5.4wt.% Ce,

3.1wt.% La) alloy processed by severe plastic deformation”, in *Materials and Design*, vol. 9, pp. 433-442, 2016.]

5. **Effect** of annealing on microstructure, strength and electrical conductivity of the pre-aged and HPT-processed Al-0.4 Zr alloy / T. S. Orlova, et al. // *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. Vol. 774. Pp. 41-48. [T. S. Orlova, et al., “Effect of annealing on microstructure, strength and electrical conductivity of the pre-aged and HPT-processed Al-0.4 Zr alloy”, in *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 774, pp. 41-48, 2019.]

6. **Воронцова Л. А., Маслов В. В., Пешков И. Б.** Алюминий и алюминиевые сплавы в электротехнических изделиях. М.: Энергия, 1971. 224 с. [L. A. Vorontsova, V. V. Maslov, I. B. Peshkov, *Aluminum and aluminum alloys in electrical products*, (in Russian). Moscow: Energiya, 1971.]

7. **Optimization** of Strength-Electrical Conductivity Properties in Al-2Fe Alloy by Severe Plastic Deformation and Heat Treatment / A. E. Medvedev, et al. // *Advanced Engineering Materials*. 2018. Vol. 20, no. 3. Pp. 107-115. [A. E. Medvedev, et al., “Optimization of Strength-Electrical Conductivity Properties in Al-2Fe Alloy by Severe Plastic Deformation and Heat Treatment”, in *Advanced Engineering Materials*, vol. 20, no. 3, pp. 107-115, 2018.]

ОБ АВТОРАХ

БАЙКЕЕВА Ольга Олеговна, асп. каф. МиФМ. Дипл. (УГАТУ, 2020). Готовит дис. по разработке и исследованию перспективных проводниковых материалов на основе алюминиевых сплавов системы Al-Fe.

МЕДВЕДЕВ Андрей Евгеньевич, канд. физ.-мат. наук. Дипл. (УГАТУ, 2018). Канд. физ.-мат. наук по спец. нанотехнологии и наноматериалы. Иссл. в обл. разработки принципов повышения механических и эксплуатационных свойств алюминиевых сплавов.

МЕДВЕДЕВ Евгений Борисович, канд. техн. наук, доц. каф. МиФМ. Дипл. (УГАТУ, 2011). Канд. техн. наук по спец. технология машиностроения, станки и инструменты. Иссл. в обл. обработки металлов давлением.

МУРАШКИН Максим Юрьевич, канд. техн. наук, доц. каф. МиФМ. Дипл. (УГАТУ, 2002). Канд. техн. наук по спец. Материаловедение. Иссл. в обл. разработки принципов повышения механических и эксплуатационных свойств алюминиевых сплавов.

METADATA

Title: Influence of iron content on strength and electrical conductivity of Al-Fe system alloys subjected to SPD.

Authors: O. O. Baykееva¹, A. E. Medvedev², E. B. Medvedev³, M. Yu. Murashkin⁴

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ¹olga.baykееva@yandex.ru, ²medvedevandreyrf@gmail.com, ³medvedevufa@mail.ru, ⁴m.murashkin.70@gmail.com

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 25, no. 2 (92), pp. 3-9, 2021. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: In this work, we studied the possibility of improving the properties of Al-Fe alloys with an iron content of 1.7 to 3.4 wt.% due to the formation of an ultrafine-grained

structure in them, using the method of equal channel angular pressing (ECAP). It was found that an increase in the concentration of iron in aluminum leads in the cast state to an increase in the volume fraction and size of the intermetallic phase AlxFey and is accompanied by an increase in strength and a decrease in electrical conductivity. It is shown that an increase in the cycles of processing alloy workpieces by the ECAP method from 2 to 4 leads to an increase in strength characteristics without a noticeable change in electrical conductivity. Additional cold rolling makes it possible to achieve higher values of the mechanical properties of the alloys.

Key words: aluminum alloys; ultrafine-grained structure; severe plastic deformation; equal-channel angular pressing; microstructure; yield strength; strength; electrical conductivity; cold rolling.

About authors:

BAYKEEVA, Olga Olegovna, Postgrad. (PhD) student, Dept. of MiFM. Dipl. (USATU, 2020). Prepares dis. on the development and research of promising conductive materials based on aluminum alloys of the Al-Fe system.

MEDVEDEV, Andrey Evgenievich, Cand. of Phys.-Math. Sci. Dipl. (USATU, 2018). Cand. of Phys.-Math. Sci. on spec. Nanotechnology and nanomaterials. Research in the region development of principles for improving the mechanical and operational properties of aluminum alloys.

MEDVEDEV, Evgeny Borisovich, Cand. of Tech. Sci., Assoc. Prof. Dept. of MiFM. Dipl. (USATU, 2011). Cand. of Tech. Sci. on spec. mechanical engineering technology, machine tools and tools. Research in the processing of metals by pressure.

MURASHKIN, Maxim Yurievich, Cand. of Tech. Sci, Assoc. Prof. Dept. of MiFM. Dipl. (USATU, 2002). Cand. of Tech. Sci. on spec. Material Science. Research in the region development of principles for improving the mechanical and operational properties of aluminum alloys.