

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 621.785.78:537.636

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.02.010

РОЛЬ ЛЕГИРУЮЩИХ ПРИМЕСЕЙ И ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ФОРМИРОВАНИИ МИКРОСТРУКТУРЫ И МИКРОТВЕРДОСТИ СОСТАРЕННЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ Al-Zn, Al-Zn-Mg И Al-Zn-Mg-Cu

Юлия Владимировна Осинская¹, Диана Рустемовна Нуретдинова²

^{1,2}Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Московское шоссе, 34, 443086, Самара, Россия).

¹ojv76@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4586-4596>

²dnuretdinova891@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-9177-8245>

Аннотация. Представлены результаты комплексного экспериментального исследования микроструктуры, микротвердости и параметров тонкой структуры технического алюминиевого сплава В95пч (Al-Zn-Mg-Cu) и модельных алюминиевых сплавов, легированных Zn и Mg, подвергнутых искусственному старению в постоянном магнитном поле напряженностью 557.0 кА/м. Установлено, что наложение постоянного магнитного поля в течение 4 ч при температуре 140 °С на процесс старения технического алюминиевого сплава В95пч способствует росту микротвёрдости сплава до 21 %, что свидетельствует о наличии отрицательного магнитоэластического эффекта. В то же время, для тройного модельного сплава Al-Zn-Mg существенного магнитоэластического эффекта не обнаружено: все значения микротвердости лежат в пределах погрешности измерений. Рентгеновским методом обнаружено уменьшение средних размеров блоков когерентного рассеяния, рост величины относительной микродеформаций и плотности дислокаций в обоих сплавах при старении в постоянном магнитном поле. Выявлена корреляция между составом сплавов с учетом легирующих примесей и изменением их физико-механических свойств в процессе старения, что подтверждает возможность создания металлических сплавов с запрашиваемым комплексом конструктивных свойств.

Ключевые слова: алюминиевый сплав В95пч (Al-Zn-Mg-Cu), модельные сплавы, искусственное старение, постоянное магнитное поле, микроструктура, микротвердость, магнитоэластический эффект, параметры тонкой структуры.

Благодарности: Исследование выполнено за счет средств государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, шифр проекта FSSS-2026-0009.

Для цитирования: Осинская Ю.В., Нуретдинова Д.Р. Роль легирующих примесей и постоянного магнитного поля в формировании микроструктуры и микротвердости состаренных алюминиевых сплавов Al-Zn, Al-Zn-Mg и Al-Zn-Mg-Cu // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2026. Т. 23, № 2. С. 235-243. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.02.010.

Original article

THE ROLE OF ALLOYING IMPURITIES AND A CONSTANT MAGNETIC FIELD IN THE FORMATION OF THE MICROSTRUCTURE AND MICROHARDNESS OF AGED ALUMINUM ALLOYS Al-Zn, Al-Zn-Mg AND Al-Zn-Mg-Cu

Julia V. Osinskaya¹, Diana R. Nuretdinova²^{1,2}Samara University, Moskovskoe shosse, 34, Samara, 443086, Russian Federation¹ojv76@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4586-4596>²dnuretdinova891@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-9177-8245>

Abstract. The article presents the results of a comprehensive experimental study of the microstructure, microhardness and fine-structure parameters of the technical aluminum alloy B95pch (Al-Zn-Mg-Cu) and model aluminum alloys alloyed with Zn and Mg, which were subjected to artificial aging in a constant magnetic field with a 557.0 kA/m. It has been established that the application of a constant magnetic field for 4 hours at a temperature of 140°C to the aging process of the technical aluminum alloy B95pch contributes to an increase in the microhardness of the alloy up to 21%, which indicates the presence of a negative magnetoplastic effect. At the same time, no significant magnetoplastic effect was observed for Al-Zn-Mg triple model alloy: all microhardness values are within the measurement error. The X-ray method revealed a decrease in the average size of coherent scattering blocks, an increase in revealed microdeformation and dislocation density in both alloys during aging in a constant magnetic field. A correlation was found between the composition of the alloys, taking into account alloying impurities, and changes in their physical and mechanical properties during aging, which confirms the possibility of creating metal alloys with a desired set of structural properties.

Keywords: aluminum alloy B95pch (Al-Zn-Mg-Cu), model alloys, artificial aging, constant magnetic field, microstructure, microhardness, magnetoplastic effect, fine structure parameters.

Acknowledgements: The study was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project code FSSS-2026-0009.

For citation: Osinskaya J.V., Nuretdinova D. R. (2026). The role of alloying impurities and a constant magnetic field in the formation of the microstructure and microhardness of aged aluminum alloys Al-Zn, Al-Zn-Mg, and Al-Zn-Mg-Cu. *Fundamental'nye problemy sovremennoy materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 23(2), 235-243. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.02.010.

Введение

В последние десятилетия экспериментальные и теоретические исследования, касающиеся изучения модификации и формирования физико-механических свойств алюминиевых сплавов, занимают важное место, как в научном сообществе, так и в промышленности [1-5]. Благодаря таким преимуществам в свойствах, как малая плотность, высокая устойчивость к коррозии и хорошие пластические свойства, алюминиевые сплавы уступают по своим масштабам применения только сталям [6]. Для управления их конструкционными свойствами на практике используются различные подходы: термическая обработка, воздействие магнитным [7, 8] или электрическим [9] полем, а также формирование химического состава путём легирования [10]. К числу основных

легирующих элементов относятся Zn, Mg, Cu, Mn, Si, реже - Li, Ni, Ti. Эти примеси оказывают существенное влияние на формирование микроструктуры и физико-механических свойств [11], вызывая модификацию размеров, концентрации и распределения упрочняющей фазы, повышая дефектность кристаллической структуры и тем самым влияя на физико-механические свойства. В свою очередь, магнитное поле может способствовать измельчению зерна и укрупнению упрочняющих фаз [12], что, в свою очередь, сказывается на прочности и пластичности металлических сплавов. Результат совместного воздействия указанных факторов определяется комплексом параметров, включающих концентрацию легирующих примесей, характеристики приложенного внешнего магнитного поля

(напряженность, время и прочее) и выбранные термические режимы обработки сплавов.

Существенный прирост прочности металлических сплавов при искусственном старении основан на растворении легирующих элементов при повышенных температурах (при нагреве под закалку) с последующим выделением дисперсных упрочняющих фаз в процессе искусственного старения [13].

Целью работы является комплексное исследование влияния легирующих примесей и постоянного магнитного поля (ПМП) на микроструктурные особенности, микротвёрдость и параметры тонкой структуры технического алюминиевого сплава В95пч (Al-

Zn-Mg-Cu) и модельных сплавов Al-Zn-Mg и Al-Zn в процессе искусственного старения.

Методы исследования

В работе исследовались технический алюминиевый сплав В95пч (Al-Zn-Mg-Cu) и два специально выплавленных модельных алюминиевых сплава: двойной Al-Zn и тройной Al-Zn-Mg. Их химический состав представлен в таблице 1.

В таблице 2 представлены режимы термической и термомагнитной обработок для исследуемых алюминиевых сплавов.

Таблица 1. Химический состав исследуемых алюминиевых сплавов

Table 1. Chemical composition of the studied aluminum alloys

Al-Zn-Mg-Cu		Al-Zn-Mg		Al-Zn	
Элемент	Содержание в сплаве, вес. %	Элемент	Содержание в сплаве, вес. %	Элемент	Содержание в сплаве, вес. %
Al	87.45 – 91.45	Al	91.05-92.5	Al	93.7-94.10
Zn	5.00 – 6.50	Zn	5 – 6	Zn	5 – 5.5
Mg	1.80 – 2.80	Mg	2 - 2.5	Неконтролируемые примеси	
Cu	1.40 – 2.00	Неконтролируемые примеси		Fe	0.2 - 0.3
Неконтролируемые примеси		Fe	0.2 - 0.3	Ni	<0.1
Fe	0.05 – 0.25	Ni	<0.01	SI	<0.1
Mn	0.2 – 0.6	SI	<0.15	Mn	<0.1
Cr	0.1 – 0.25	Mn	<0.01	Cr	<0.1
Si	до 0.1	Cr	<0.001	Cu	<0.1
Ni	до 0.1	Cu	<0.1	Всего примесей <0.8	
Ti	до 0,05	Всего примесей: <0.55			
Всего примесей: <1.35					

Таблица 2. Режимы термической и термомагнитной обработок

Table 2. Modes of thermal and thermomagnetic treatment

	Al-Zn-Mg-Cu	Al-Zn-Mg	Al-Zn
Закалка	470 °С (1 ч) в воду 20 °С	550 °С (2 ч) в воду 20 °С	470 °С (1 ч) в воду 20 °С
Старение	140 °С, 4 ч, 0 кА/м	140 °С, 4 ч, 0 кА/м	–
Старение в ПМП	140 °С, 4 ч, 557 кА/м	140 °С, 4 ч, 557 кА/м	–

В качестве методов исследования использовался металлографический анализ, методы микротвердости и рентгеноструктурного анализа.

Для исследования микроструктурных особенностей: размера и морфологии зерен, их границ, наличие двойников и фазового состава,

определяющих физико-механические свойства исследуемых алюминиевых сплавов, был выполнен металлографический анализ. Наблюдения и измерения проводили с использованием оптического микроскопа МИМ–8М. Оценку размера зерна проводили в соответствии с методом Джеффриса [14], основанным на подсчете количества зерен на

единицу площади металлографического шлифа с последующим расчетом их средней площади и диаметра.

Измерение микротвердости проводили по методу Виккерса на микротвердомере HAUSER [15]. Индентор (алмазная пирамида с основанием квадратной формы) вдавливался в образец при нагрузке 100 г, время воздействия составляло 7 с. На основе измерения диагоналей полученных отпечатков рассчитывали значение микротвердости. Итоговый результат для каждого образца получали усреднением десяти измерений. Относительная погрешность среднего значения микротвердости составила 1-4 %.

Исследование параметров тонкой структуры проводили с использованием метода аппроксимации рентгеновского профиля, позволяющего рассчитать истинное физическое уширение дифракционных максимумов. Используемый метод основан на анализе изменения формы линий рентгеновского профиля, что дает возможность оценить средние размеры блоков когерентного рассеяния, величину относительной микродеформации и плотность дислокаций. В ходе работы фиксировали дифракционные линии для эталонного образца из технического алюминия АД1 и для образцов исследуемых алюминиевых сплавов, подвергнутых искусственному старению в постоянном магнитном поле и без него. Основным этапом обработки рентгеновского профиля является подбор аппроксимирующей функции, наиболее точно описывающей форму экспериментальных кривых распределения интенсивности рентгеновских линий. Установлено, что оптимальное описание профиля рентгеновских линий достигается функцией типа $(1+\alpha_1x^2)^{-2}$. На основании этого истинное физическое уширение для

рентгеновских линий алюминиевого сплава вычисляется по формуле:

$$\beta = 0,5B \left(1 - \frac{b}{B} + \sqrt{1 - \frac{b}{B}} \right),$$

где B – интегральная ширина дифракционных линий, определенная для сплавов после старения, b – ширина дифракционной линии эталона.

На основании определенных значений истинного физического уширения проведен расчет параметров тонкой структуры исследуемых сплавов: средний размер блоков когерентного рассеяния ($\langle D \rangle$), плотность дислокаций ($\langle \rho \rangle$) и относительная микродеформация ($\langle \Delta d/d \rangle$) по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \langle D \rangle &= 0,94\lambda \frac{1}{\beta_{111}} \sec \vartheta_{111}, \\ \langle \frac{\Delta d}{d} \rangle &= 0,25\beta_{111} \cot \vartheta_{111}, \\ \rho &= \frac{3}{\langle D \rangle^2}, \end{aligned}$$

где ϑ_{111} – угол 1-го порядка отражения рентгеновских линий от плоскости (111); β_{111} – физическое уширение соответствующей линии, λ – длина волны $\text{CoK}\alpha$.

Результаты и их обсуждение

Типичные фотографии микроструктуры, снятые с поверхности металлографических шлифов, приведены на рисунке 1.

В закаленном состоянии на металлографических шлифах исследуемых сплавов (рис. 1 а-в) наблюдаются инородные включения в виде черных вкраплений. Согласно литературным данным [16] можно предположить, что данные образования являются интерметаллидами (Mg_2Si , FeMnCr), однако их природа окончательно не установлена. При этом границы зерен не имеют выраженного контраста.

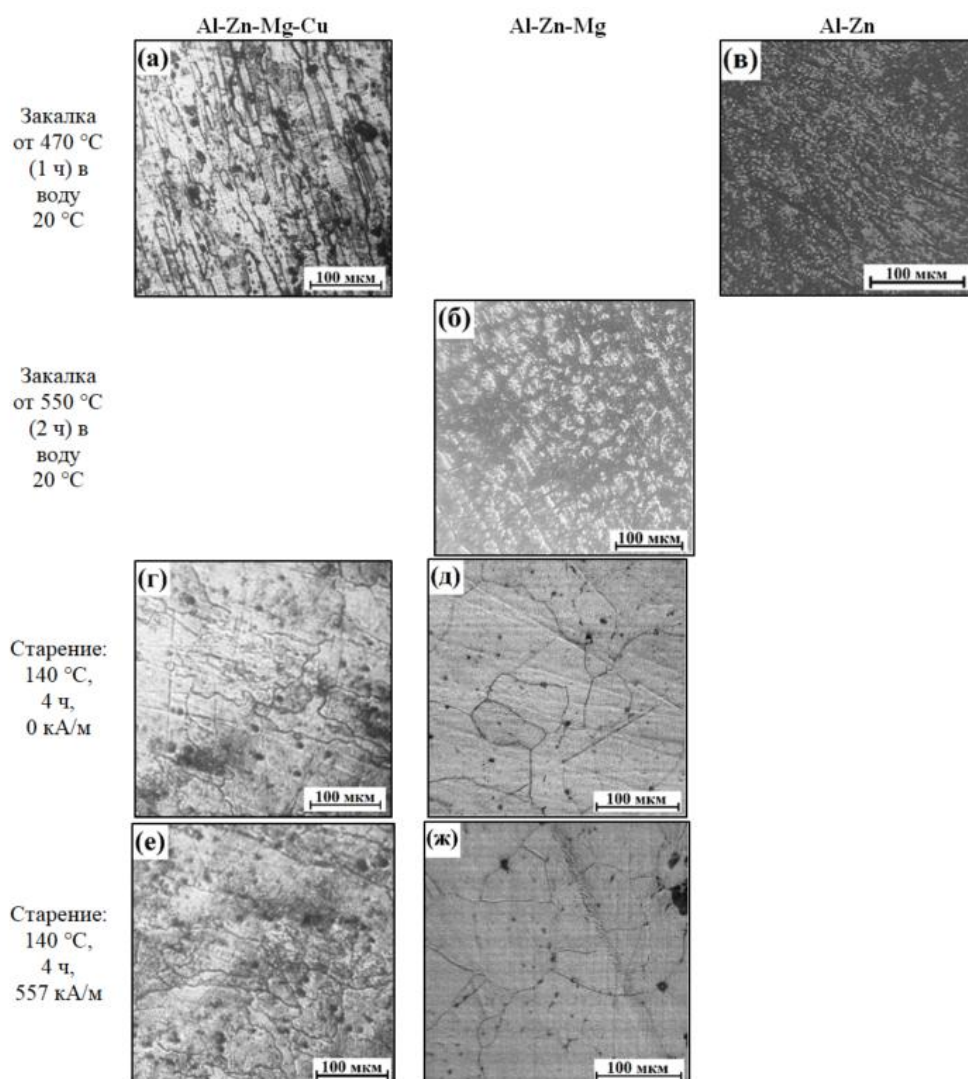


Рис. 1. Микроструктура алюминиевых сплавов после термической и термомагнитной обработок

Fig. 1. Microstructure of aluminum alloys after thermal and thermomagnetic treatments

Старение в течении 4 ч без наложения ПМП приводит к заметной модификации микроструктуры алюминиевого сплава В95пч (рис. 1г), выражающейся в укрупнении включений и появлении выраженных границ зерен, их средний размер составляет 65 мкм. Для модельного тройного алюминиевого сплава Al-Zn-Mg (рис. 1 д) средний размер зерна составляет 74 мкм, что примерно на 10 % больше, чем у технического сплава (рис. 1 г). Это позволяет предположить, что легирующие примеси в техническом сплаве действуют как центры кристаллизации, ограничивая рост зерен и обеспечивая более мелкую и однородную микроструктуру.

Наложение ПМП в процессе старения вызывает схожие микроструктурные изменения как в техническом сплаве В95пч (рис. 1, е), так и в модельном тройном сплаве Al-Zn-Mg (рис. 1, ж): количество и размер включений уменьшается, тогда, как средний размер зёрен существенно не изменяется. Действительно, ПМП может приводить к измельчению или укрупнению частиц второй фазы, в зависимости от их природы и условий обработки. Кроме того, сочетание легирования и воздействия ПМП может привести к синергетическому эффекту, когда влияние одного фактора усиливает действие другого.

Искусственное старение модельного

бинарного алюминиевого сплава Al-Zn не проводили, так как содержание Zn в нем не превышает предела его растворимости в алюминии при комнатной температуре (4,4 вес. %), что исключает возможность образования пересыщенного твердого раствора и последующего его распада в процессе старения.

Таким образом, металлографический анализ показывает, что искусственное старение в ПМП модифицирует микроструктуру сплавов, при этом, не затрагивая размер их зерен.

В таблице 3 представлены результаты измерения микротвердости исследуемых сплавов.

Таблица 3. Результаты измерения микротвёрдости

Table 3. Microhardness measurement results

	Al-Zn-Mg-Cu		Al-Zn-Mg		Al-Zn
	$H_{\mu} \pm \Delta H_{\mu},$ кГ/мм ²	МПЭ, %	$H_{\mu} \pm \Delta H_{\mu},$ кГ/мм ²	МПЭ, %	$H_{\mu} \pm \Delta H_{\mu},$ кГ/мм ²
Закалка от 470 °С (1 ч) в воду 20 °С	139±2	-	-	-	26±1
Закалка от 550 °С (2 ч) в воду 20 °С	-	-	70±3	-	-
Старение: 140 °С, 4 ч, 0 кА/м	152±3	-21	112±3	-2	-
Старение: 140 °С, 4 ч, 557 кА/м	184±2		114±2		

В закаленном состоянии средние значения микротвердости составили 139, 70 и 26 кГ/мм² для технического сплава В95пч, модельных сплавов Al-Zn-Mg и Al-Zn, соответственно. Видно, что уже в закаленном состоянии алюминиевые сплавы проявляют значительную разницу в своих прочностных свойствах, зависящую от их химического состава: наличия и концентрации легирующих элементов.

После искусственного старения длительностью 4 ч микротвердость увеличивается до 152 и 112 кГ/мм² для алюминиевого сплава В95пч и модельного тройного сплава Al-Zn-Mg, соответственно. Рост значений микротвердости можно объяснить формированием в процессе старения упрочняющих фаз (таких как MgZn₂ [17]), которые служат стопорами для движения дислокаций, повышая сопротивление пластической деформации. При этом микротвердость модельного алюминиевого тройного сплава Al-Zn-Mg примерно в 1,5 раза ниже, чем микротвердость технического сплава В95пч, что подчеркивает особую важную роль легирующих примесей в формировании физико-механических свойств сплавов. Легирующие элементы, такие как Cu, Mg, Zn и другие, способны формировать различные интерметаллидные фазы в структуре исследуемых сплавов, а концентрация этих элементов определяет тип и количество

образующихся фаз. Увеличение содержания легирующих элементов, как правило, повышает прочность сплава за счет выделения упрочняющих фаз в результате распада пересыщенного твердого раствора.

Наложение ПМП в процессе искусственного старения технического алюминиевого сплава В95пч способствует росту микротвёрдости до 21 %. Наблюдается отрицательный магнитоэлектрический эффект (МПЭ) [18-22]. В то же время, в модельном тройном алюминиевом сплаве Al-Zn-Mg МПЭ не зафиксирован – все значения микротвердости остаются в пределах погрешности измерения. При этом микротвердость технического алюминиевого сплава В95пч в среднем в 1,6 раза выше, чем у модельного тройного алюминиевого сплава Al-Zn-Mg.

В таблице 4 приведены результаты расчета среднего размера блоков когерентного рассеяния ($\langle D \rangle$), величины относительной микродеформации ($\langle \Delta d/d \rangle$) и плотности дислокаций ($\langle \rho \rangle$).

Воздействие ПМП в процессе искусственного старения алюминиевых сплавов приводит к уменьшению значения средних размеров блоков когерентного рассеяния в 1,1 и 1,8 раза для технического и модельного сплавов, соответственно, по сравнению со случаем отсутствия поля. При этом значения величин относительных микродеформаций и плотности дислока-

ций в образцах, подвергнутых старению в ПМП, превышают аналогичные показатели для сплавов, состаренных без поля: величина относительных микродеформаций возрастают в 1,1 и 1,8 раза, плотность дислокаций в 1,2 и 3,2 раза для алюминиевых сплавов В95пч и Al-Zn-Mg соответственно. Данные изменения свидетель-

ствуют о формировании более дефектной структуры исследуемых сплавов при наложении поля. Установлена корреляция между значениями микротвердости и параметров тонкой структуры, что согласуется с известными закономерностями процесса старения.

Таблица 4. Результаты расчета параметров тонкой структуры

Table 4. Results of calculation of fine structure parameters

	D, нм		$\Delta d/d, 10^{-4}$		$\rho, 10^9 \text{ см}^{-2}$	
	H=0	H=557 кА/м	H=0	H=557 кА/м	H=0	H=557 кА/м
Al-Zn-Mg-Cu	401	365	1,4	1,6	1,9	2,3
Al-Zn-Mg	438	249	1,2	2,2	15	48

Выводы

Проведенное комплексное экспериментальное исследование позволило сделать следующие выводы:

1. Металлографический анализ показал, что наложение ПМП на процесс старения исследуемых сплавов не оказывает существенного влияния на их средний размер зерен. При этом было обнаружено, что средний размер зерен модельного тройного алюминиевого сплава в 1,1 раза превышает размер зерна технического алюминиевого сплава. Установленное различие в микроструктуре является одной из ключевых причин значительного расхождения в значениях микротвердости этих сплавов.

2. Методом микротвердости установлен отрицательный магнитоэластический эффект в техническом сплаве В95пч, состаренном в ПМП, проявляющийся в увеличении микротвердости на 21%. Микротвердость модельного тройного алюминиевого сплава Al-Zn-Mg в 1,6 раза ниже, чем у технического сплава.

3. Рентгеноструктурный анализ показал, что наложение ПМП в процессе старения исследуемых алюминиевых сплавов приводит к уменьшению средних размеров блоков когерентного рассеяния, росту относительных микродеформаций и плотности дислокаций, что указывает на формирование более дефектной структуры под действием ПМП.

4. Сопоставление полученных экспериментальных результатов с

литературными данными подтверждает значимость внешних воздействий на процессы, протекающие при искусственном старении сплавов, в частности, путем варьирования концентрации легирующих примесей и параметров магнитного поля можно целенаправленно управлять микроструктурой и свойствами сплава, добиваясь требуемого уровня прочности, пластичности или других характеристик.

Список литературы

1. Корягин Ю.Д., Стенников М.А. Термомеханическая обработка высокопрочных литейных алюминиевых сплавов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2023. Т. 23. № 3. С. 30-37. DOI: 10.14529/met230303.
2. Дуюнова В.А., Трапезников А.В., Леонов А.А., Коренева Е.А. Модифицирование литейных алюминиевых сплавов (обзор) // Труды ВИАМ. 2023. № 4 (122). С. 14-26. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-4-14-26.
3. 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. V. 798. P. 1–12. DOI: doi.org/10.1016/j.msea.2020.139990.
4. Luo J., Luo H., Zhao T., Wang R. Effect of magnetic field on dislocation morphology and precipitation behaviour in ultrafine-grained 7075 aluminium alloy // J Mater Sci Technol. 2021. V. 93. P. 128–146. DOI: 10.1016/j.jmst.2021.03.016.
5. Nefawy Y.M. Effect of Artificial Aging Parameters on Tensile Strength and Microstructure of 7075 Aluminum Alloy // Palestine Technical

- University Research Journal. 2020. V. 8. № 4. P. 37-47. DOI: 10.53671/pturj.v8i4.96.
6. Белов Н.А., Савченко С.В., Хван А.В. Фазовый состав и структура силуминов: Справочное издание. М.: МИСИС. 2008. 283 с.
7. 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. С. 80-84. DOI: 10.31857/S1028096022020091.
8. Liu, Y.Z.; Zhan, L.H.; Ma, Q.Q.; Ma, Z.Y.; Huang, M.H. Effects of alternating magnetic field aged on microstructure and mechanical properties of AA2219 aluminum alloy // J. Alloy. Compd. 2015. Volume 647. P. 644-647. DOI: 10.1016/j.jallcom.2015.05.183.
9. Yuzhen L., Minghui H., Ziyao M., Lihua Z. Influence of the low-density pulse current on the ageing behavior of AA2219 aluminum alloy. Journal of Alloys and Compounds. 2016. Volume 673. P. 358-363. DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.03.014.
10. Шуркин П.К., Белов Н.А., Мусин А.Ф., Аксенов А.А. Новый высокопрочный литейный алюминиевый сплав на основе системы Al-Zn-Mg-Ca-Fe, не требующий термообработки // Известия вузов. Цветная металлургия. 2020. 1. С. 48-58. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2020-1-48-58.
11. Алюминий: свойства и физическое металловедение: Справочное издание / под ред. Дж.Е. Хэтча. пер. с англ. Э.З. Непомнящей. М.: Металлургия, 1989. 422 с.
12. Осинская Ю.В., Покоев А.В. Микроструктура сплава бериллиевой бронзы БрБ-2, состаренной в постоянном магнитном поле // Материаловедение. 2005. № 11. С. 2-6.
13. Готтштайн Г. Физико-химические основы материаловедения: [учеб. пособие для вузов]: пер. с англ. - М.: Бином. Лаборатория знаний, 2011. 400 с.
14. Панченко Е.В., Скаков Ю.А., Кример Б.И. Лаборатория металлографии: учебное пособие. М.: Металлургия, 1965. 440 с.
15. Глазов В.М., Вигродович В.Н. Микротвердость металлов и полупроводников. 2-е изд., испр. и доп. - М.: Металлургия, 1969. 248 с.
16. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов // М.: Металлургия, 1979. 640 с.
17. Елагин В.И., Захаров В.В., Дриц А.М. Структура и свойства сплавов системы Al-Zn-Mg. М.: Металлургия, 1982. 224 с.
18. Молоцкий М.И. Отрицательный магнитоэластический эффект в немагнитных кристаллах // Физика твердого тела. 1993. Т. 35. № 1. С. 11-14.
19. Пост Р., Осинская Ю.В., Вильде Г., Дивинский С.В., Покоев А.В. Влияние температуры отжига и постоянного магнитного поля на распад закаленной бериллиевой бронзы БрБ-2 // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2020. №5. С. 36-44. DOI: 10.31857/S102809602005012X
20. Моргунов Р.Б., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Королев Д.В. Термодинамический анализ магнитоэластических эффектов в "немагнитных" металлах // Труды ВИАМ. 2018. №12 (72). С. 79-87. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-79-87
21. Смирнов Н.Э. К объяснению магнитоэластического эффекта в диамагнитных и парамагнитных твердых телах // ВМУ. Серия 3: Физика. Астрономия. 2019. № 5. С. 34-39
22. Бучаченко А.Л. Физическая кинетика магнитоэластичности кристаллов // Журнал экспериментальной и технической физики. 2007. Т. 132. В. 4. С. 827-830.

Информация об авторах

Ю.В. Осинская – кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой физики твердого тела Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева, +7 (846) 334-54-36.

Д.Р. Нуретдинова – студент, учебный мастер кафедры физики твердого тела Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева, +7 (846) 334-54-36.

References

1. Koryagin Yu.D., Stennikov M.A. Thermomechanical treatment of high-strength cast aluminum alloys // Bulletin of the South Ural State University. Series "Metallurgy". 2023. V. 23. № 3. P. 30-37. DOI: 10.14529/met230303.
2. Duyunova V.A., Trapeznikov A.V., Leonov A.A., Koreneva E.A. Modification of foundry aluminum alloys (review) // Proceedings of VIAM. 2023. №. 4 (122). P. 14-26. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-4-14-26.
3. 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. V. 798. P. 1-12. DOI: doi.org/10.1016/j.msea.2020.139990.

4. Luo J., Luo H., Zhao T., Wang R. Effect of magnetic field on dislocation morphology and precipitation behaviour in ultrafine-grained 7075 aluminium alloy // *J Mater Sci Technol*. 2021. V. 93. P. 128–146. DOI: 10.1016/j.jmst.2021.03.016.
5. Nefawy Y.M. Effect of Artificial Aging Parameters on Tensile Strength and Microstructure of 7075 Aluminum Alloy // *Palestine Technical University Research Journal*. 2020. V. 8. № 4. P. 37–47. DOI: 10.53671/pturj.v8i4.96.
6. Belov N.A., Savchenko S.V., Khvan A.V. Phase composition and structure of silumin: Reference edition. M.: MISIS. 2008. 283 p.
7. Osinovskaya J.V., Pokoev A.V., Magamedova S.G. Influence of the constant magnetic field intensity on the phase formation process in the aged aluminum alloy Al-Si-Cu-Fe // *Surface. X-ray, synchrotron and neutron research*. 2022. №. 2. P. 80–84. DOI: 10.31857/S1028096022020091.
8. Liu, Y.Z.; Zhan, L.H.; Ma, Q.Q.; Ma, Z.Y.; Huang, M.H. Effects of alternating magnetic field aged on microstructure and mechanical properties of AA2219 aluminum alloy // *J. Alloy. Compd*. 2015. V. 647. P. 644–647. DOI: 10.1016/j.jallcom.2015.05.183.
9. Yuzhen L., Minghui H., Ziyao M., Lihua Z. Influence of the low-density pulse current on the ageing behavior of AA2219 aluminum alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2016. V. 673. P. 358–363. DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.03.014.
10. Shurkin P.K., Belov N.A., Musin A.F., Aksenov A.A. New high-strength casting aluminum alloy based on the Al-Zn-Mg-Ca-Fe system that does not require heat treatment // *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*. 2020. №. 1. P. 48–58. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2020-1-48-58.
11. Aluminium: properties and physical metallurgy: Reference edition / Ed. by J.E. Hatch. Translated from English by E.Z. Nepomnyashchaya. Moscow: Metallurgy, 1989. 422 p.
12. Osinskaya J.V., Pokoev A.V. Microstructure of the Beryllium Bronze Alloy BpB-2 Aged in a Permanent Magnetic Field // *Materialovedenie*. 2005. №. 11. P. 2–6.
13. Gottstein G. Physico-chemical fundamentals of materials science: [textbook, handbook for universities]: translated from English - M.: Binom. Laboratory of Knowledge, 2011. 400 p.
14. Panchenko E.V., Skakov Yu.A., Krimer B.I. Laboratory of metallography: textbook. M.: Metallurgy, 1965. 440 p.
15. Glazov V.M., Vigrodovich V.N. Microhardness of Metals and Semiconductors. 2nd edition, revised and expanded. Moscow: Metallurgy, 1969. 248 p.
16. Mondolfo L.F. Structure and properties of aluminum alloys. M.: Metallurgy, 1979. 640 p.
17. Yelagin V.I., Zakharov V.V., Drits A.M. Structure and properties of Al-Zn-Mg system alloys. M.: Metallurgy, 1982. 224 p.
18. Molotsky M.I. Negative magnetoplastic effect in nonmagnetic crystals // *Solid state physics*. 1993. V. 35. № 1. P. 11–14.
19. Post R., Ossinskaya Yu.V., Wilde G., Divinsky S.V., Pokoev A.V. Influence of Annealing Temperature and Permanent Magnetic Field on the Decay of Tempered Beryllium Bronze BrB-2 // *Surface. X-ray, Synchrotron, and Neutron Research*. 2020. №5. P. 36–44. DOI: 10.31857/S102809602005012X
20. Morgunov R.B., Piskorskiy V.P., Valeev R.A., Korolev D.V. Thermodynamic analysis of magnetoplastic effects in "nonmagnetic" metals // *Proceedings of VIAM*. 2018. №12 (72). P. 79–87. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-79-87
21. Smirnov N.E. To explain the magnetoplastic effect in diamagnetic and paramagnetic materials solids // *VMU. Series 3: Physics. Astronomy*. 2019. No. 5. Pp. 34–39
22. Buchachenko A.L. Physical kinetics of magnetoplasticity of crystals // *Journal of Experimental Physics and technical physics*. 2007. V. 132. № 4. P. 827–830.

Information about the authors

J.V. Osinskaya – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department of Solid State Physics at Samara University, +7 (846) 334-54-36.

D.R. Nuretdinova – Student, Teaching Assistant at the Department of Solid State Physics at Samara University, +7 (846) 334-54-36.

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

Статья поступила в редакцию 30.04.2026; одобрена после рецензирования 25.05.2026; принята к публикации 01.06.2026.

The article was received by the editorial board on 30 Apr. 2026; approved after reviewing 25 May 2026; accepted for publication 01 Jun. 2026.