Оригинальная статья

УДК 621.785.78:537.636

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-3(53)-43-50

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТЖИГА И ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АК9 ПРИ ИСКУССТВЕННОМ СТАРЕНИИ

© 2025 г. Ю. В. Осинская, С. В. Воронин, С. Г. Магамедова

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева (Россия, 443086, Самара, Московское шоссе, 34)

Аннотация. Актуальной задачей физического материаловедения является улучшение необходимых для эксплуатации свойств металлов и металлических сплавов. Несмотря на значительный прогресс в металловедении и металлургии, в частности в создании новых сплавов, превосходящих по своим свойствам сплавы системы Al – Si, силумины еще длительное время будут занимать лидирующие позиции в промышленности, что связано с их технологичностью при использовании почти во всех видах литья. Для улучшения структуры и физико-механических свойств металлических сплавов применяются различные методы термической обработки. Одним из них является технология искусственного старения, с помощью которой удается существенно изменить физико-механические свойства металлических сплавов. Представлены результаты комплексного экспериментального исследования влияния импульсного магнитного поля на процесс старения алюминиевого сплава АК9. Приведены сведения о химическом составе, режимах термической и термомагнитной обработок и основных экспериментально наблюдаемых закономерностях изменений микротвердости и параметров тонкой структуры алюминиевого сплава АК9, состаренного длительностью 4 ч при температурах от 120 до 250 °С в импульсном магнитном поле амплитудой напряженности 557,2 кА/м и при его отсутствии. Обнаружено, что импульсное магнитное поле в значительной мере влияет на прочностные свойства и структуру алюминиевого сплава АК9, при этом не изменяет стадийности процесса старения. При наложении импульсного магнитного поля средний размер блоков когерентного рассеяния становится больше, а плотность дислокаций и относительная микродеформация меньше, чем при его отсутствии, что свидетельствует о формировании менее искаженной кристаллической решетки. Рентгеновские исследования показали, что временные зависимости параметров тонкой структуры коррелируют с временными зависимостями микротвердости, что согласуется с основными классическими закономерностями процесса старения.

Ключевые слова: алюминиевый сплав, закалка, отжиг, старение, импульсное магнитное поле, микротвердость, рентгеновский анализ, дислокации, параметры тонкой структуры

Для цитирования: Осинская Ю.В., Воронин С.В., Магамедова С.Г. Влияние температуры отжига и импульсного магнитного поля на физические свойства алюминиевого сплава АК9 при искусственном старении. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;3(53):43–50. *http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-3(53)-43-50*

Original article

INFLUENCE OF ANNEALING TEMPERATURE AND PULSED MAGNETIC FIELD ON PHYSICAL PROPERTIES OF ALUMINUM ALLOY AK9 DURING ARTIFICIAL AGING

© 2025 Yu. V. Osinskaya, S. V. Voronin, S. G. Magamedova

Samara National Research University (34 Moskovskoe shosse, Samara, Samara region, 443086, Russian Federation)

Abstract. An urgent task of physical materials science is to improve the properties of metals and metal alloys necessary for operation. Despite significant progress in metal science and metallurgy, in particular in the creation of new alloys superior in their properties to alloys of the Al – Si system, silumins will occupy a leading position in

industry for a long time, which is associated with their manufacturability when used in almost all types of casting. Various methods of heat treatment are used to improve the structure and physico-mechanical properties of metal alloys. One of them is the technology of artificial aging, with the help of which it is possible to significantly change the physical and mechanical properties of metal alloys. The results of a comprehensive experimental study of the effect of a pulsed magnetic field on the aging process of AK9 aluminum alloy are presented. Information is provided on the chemical composition, modes of thermal and thermomagnetic treatments, and the main experimentally observed patterns of changes in microhardness and fine structure parameters of AK9 aluminum alloy aged for 4 hours at temperatures from 120 to 250 °C in a pulsed magnetic field with an amplitude of 557.2 kA/m and in its absence. It was found that the pulsed magnetic field significantly affects the strength properties and structure of the AK9 aluminum alloy, while it does not change the stages of the aging process. When a pulsed magnetic field is applied, the average size of coherent scattering blocks becomes larger, and the dislocation density and relative microdeformation are smaller than in its absence, which indicates the formation of a less pronounced crystal lattice. X-ray studies have shown that the time dependences of fine structure parameters correlate with the time dependences of microhardness, which is consistent with the basic classical laws of the aging process.

Keywords: aluminum alloy, quenching, annealing, aging, pulsed magnetic field, microhardness, X-ray analysis, dislocations, fine structure parameters

For citation: Osinskaya J.V., Voronin S.V., Magamedova S.G. Influence of annealing temperature and pulsed maghetic field on physical properties of aluminum alloy AK9 during artificial aging. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;3(53):43–50. *http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-3(53)-43-50*

Введение

Термическая обработка металлических сплавов является одним из инструментов повышения эксплуатационных и конструкционных свойств деталей, изготовленных, в частности, из сплавов на основе алюминия. Современная классификация алюминиевых сплавов делит их на термически упрочняемые и не упрочняемые. Эффект упрочнения достигается за счет образования в пересыщенном твердом растворе зон Гинье-Престона и когерентных фаз [1 – 8]. В настоящее время наблюдается повышенный интерес к термической обработке материалов (металлов и сплавов, под воздействием магнитных полей). Появление новых количественных данных об эффекте влиянии магнитных полей на диффузионно-контролируемые процессы в порошковых, поликристаллических и монокристаллических веществах [9 – 12] обуславливает необходимость его практического использования в современных технологиях искусственного старения. Это позволяет получать материалы с модифицированными структурой и физико-механическими свойствами, в частности, это хорошо наблюдается в алюминиевых сплавах [8 – 11]. Физическая природа эффекта изменения структуры и свойств сплавов в результате наложения магнитных полей остается дискуссионной.

Целью настоящей работы является комплексное экспериментальное исследование искусственного старения алюминиевого сплава АК9 в импульсном магнитном поле амплитудой напряженности 557,2 кА/м, частотой 2 Гц, длительностью 4 ч при температуре отжига от 120 до 250 °С методами микротвердости и рентгеноструктурного анализа.

Методы и принципы исследования

Исследование искусственного старения проводили на образцах алюминиевого сплава АК9, химический состав которого приведен в табл. 1.

Образцы исследуемого сплава представляли собой цилиндры диаметром и высотой примерно 10 мм, которые предварительно подвергали закалке. Образцы одновременно выдерживали в печи в атмосфере воздуха при температуре 535 °С длительностью 4 ч, затем охлаждали, быстро погружая в воду температурой 20 ± 0,5 °С. Режимы старения выбирали на основе литературных данных и результатов, ранее проведенных исследований [13 – 17]: процесс проводили в вакууме 10^{-3} Па при температуре от 120 до 250 °С в течение 4 ч в импульсном магнитном поле амплитудой напряженности 557,2 кА/м и частотой 2 Гц и при его отсутствии.

Таблица 1

Химический состав алюминиевого сплава марки АК9

Table 1. **Chemical composition of aluminum alloy AK9**

Элемент	Al	Si	Cu	Fe	Mn	Zn	Mg	Ni
Содержание в сплаве, %	85 – 91	8 – 11	до 1	до 1	0,2 – 0,5	0,5	0,2 – 0,4	до 0,3
Радиус атома, Å	1,43	1,32	1,28	1,40	1,27	1,38	1,60	1,24

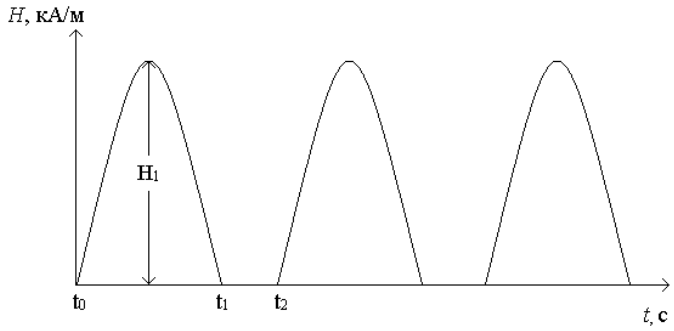

Рис. 1. Форма сигнала импульсного магнитного поля
Fig. 1. The shape of the pulse magnetic field signal

Магнитное поле создавали электромагнитом ФЛ-1 с электронным блоком питания и управления. Форму сигнала импульсного магнитного поля можно описать следующим выражением:

$$\mathrm{H}(t) = \begin{cases} H_1 \sin(2\pi\nu t),\ 0 < t < t_1; \\ 0,\ t_1 < t < t_1 + t_2, \end{cases}$$

где H_1 – амплитуда напряженности импульсной гармонической составляющей магнитного поля; ν – частота магнитного поля; t_1 – время импульса; t_2 – время паузы (задержки импульса); $t_1/t_2 \approx 0{,}5 \pm 0{,}1$.

Форма сигнала импульсного магнитного поля изображена на рис. 1, его характеристики представлены в табл. 2.

В настоящей работе для исследования процесса старения алюминиевого сплава в импульсном магнитном поле изучали микротвердость и рентгеноструктурный анализ образцов.

Микротвердость по методу Виккерса [18] определяли с помощью микротвердомера HAUSER при нагрузке 0,98 Н. Каждое значение микротвердости получали путем усреднения 30 измерений. Относительная ошибка среднего значения микротвердости исследуемого материала составила 2 – 3 %.

С целью расчета параметров тонкой структуры необходимо было методом аппроксимации [19 – 21] определить истинное физическое уширение. Этот метод позволяет по изменениям формы дифракционных линий определять размеры когерентно рассеивающих блоков, относительную микродеформацию и плотность дислокаций. Для этого записывали дифракционные линии эталона (закаленного образца) и алюминиевого сплава марки АК9, состаренного в импульсном магнитном поле и при его отсутствии. Далее подбирали функцию, которая наиболее точно описывала форму дифракционных линий. Было установлено, что профиль дифракционных линий наилучшим образом описывается функцией $(1 + a_1x_2)^{-1}$, истинное физическое уширение дифракционных линий $(311)_\alpha$ вычисляли по следующей формуле:

Таблица 2

Характеристики импульсного магнитного поля
Table 2. **Characteristics of pulsed magnetic field**

Параметр	Значение параметра	
H_1, кА/м	557,2	
H_1, дел.	28,5	шкала 1
H_1, (РУЧКА Г6-27)	1,1	
f, Гц	2	
τ_1, дел.	12	шкала 0,20
τ_2, дел.	12	
τ_1, с	0,24	
τ_2, с	0,24	
τ_1/τ_2	1	
$T_{эксп}$, с	0,48	
$T_{теор}$, с	0,50	
$H_{отр}$, дел.	1	шкала 1
$H_{отр}$, кА/м	19,5	

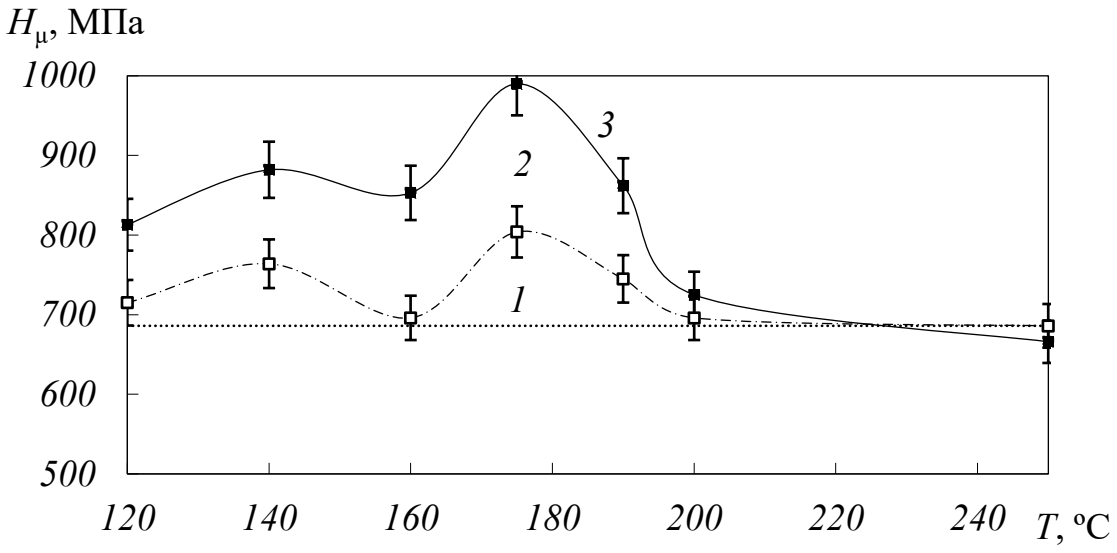

Рис. 2. Температурная зависимость микротведости алюминиевого сплава марки АК9 после термической и термомагнитной обработок:
1 – после закалки; *2* и *3*– старение при наложении импульсного магнитного поля и без него
Fig. 2. Temperature dependence of microhardness of aluminum alloy AK9 after thermal and thermomagnetic treatments:
1 – after quenching; *2* and *3* – aging with and without pulsed magnetic field

$$\beta = B - b,$$

где B – интегральная ширина дифракционных линий состаренных образцов; b – ширина дифракционной линии эталона.

Используя полученные значения истинного физического уширения, определяли параметры тонкой структуры сплава, а именно средний размер ($\langle D \rangle$) блоков когерентного рассеяния, плотность ($\langle \rho \rangle$) дислокаций и относительную микродеформацию ($\langle \Delta d/d \rangle$) по следующим формулам:

$$\langle D \rangle = 0{,}94\lambda \frac{1}{\beta_{311}} \sec \vartheta_{311};$$

$$\left\langle \frac{\Delta d}{d} \right\rangle = 0{,}25\beta_{311} \mathrm{ctg}\vartheta_{311};$$

$$\rho = \frac{3}{\langle D \rangle^2},$$

где ϑ_{311} – брэгговский угол отражения $(311)_\alpha$; β_{311} – физическое уширение дифракционных линий; λ – длина волны Co K_α-излучения.

Основные результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлены результаты измерений микротвердости алюминиевого сплава марки АК9, а также изображены температурные зависимости микротвердости, среднее значение которой в закаленном состоянии составляет 686 МПа. Полученное значение согласуется с литературными данными работы [14], что свидетельствует о достоверности результатов.

При старении без наложения магнитного поля во всем интервале температур наблюдается увеличение микротвердости сплава по сравнению с закаленным состоянием. Полученное изменение микротвердости сплава можно объяснить тем, что в результате старения выделяются упрочняющие фазы (Si и Mg_2Si), которые тормозят движение дислокаций, и, как следствие, повышают прочность сплава. Факт наличия фаз подтвержден результатами рентгенофазового анализа [16].

Наложение импульсного магнитного поля для старения сплава приводит практически всегда к уменьшению микротвердости до 18 %. Это можно объяснить тем, что при старении в импульсном магнитном поле структура алюминиевого сплава марки АК9 испытывает значительные изменения, становится более совершенной, однородной и менее искаженной как показали результаты рентгеновского анализа. Движущиеся дислокации встречают на своем пути меньшее количество препятствий (фазы, границы зерен и другие), сплав становится более пластичным. Процесс старения при температурах от 120 до 140 °С идет недостаточно интенсивно, так как такие температуры старения являются слишком низкими для заметных атомных перескоков, контролирующих структурные и фазовые превращения. При увеличении температуры от 200 до 250 °С процесс старения идет наиболее интенсивно и завершается при кратковременных отжигах, что установлено при исследовании временных зависимостей микротвердости исследованного сплава.

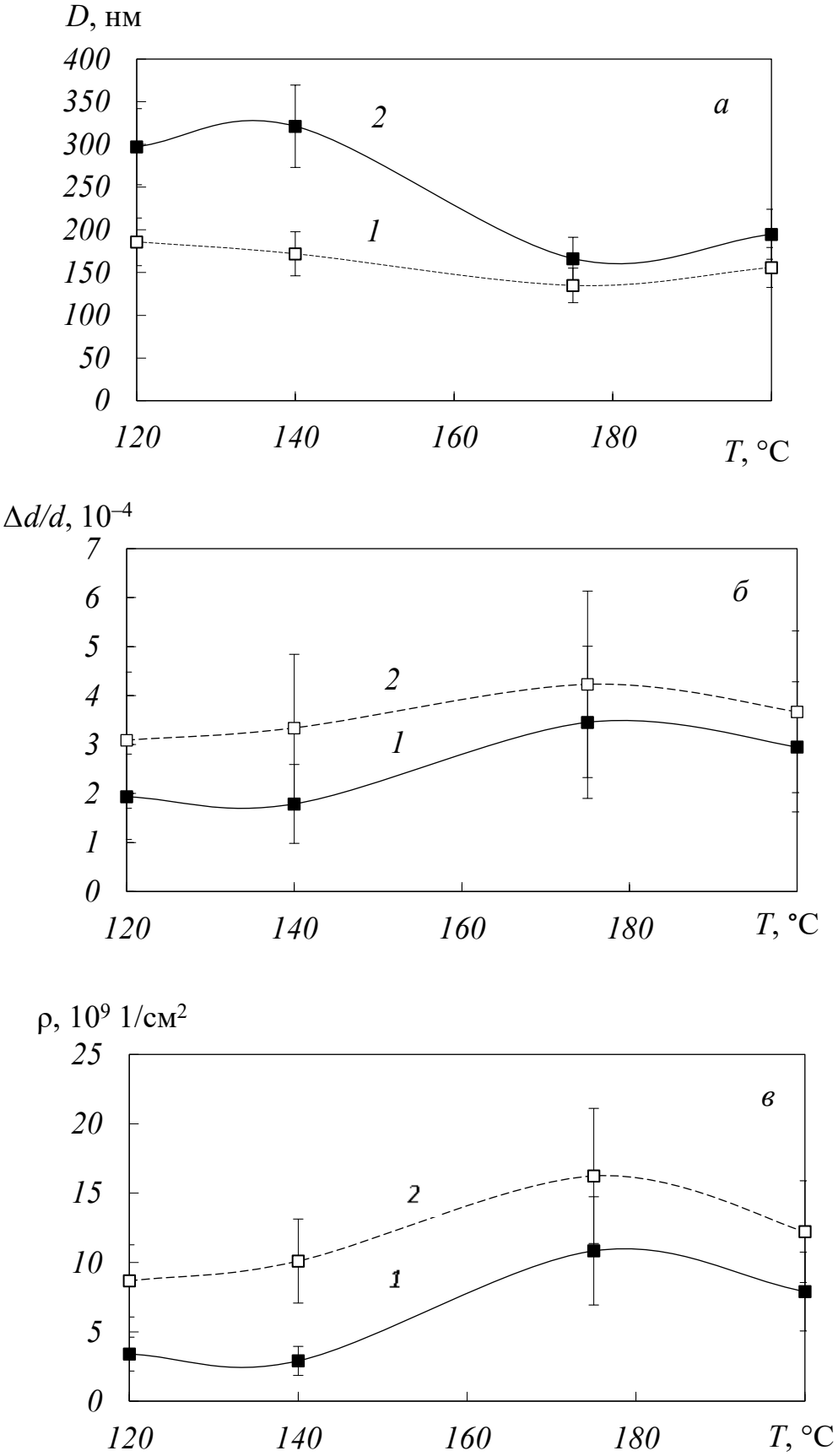

Рис. 3. Температурная зависимость среднего размера блоков когерентного рассеивания (*а*), относительной микродеформации (*б*) и плотности дислокаций (*в*) алюминиевого сплава марки АК9: *1* и *2* – старение без и при наложении импульсного магнитного поля

Fig. 3. Temperature dependence of the average size of coherent scattering blocks (*a*), relative microdeformation (*б*) and dislocation density (*в*) of AK9 aluminum alloy: *1* and *2* – aging without and with the application of a pulsed magnetic field

Выявлено, что импульсное магнитное поле не изменяет стадийности процесса старения исследуемого сплава: максимумы и минимумы значений микротвердости наблюдаются при одном и том же времени старения. При температуре 175 °С наблюдается резкий максимум микротвердости, причем как в импульсном магнитном поле, так и без него (рис. 1). Рассматриваемая микротвердость согласуется с данными работы [8], согласно которым именно эта температура является оптимальной температурой старения алюминиевого сплава марки АК9.

Построены температурные зависимости параметров тонкой структуры для образцов, состаренных в импульсном магнитном поле и без него (рис. 3).

Наложение импульсного магнитного поля при всех исследованных температурах старения приводит к увеличению среднего размера блоков когерентного рассеяния в 1,9 раз и к уменьшению плотности дислокаций в 3,5 раз и относительной микродеформации в 1,8 раз по сравнению со старением без магнитного поля. Подобное поведение параметров тонкой структуры при старении в импульсном магнитном поле указывает на то, что структура сплава становится более однородной и менее искаженной. Наложение импульсного магнитного поля приводит к уширению дифракционных линий до 2,3 раз.

Обнаружено, что при всех режимах термической обработки температурные зависимости параметров тонкой структуры коррелируют с температурными зависимостями микротвердости: максимальной микротвердости сплава при температуре 175 °С соответствуют минимальный средний размер блоков когерентного рассеяния и максимальные плотность дислокаций и относительная микродеформация.

Выводы

При старении алюминиевого сплава марки АК9 в импульсном магнитном поле микротвердость сплава уменьшается до 18 %, при этом его пластические свойства возрастают. По результатам рентгеноструктурного анализа это связано с формированием однородной и менее искаженной структурой сплава. Максимальное значение микротвердости наблюдается при температуре 175 °С.

При наложение импульсного магнитного поля на алюминиевый сплав марки АК9 средний размер блоков когерентного рассеяния больше, а плотность дислокаций и относительная микродеформация меньше, чем при отсутствии магнитного поля. Обнаружена корреляция между температурными зависимостями параметров тонкой структуры и микротвердости сплава.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шарипов К.А., Ибрахимов Ф.Ф. Исследование и подбор оптимальных параметров процесса искусственного старения низколегированных алюминиевых сплавов системы AlMgSi по критерию твердости. *Universum: технические науки*. 2023;5-3(110):15–18. *https://doi.org/10.32743/UniTech.2023.110.5.15534*
2. Каблов Е.Н., Белов Е.В., Трапезников А.В., Леонов А.А., Зайцев Д.В. Особенности упрочнения и кинетики старения литейного алюминиевого высокопрочного сплава на основе системы Al – Si – Cu – Mg. *Авиационные материалы и технологии*. 2021;2(63):24–34. *https://doi.org/10.18577/2713-0193-2021-0-2-24-34*
3. Носова Е.А., Амосов А.П. Исследование искажений кристаллической решетки в твердом растворе алюминиевого сплава Д16 (АА2024) после отжига и старения. *Ползуновский вестник*. 2022;4-2:125–132. *https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.016*
4. Zi Y., John B. Natural and artificial ageing in aluminium alloys – the role of excess vacancies. *Acta Materialia*. 2021;215:1–11. *https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.117014*
5. Бенариеб И., Пучков Ю.А., Сбитнева С.В., Зайцев Д.В. Исследование распада пересыщенного твердого раствора при закалочном охлаждении листов из алюминиевого сплава Al – Mg – Si. *Физика металлов и металловедение*. 2023;124(9):838–845. *https://doi.org/10.31857/S0015323023600843*
6. Honggang Zhang, Rui Chen, Xiaomei Gu. Effect of aging process on precipitated phase and properties of mechanical extruded aluminum alloy. *Journal of Measurements in Engineering*. 2024;12(2):270–283. *https://doi.org/10.21595/jme.2024.23724*
7. Andoko A., Yanuar R., Puspitasari P., Ariestoni T.B., The effects of artificial-aging temperature on tensile strength, hardness, microstructure, and fault morphology in AlSiMg. *Journal of Achievements of Materials and Manufacturing Engineering*. 2020;2(98):49–55. *https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.1480*
8. Yang Z., Jiang X.H., Zhang Liu X.-P., M., Liang Z.Q., Leyvraz D., Banhart J., Natural ageing clustering under different quenching conditions in an Al – Mg – Si alloy. *Acta Materialia*. 2021; 215:1–13. *https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.117014*
9. Загуляев Д.В., Коновалов С.В., Громов В.Е. Влияние слабых магнитных полей на микротвердость поликристаллического алюминия. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика. Механика. Физика»*. 2010;9:53–56.
10. Моргунов Р.Б., Валеев Р.А., Скворцов А.А., Королев Д.В., Пискорский В.П., Куницыны Е.И., Кучеряев В.В., Коплак О.В. Магнитопластический и магнитомеханический эффекты в алюминиевых сплавах с магнитострикционными микровключениями. *Труды ВИАМ*. 2019;10(82):3–13.

https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-10-3-13

11. Jun L., Hongyun L., Chu L., Tianshu Z., Runze W., Yue M. Effect of magnetic field on precipitation kinetics of an ultrafine grained Al – Zn – Mg – Cu alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2020;798:139990 *https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139990*

12. Koch C.C. Experimental evidence for magnetic or electric field effects on phase transformations. *Materials Science and Engineering: A*. 2000;287:213–218. *https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)00778-4*

13. Аристова Н.А., Колобнев И.Ф. *Термическая обработка литейных алюминиевых сплавов*. Москва. Металлургия, 1977:144.

14. Беляев А.И., Бочвар О.С., Буйнов Н.Н., Колобнев Н.И., Колпачев А.А., Костюков Л.А., Походаев К.С., Сенаторова О.Г., Романова Р.Р., Ткаченко Е.А., Фридляндер И.Н. *Металловедение алюминия и его сплавов*. Москва: Металлургия. 1983:280.

15. Осинская Ю.В., Магамедова С.Г., Покоев А.В. Влияние амплитуды напряженности импульсного магнитного поля на параметры магнитопластического эффекта в состаренном алюминиевом сплаве Al – Si – Cu – Fe. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2024;1:17–22. *https://doi.org/10.31857/S1028096024010031*

16. Осинская Ю.В., Покоев А.В., Магамедова С.Г. Влияние напряженности постоянного магнитного поля на процесс фазообразования в состаренном алюминиевом сплаве Al – Si – Cu – Fe. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2022;2:80–84. *https://doi.org/10.31857/S1028096022020091*

17. Осинская Ю.В., Покоев А.В., Магамедова С.Г. Влияние частоты импульсного магнитного поля на старение алюминиевого сплава Al – Si – Cu – Fe. *Известия РАН. Серия физическая*. 2021;85.7:1018–1023. *https://doi.org/10.31857/S0367676521070176*

18. Геллер Ю.А. *Материаловедение*. Москва: Металлургия, 1989:456.

19. Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. *Рентгенографический и электронно-микроскопический анализ*. Москва: МИСИС, 2002:360.

20. Семенова О.Р. *Рентгенографическое исследование тонкой структуры твердых тел*. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет. 2018:96.

21. Волков Н.В., Скрытный В.И., Филиппов В.П., Яльцев В.Н. *Методы исследования структурно-фазового состояния материалов*. Москва: МИФИ. 2008:808.

REFERENCES

1. Sharipov K.A., Ibrakhimov F.F. Research and selection of optimal parameters of the process of artificial aging of low-alloy aluminum alloys of the AlMgSi system according to the hardness criterion. *Universum: tekhnicheskie nauki*. 2023;5-3(110):15–18. (In Russ.). *https://doi.org/10.32743/UniTech.2023.110.5.15534*

2. Kablov E.N., Belov E.V., Trapeznikov A.V., Leonov A.A., Zaitsev D.V. Features of hardening and kinetics of aging of cast aluminum high-strength alloy based on the Al-Si-Cu-Mg system. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*. 2021;2(63):24–34. (In Russ.). *https://doi.org/10.18577/2713-0193-2021-0-2-24-34*

3. Nosova E.A., Amosov A.P. Study of crystal lattice distortions in a solid solution of aluminum alloy D16 (AA2024) after annealing and aging. *Polzunovskii vestnik*. 2022;4-2:125–132. (In Russ.). *https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.016*

4. Zi Y., John B. Natural and artificial ageing in aluminium alloys – the role of excess vacancies. *Acta Materialia*. 2021;215:1–11. *https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.117014*

5. Benarieb I., Puchkov Yu.A., Sbitneva S.V., Zaitsev D.V. Study of the decomposition of supersaturated solid solution during quench cooling of sheets of aluminum alloy Al-Mg-Si. *Fizika metallov i metallovedenie*. 2023;124(9):838–845. (In Russ.). *https://doi.org/10.31857/S0015323023600843*

6. Honggang Zhang, Rui Chen, Xiaomei Gu. Effect of aging process on precipitated phase and properties of mechanical extruded aluminum alloy. *Journal of Measurements in Engineering*. 2024;12(2):270–283. *https://doi.org/10.21595/jme.2024.23724*

7. Andoko A., Yanuar R., Puspitasari P., Ariestoni T.B., The effects of artificial-aging temperature on tensile strength, hardness, microstructure, and fault morphology in AlSiMg. *Journal of Achievements of Materials and Manufacturing Engineering*. 2020;2(98):49–55. *https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.1480*

8. Yang Z., Jiang X.H., Zhang X.-P., Liu M., Liang Z.Q., Leyvraz D., Banhart J. Natural ageing clustering under different quenching conditions in an Al – Mg – Si alloy. *Acta Materialia*. 2021; 215:1–13. *https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.117014*

9. Zagulyaev D.V., Konovalov S.V., Gromov V.E. The influence of weak magnetic fields on the microhardness of polycrystalline aluminum. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Matematika. Mekhanika. Fizika»*. 2010;9:53–56. (In Russ.).

10. Morgunov R.B., Valeev R.A., Skvortsov A.A., Korolev D.V., Piskorskii V.P., Kunitsyny E.I., Kucheryaev V.V., Koplak O.V. Magnetoplastic and magnetomechanical effects in aluminum alloys with magnetostrictive microinclusions.

Trudy VIAM. 2019;10(82):3–13. (In Russ.). *https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-10-3-13*

11. Jun L., Hongyun L., Chu L., Tianshu Z., Runze W., Yue M. Effect of magnetic field on precipitation kinetics of an ultrafine grained Al – Zn – Mg – Cu alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2020;798:139990. *https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139990*

12. Koch C.C. Experimental evidence for magnetic or electric field effects on phase transformations. *Materials Science and Engineering: A*. 2000;287:213–218. *https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)00778-4*

13. Aristova N.A., Kolobnev I.F. *Heat treatment of cast aluminum alloys*. Moscow: Metallurgiya. 1977:144. (In Russ.).

14. Belyaev A.I., Bochvar O.S., Buinov N.N., Kolobnev N.I., Kolpachev A.A., Kostyukov L.A., Pokhodaev K.S., Senatorova O.G., Romanova R.R., Tkachenko E.A., Fridlyander I.N. *Metallurgy of aluminum and its alloys*. Moscow: Metallurgiya. 1983:280. (In Russ.).

15. Osinskaya Yu.V., Magamedova S.G., Pokoev A.V. The influence of the amplitude of the pulsed magnetic field on the parameters of the magnetoplastic effect in the aged aluminum alloy Al – Si – Cu – Fe. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neitronnye issledovaniya*. 2024; 1:17–22. (In Russ.). *https://doi.org/10.31857/S1028096024010031*

16. Osinskaya Yu.V., Pokoev A.V., Magamedova S.G. The influence of constant magnetic field intensity on the phase formation process in aged aluminum alloy Al – Si – Cu – Fe. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neitronnye issledovaniya*. 2022;2:80–84. (In Russ.). *https://doi.org/10.31857/S1028096022020091*

17. Osinskaya Yu.V., Pokoev A.V., Magamedova S.G. Study of pulsed magnetic field on aging of aluminum alloy Al–Si–Cu–Fe. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Series Obraz*. 2021;85.7:1018–1023. (In Russ.). *https://doi.org/10.31857/S0367676521070176*

18. Geller Yu.A. *Materials Science*. Moscow: Metalllurgiya, 1989:456. (In Russ.).

19. Gorelik S.S., Skakov Yu.A., Rastorguev L.N. *X-ray and electron microscopic analysis*. Moscow: MISIS, 2002:360. (In Russ.).

20. Semenova O.R. *X-ray diffraction study of fine structure of solids*. Perm': Perm State National Research University. 2018:96. (In Russ.).

21. Volkov N.V., Skrytnyi V.I., Filippov V.P., Yal'tsev V.N. *Methods of studying the structural and phase state of materials*. Moscow: MIFI. 2008:808. (In Russ.).

Сведения об авторах:

***Юлия Владимировна Осинская**, к.ф-м.н., заведующий кафедрой физики твердого тела, руководитель Центра развития компетенций,* Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
***E-mail**:* ojv76@mail.ru
***ORCID**:* 0000-0002-4586-4596
***SPIN-код**:* 4675-6648

***Селимат Габибуллаевна Магамедова**, ассистент кафедры физики твердого тела,* Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
***E-mail**:* shakhbanova.sg@ssau.ru
***ORCID**:* 0009-0006-9370-6177
***SPIN-код**:* 5960-059

***Сергей Васильевич Воронин**, к.т.н., доцент кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения,* Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
***E-mail**:* voronin.sv@ssau.ru
***ORCID**:* 0000-0002-4370-9832
***SPIN-код**:* 5010-5268

Information about the authors:

***Yulia V. Osinskaya**, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Solid State Physics and Nonequilibrium Systems,* Samara National Research University
***E-mail**:* ojv76@mail.ru
***ORCID**:* 0000-0002-4586-4596
***SPIN-код**:* 4675-6648

***Selimat G. Magamedova**, assistant, Department of Solid State Physics,* Samara National Research University
***E-mail**:* shakhbanova.sg@ssau.ru
ORCID 0009-0006-9370-6177
***SPIN-код**:* 5960-059

***Sergey V. Voronin**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Metal Technology and Aviation Materials Science*, Samara National Research University
***E-mail**:* voronin.sv@ssau.ru
***ORCID**:* 0000-0002-4370-9832
***SPIN-код**:* 5010-5268

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 29.04.2025
После доработки 02.06.2025
Принята к публикации 10.06.2025

Received 29.04.2025
Revised 02.06.2025
Accepted 10.06.2025