

Оригинальная статья

УДК 621.785.78:537.636

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-2(48)-117-126

**СТАРЕНИЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА В95пч
В ПОСТОЯННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

© 2024 г. Ю. В. Осинская, С. Р. Макеев, С. В. Воронин, Е. В. Терентьева

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

Аннотация. В настоящей работе представлены результаты комплексного экспериментального исследования влияния слабого постоянного магнитного поля на процесс старения алюминиевого сплава В95пч. Приведены сведения о химическом составе алюминиевого сплава В95пч, режимах термической и термомагнитной обработок и основных экспериментально наблюдаемых закономерностях изменений значений микротвердости, модуля упругости отдельных локальных областей, параметра решетки и параметров тонкой структуры алюминиевого сплава В95пч, состаренного при температуре 140°C, времени отжига от 2 до 8 ч, в постоянном магнитном поле напряженностью 557,0 кА/м и в его отсутствии. Обнаружено, что постоянное магнитное поле в значительной мере влияет на прочностные свойства и структуру сплава В95пч, при этом не изменяет стадийности процесса старения. Установлен так называемый «отрицательный» магнитопластический эффект, величина которого составляет 21 %. Наблюдается корреляция результатов измерения микротвердости и модуля упругости сплава В95пч. При наложении постоянного магнитного поля средний размер блоков когерентного рассеяния становится меньше, а плотность дислокаций и величина относительной микродеформации больше, чем при его отсутствии, что свидетельствует об искаженности кристаллической решетки алюминиевого сплава В95пч. Рентгеновские исследования показали, что временные зависимости параметров решетки и параметров тонкой структуры коррелируют с временными зависимостями микротвердости, что согласуется с основными классическими закономерностями процесса старения. Результаты настоящей работы могут внести свой вклад в создание новых и развитие существующих технологий термообработки алюминиевого сплава В95пч и прогнозирования его физико-механических свойств.

Ключевые слова: алюминиевый сплав В95пч, старение, постоянное магнитное поле, магнитопластический эффект, параметры тонкой структуры, модуль упругости

Благодарности: статья посвящена профессору кафедры физики твердого тела и неравновесных систем Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева Александру Владимировичу Покоеву в знак благодарности от учеников.

Для цитирования: Осинская Ю.В., Макеев С.Р., Воронин С.В., Терентьева Е.В. Старение алюминиевого сплава В95пч в постоянном магнитном поле. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;2(48):117–126. [http://doi.org/10.57070/2304-497-2024-2\(48\)-117-126](http://doi.org/10.57070/2304-497-2024-2(48)-117-126)

Original article

AGEING OF ALUMINUM ALLOY V95PCH IN A CONSTANT MAGNETIC FIELD

© 2024 Ju. V. Osinskaya, S. R. Makeev, S. V. Voronin, E. V. Terentyeva

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

Abstract. This paper presents the results of a comprehensive experimental study of the influence of a weak constant magnetic field on the aging process of aluminum alloy V95pch. Information is provided on the chemical

composition of the aluminum alloy V95pch, modes of thermal and thermomagnetic processing and the main experimentally observed patterns of changes in the values of microhardness, elastic modulus of individual local regions, lattice parameter and fine structure parameters of the aluminum alloy V95pch, aged at a temperature of 140 °C, annealing time from 2 up to 8 hours, in a constant magnetic field of 557.0 kA/m and in its absence. It was found that a constant magnetic field significantly affects the strength properties and structure of the aluminum alloy V95pch, but does not change the stages of the aging process. The so-called “negative” magnetoplastic effect has been established, the value of which is 21%. There is a correlation between the results of measuring microhardness and the elastic modulus of the aluminum alloy V95pch. In addition, it is clear that when a constant magnetic field is applied, the average size of coherent scattering blocks becomes smaller, and the dislocation density and the value of relative microstrain are greater than in its absence, which indicates a distortion of the crystal lattice of the V95pch aluminum alloy. X-ray studies have shown that the time dependences of lattice parameters and fine structure parameters correlate with the time dependences of microhardness, which is consistent with the basic classical laws of the aging process. The results of this work can contribute to the creation of new and development of existing technologies for heat treatment of aluminum alloy V95pch and prediction of its physical and mechanical properties.

Keywords: aluminum alloy V95pch, aging, constant magnetic field, magnetoplastic effect, fine structure parameters, elastic modulus

Acknowledgements: the article is dedicated to professor of the department of solid state physics and nonequilibrium systems of Samara university Alexander Vladimirovich Pokoev as a token of gratitude from the students.

For citation: Osinskaya J.V., Makeev S.R., Voronin S.V., Terentyeva E.V. Aging of aluminum alloy V95pch in a constant magnetic field. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;2(48):117–126. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-497-2024-2\(48\)-117-126](http://doi.org/10.57070/2304-497-2024-2(48)-117-126)

Введение

Алюминиевый сплав Al – Zn – Mg – Cu и его аналоги широко используются в авиации и космонавтике для создания легких и прочных конструкций [1]. Такого эффекта можно достичь благодаря высокому соотношению их прочности и веса, хорошей устойчивости к коррозии и способности выдерживать большие нагрузки без разрушения [2]. В последние десятилетия проводится достаточное количество экспериментальных исследований по упрочнению алюминиевых сплавов [3 – 5]. Известно, что основными механизмами упрочнения этих сплавов являются упрочнение за счет распада пересыщенного твердого раствора (старения), границ зерен, дислокаций.

Один из интересных аспектов поведения сплавов при старении – это их реакция на внешние воздействия, например, магнитное поле. Этот феномен привлекает значительное внимание, так как может привести к новому пониманию процесса старения и изучению новых эффектов, возникающих при термомагнитной обработке. Проведенные исследования [6, 7] показывают, что воздействие магнитным полем является эффективным методом для контроля организации материалов, изменения термодинамических и кинетических условий фазовых переходов. Кроме этого, при воздействии внешних полей обнаруживается магнитопластический эффект (МПЭ), который заключается в изменении подвижности дислокаций [8 – 10]. Это, в

свою очередь, приводит к изменению микроструктуры и физико-механических свойств материалов.

Целью настоящей работы является комплексное экспериментальное исследование магнитопластического эффекта, параметров решетки, параметров тонкой структуры и модуля упругости алюминиевого сплава В95пч, составленного в постоянном магнитном поле (ПМП).

Методы и принципы исследования

Шлифы с ребром 10 мм вырезали из промышленного листа алюминиевого сплава В95пч, химический состав которого приведен в табл. 1.

Предварительно закаленные образцы искусственно старили в вакууме (примерно 10^{-3} Па) в установке для отжига в магнитном поле. Режимы закалки и старения в ПМП и без него представлены в табл. 2 (где T – температура отжига, °C; t – время отжига, ч; H – напряженность магнитного поля, кА/м). Напряженность ПМП, температуру и время старения выбирали на основе литературных данных [11].

Микротвердость по методу Виккерса [12] измеряли с помощью микротвердомера HAUSER при нагрузке 0,98 Н и времени нагружения 7 с. Каждое значение микротвердости получали усреднением по 20 измерениям. Относительная ошибка среднего значения микротвердости составила 3 – 5 % (рис. 1).

Рентгеноструктурный анализ выполняли с использованием $\text{Co K}\alpha$ -излучения на дифракто-

Химический состав алюминиевого сплава В95пч**Table 1. Chemical composition of aluminum alloy V95pch**

Элемент	Содержание в сплаве, мас. %
Al	87,45 – 91,45
Zn	5,00 – 6,50
Mg	1,80 – 2,00
Cu	1,40 – 2,00
Примеси, не более	
Fe	0,05 – 0,25
Mn	0,20 – 0,60
Cr	0,10 – 0,25
Si	до 0,10
Ni	до 0,10
Ti	до 0,05
Всего примесей: 1,35	

метре «ДРОН-2», оснащенном аппаратно-программным комплексом управления, регистрации и обработки результатов измерений. Параметры эксперимента следующие: анодный ток – 20 мА; напряжение на рентгеновской трубке – 30 кВ; скорость движения счетчика – 0,4 град/мин; щели 0,5 – 4 – 0,5 мм.

Среднеквадратичная ошибка отдельного измерения параметра решетки составляет 0,001 Å, относительная ошибка отдельного измерения параметра решетки – 0,04 %.

Для определения параметров тонкой структуры выбирали дифракционную линию (311) на дифрактограммах исследованных образцов. В работе для определения истинного физического уширения использовали метод аппроксимации [13]. В качестве эталона использовали закаленный образец алюминиевого сплава В95пч. Относительная ошибка отдельного измерения среднего блока когерентного рассеяния, плотно-

сти дислокаций и величины относительной микрореформации составляла 14, 28 и 45 % соответственно.

Модуль упругости локальных областей измеряли с помощью сканирующего зондового микроскопа нанотвердомера «Наноскан 3D» методом силовой микроскопии [14]. Среднее значение модуля упругости определяли по соотношению углов наклона кривых подвода, исследуемого и эталонного материалов. Относительная ошибка определения среднего значения модуля упругости составила 10 %.

Основные результаты и их обсуждение

Результаты влияния ПМП на микротвердость в процессе старения алюминиевого сплава В95пч представлены в табл. 3 и на рис. 2.

Из анализа данных табл. 3 видно, что после закалки микротвердость сплава достигает 1363 МПа. Полученные результаты согласуются с

Режимы термомангнитной обработки сплава В95пч (закалка при 470 °С (1 ч) в воду (20 °С))**Table 2. Thermomagnetic treatment modes of aluminum alloy V95pch (quenching at 470 °C (1 h) in water (20 °C))**

$T, ^\circ\text{C}$	$t, \text{ч}$	$H, \text{кА/м}$
140	2	0
		557,0
	4	0
		557,0
	6	0
		557,0
	8	0
		557,0

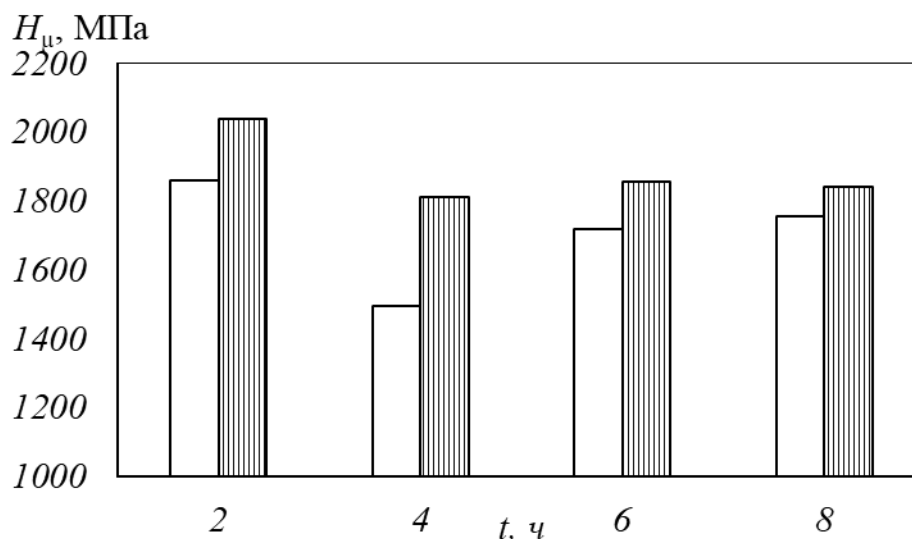


Рис. 1. Результаты измерения микротвердости сплава В95пч, состаренного в постоянном магнитном поле (вертикальная полоска) и без него (без заливки)

Fig. 1. Results of measuring the microhardness of the V95pch alloy, aged in a magnetic field (vertical stripe) and without it (no fill)

литературными данными [15], что свидетельствует об их достоверности.

Старение в течение 2 ч без наложения ПМП при температуре 140 °С приводит к существенному возрастанию микротвердости до 1853 МПа, что объясняется процессами старения. При старении металлического сплава В95пч выделяются фазы $\eta(\text{MgZn}_2)$ и $T(\text{AlZnMg})$ [16], которые тормозят движение дислокаций и тем самым приводят к возрастанию прочностных свойств сплава.

После старения в течение 4 ч наблюдается минимум значения микротвердости сплава, а дальнейшее увеличение длительности старения до 8 ч приводит к росту микротвердости до 1790 МПа. Такой ход зависимости микротвердости сплава связан со стадийностью процесса старения. Максимальная микротвердость наблюдается при времени старения 2 ч.

Наложение ПМП на старение сплава всегда приводит к увеличению микротвердости до 21 %

[17]. Обнаруживается так называемый отрицательный магнитоэластический эффект (МПЭ) [18]. Величину МПЭ рассчитывали по формуле

$$\text{МПЭ} = \frac{H_{\mu, H \neq 0} - H_{\mu, H=0}}{H_{\mu, H=0}} \cdot 100 \%$$

Обнаружено, что ПМП не изменяет кинетики процесса старения исследуемого сплава: максимумы и минимумы микротвердости наблюдаются при одних и тех же временах старения. Увеличение микротвердости можно объяснить тем, что при наложении ПМП структура сплава становится более искаженной, как показали результаты рентгеноструктурного анализа. Вследствие этого дислокации встречают на своем пути значительно большее количество стопоров (фазы, границы зерен и т.д.), подвижность уменьшается и сплав становится более прочным [19].

Т а б л и ц а 3

Результаты измерения микротвердости сплава В95пч
Table 3. Results of measuring microhardness of aluminum alloy V95pch

t, ч	H, кА/м	$H_{\mu} \pm \Delta H_{\mu}$, МПа	МПЭ, %
Закалка 470 °С → 20 °С	—	1363 ± 19	—
2	0	1853 ± 19	10
	557,0	2029 ± 19	
4	0	1490 ± 29	21
	557,0	1804 ± 19	
6	0	1716 ± 49	8
	557,0	1853 ± 49	
8	0	1755 ± 19	4
	557,0	1833 ± 19	

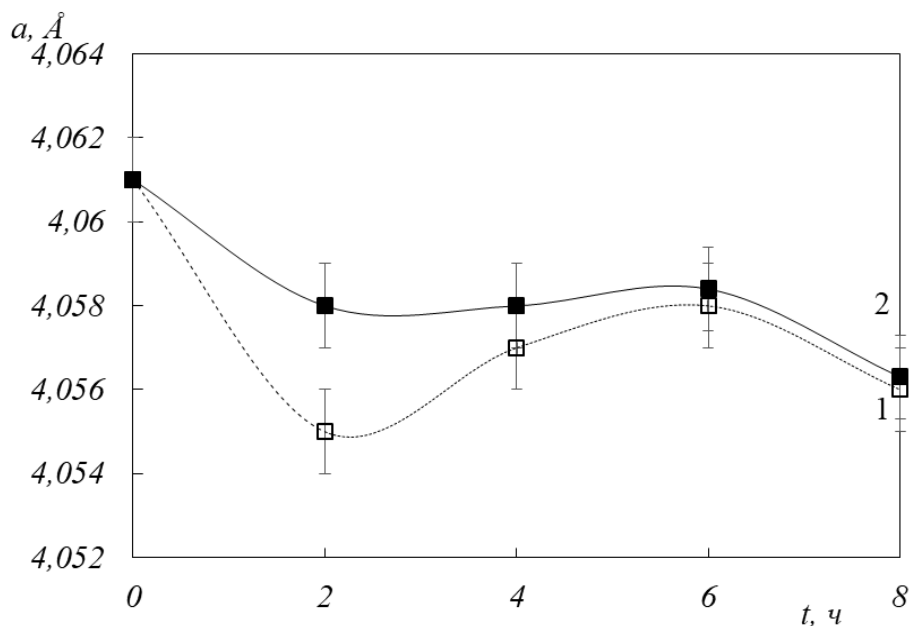


Рис. 2. Результаты измерения параметра решетки сплава В95пч, состаренного в магнитном поле (2) и без него (1)

Fig. 2. Results of measuring the lattice parameter of the V95pch alloy, aged in a magnetic field (2) and without it (1)

Методом рентгенографического анализа получена временная зависимость параметра кристаллической решетки сплава, определенного по дифракционной линии (311) (рис. 2).

После закалки параметр кристаллической решетки сплава больше параметра решетки чистого алюминия (4,050 Å) составляет 4,061 Å, это связано с наличием в твердом растворе алюминия атомов магния, которые являются примесью замещения. Размер атомов магния на 12 % больше атомов алюминия, что и приводит к увеличению параметра кристаллической решетки алюминиевого сплава.

В процессе старения примесные атомы магния, цинка и меди уходят из матрицы в фазовые выделения, параметр решетки оставшегося ма-

теринского твердого раствора уменьшается при всех исследованных временах старения, что наглядно видно на рис. 2.

Наложение ПМП при тех же режимах термической обработки также приводит к уменьшению параметра решетки по сравнению с закаленным состоянием. Кроме этого, параметр решетки сплава, состаренного в ПМП, имеет тенденцию к возрастанию по сравнению с параметром решетки сплава, состаренного в отсутствии поля (рис. 2). При этом ход зависимости не меняется, то есть наложение ПМП на отжиг сплава не изменяет кинетики старения.

Экспериментальные данные измерения параметров тонкой структуры, полученные методом аппроксимации, представлены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Экспериментальные данные измерения параметров тонкой структуры состаренного алюминиевого сплава В95пч

Table 4. Experimental data of measurement of fine structure parameters of aged aluminum alloy V95pch

t, ч	Значения при H, кА/м							
	$\beta^{311}, ^\circ$		D, нм		$\Delta d/d, 10^{-4}$		$\rho, 10^9 \text{ см}^{-2}$	
	0	7	0	7	0	7	0	7
2	0,09	0,14	290	208	2,0	2,8	3,6	6,9
4	0,07	0,08	401	365	1,4	1,6	1,9	2,3
6	0,20	0,39	140	73	4,1	7,9	15,2	56,6
8	0,15	0,36	183	78	3,1	7,4	8,9	49,3

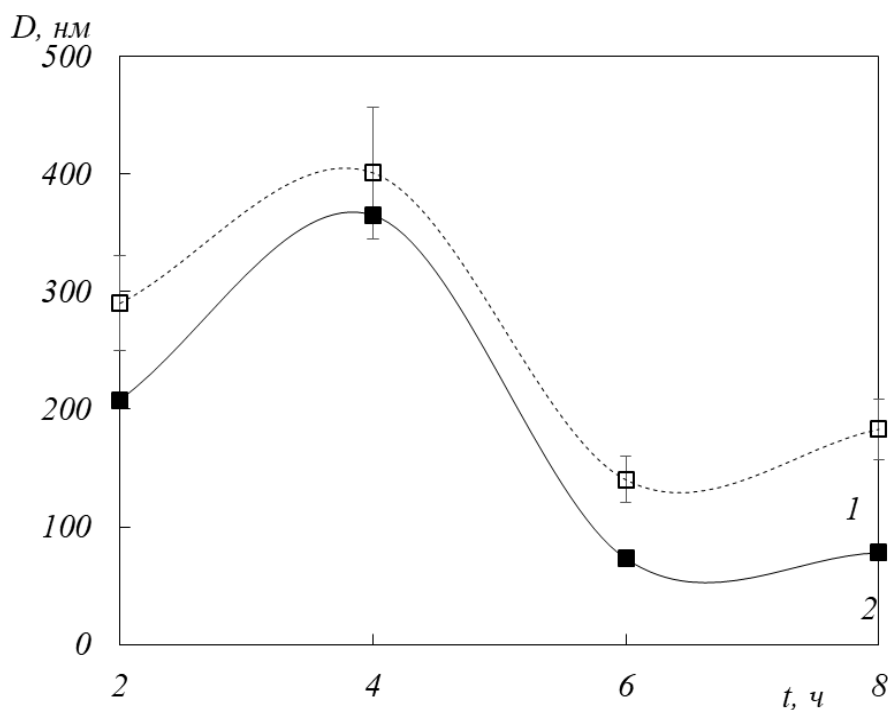


Рис. 3. Результаты измерения среднего размера блоков когерентного рассеяния сплава В95пч, состаренного в магнитном поле (2) и без него (1)

Fig. 3. Results of measuring the average size of coherent scattering blocks of the V95pch alloy, aged in a magnetic field (2) and without it (1)

По экспериментальным данным построены временные зависимости параметров тонкой

структуры для образцов, состаренных в ПМП и без него (рис. 3 – 5).

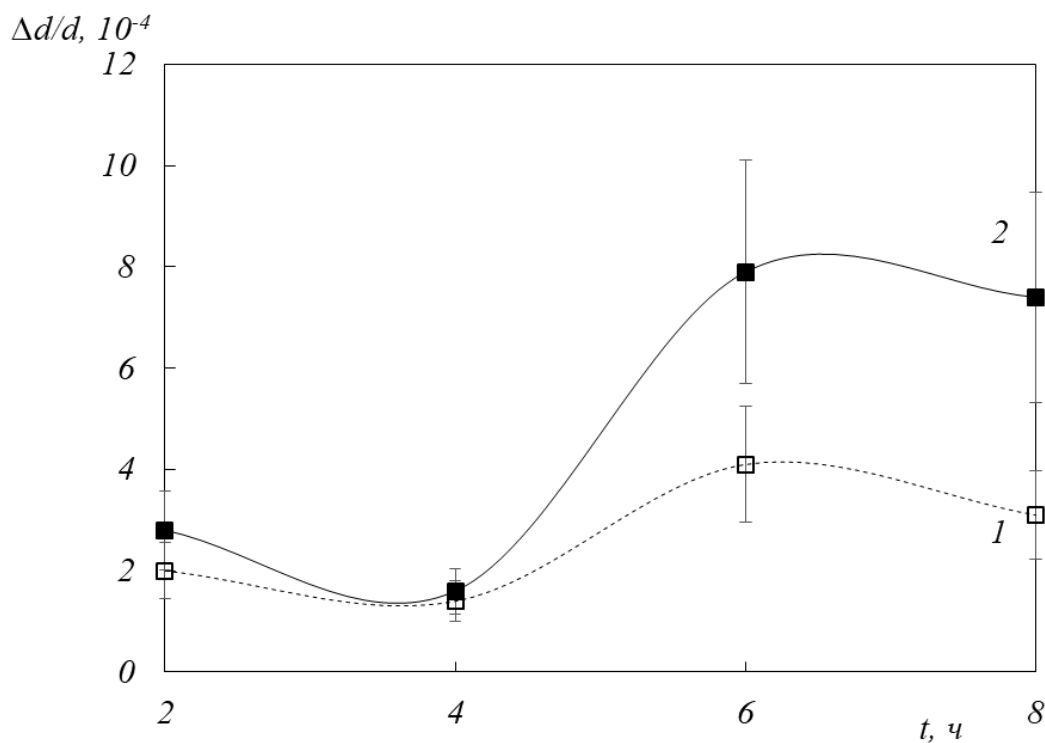


Рис. 4. Результаты измерения величины относительной микродеформации сплава В95пч, состаренного в магнитном поле (2) и без него (1)

Fig. 4. Results of measuring the relative microstrain of the V95pch alloy, aged in a magnetic field (2) and without it (1)

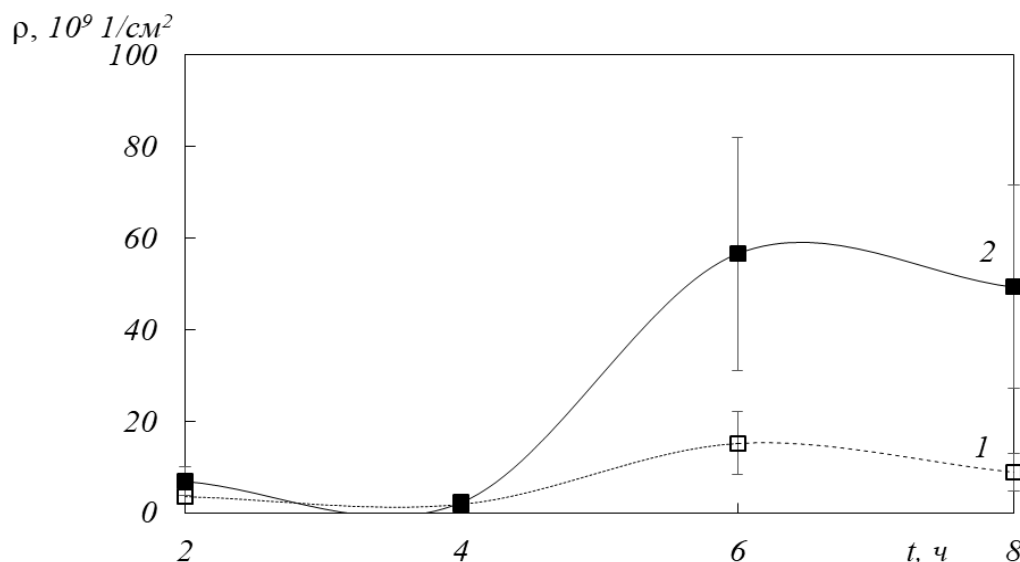


Рис. 5. Результаты измерения плотности дислокаций сплава В95пч, состаренного в магнитном поле (2) и без него (1)
Fig. 5. Results of measuring the dislocation density of the V95pch alloy, aged in a magnetic field (2) and without it (1)

Установлено, что временные зависимости параметров тонкой структуры коррелируют с временными зависимостями микротвердости, то есть минимальным значениям микротвердости соответствуют максимальные значения средних размеров блоков когерентного рассеяния и минимальные значения плотности дислокаций и величины относительных микродеформаций.

Полученные результаты показывают, что ПМП не изменяет поведения временных зависимостей параметров тонкой структуры (рис. 3 – 5), то есть не изменяет стадийности процесса старения.

Анализ данных показал, что средние размеры блоков когерентного рассеяния при наложении ПМП всегда меньше, чем в его отсутствии, а значения относительных микродеформаций и плотности дислокаций при наложении поля выше, чем без него. Это свидетельствует о том, что структура сплава при наложении ПМП становится более искаженной, чем в его отсутствии. Кроме этого обнаружено, что наложение ПМП на процесс старения сплава при 6 и 8 ч

приводит к уменьшению средних размеров блоков когерентного рассеяния до наноразмеров (~70 нм). Данный факт имеет большое научное и практическое значение для получения наноматериалов с заданными свойствами.

Результаты измерения модуля упругости методом сканирующей зондовой микроскопии алюминиевого сплава В95пч представлены в табл. 5 и на рис. 6 (где σ_y – модуль упругости, ГПа).

Значение модуля упругости закаленного образца (табл. 5) согласуются со справочными данными [20], что свидетельствует о его достоверности. Наложение ПМП на процесс старения приводит к уменьшению модуля упругости алюминиевого сплава В95пч до 17 % по сравнению со старением без наложения магнитного поля (табл. 5, рис. 6). Данный факт указывает на корреляцию результатов измерения модуля упругости и микротвердости (рис. 1, табл. 3).

Т а б л и ц а 5

Результаты измерения модуля упругости закаленного и состаренного алюминиевого сплава В95пч
Table 5. Results of measurement of elastic modulus of hardened and aged aluminum alloy V95pch

t , ч	H , кА/м	σ_y , ГПа	МПЭ, %
Закалка 470 °С → 20 °С	–	214 ± 13	–
2	0	91 ± 7	–17
	557,0	75 ± 8	
4	0	97 ± 8	–16
	557,0	81 ± 9	

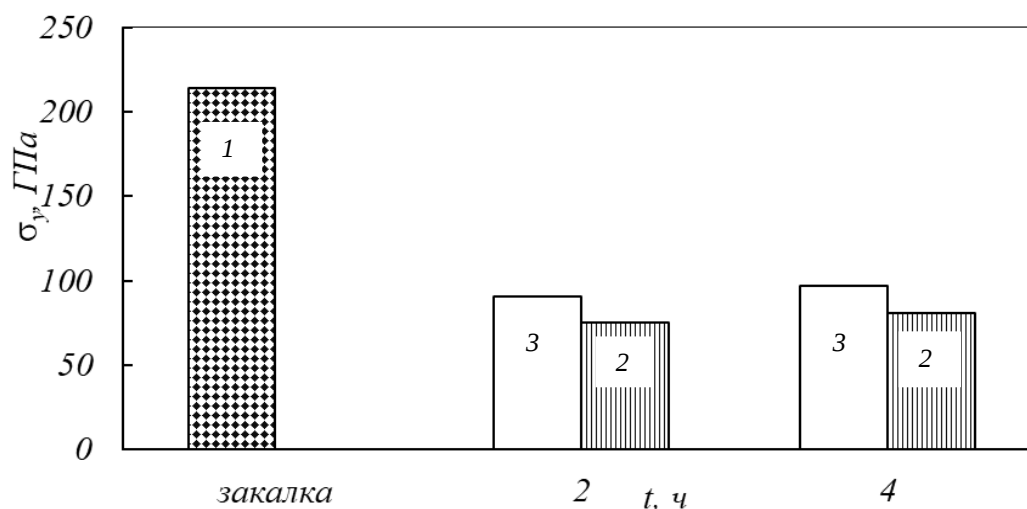


Рис. 6. Результаты измерения модуля упругости алюминиевого сплава В95пч после закалки (1), старения в постоянном магнитном поле (2) и без него (3)

Fig. 6. Results of measuring the elastic modulus of aluminum alloy V95pch after quenching (1) and aging in a constant magnetic field (2) and without it (3)

Выводы

Наложение ПМП на процесс старения высокопрочного алюминиевого сплава В95пч приводит к существенному (до 21 %) увеличению микротвердости, наблюдается отрицательный МПЭ. Методом рентгеновского анализа обнаружено, что временные зависимости параметров решетки и параметров тонкой структуры коррелируют с временными зависимостями микротвердости, что согласуется с основными классическими закономерностями процесса старения. Кроме этого, ПМП не изменяет стадийности процесса старения. Обнаружено, что при наложении ПМП на процесс старения сплава средний размер блоков когерентного рассеяния становится всегда меньше, а плотность дислокаций и величина относительной микродеформации больше, чем в его отсутствии, что свидетельствует о большей искаженности кристаллической решетки. Наблюдается корреляция результатов измерения микротвердости и модуля упругости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhu L., Li N., Childs P.R.N. Light-weighting in aerospace component and system design. *Propulsion and Power Research*. 2018;7(2):103–119. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jprr.2018.04.001>
2. Williams J.C., Starke E.A. Progress in structural materials for aerospace systems. *Acta Materialia*. 2003;51(19):5775–5779. <https://doi.org/10.1016/J.ACTAMAT.2003.08.023>
3. Lee Y.S., Koh D.H., Kim H.W., Ahn Y.S. Improved bake-hardening response of Al-Zn-Mg-Cu alloy through pre-aging treatment. *Scripta Materialia*. 2018;147:45–49. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2017.12.030>
4. Ringer S.P., Hono K., Microstructural evolution and age hardening in aluminium alloys: atom probe field-ion microscopy and transmission electron microscopy studies. *Materials Characterization*. 2000;44(1-2):101–131. [https://doi.org/10.1016/S1044-5803\(99\)00051-0](https://doi.org/10.1016/S1044-5803(99)00051-0)
5. Alcantara V. A Critical review of age treatment hardening mechanisms in aluminum alloys. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*. 2022;19(6):32–51. <https://doi.org/10.9790/1684-1906013251>
6. Luo J., Luo H., Liu C., Zhao T., Wang R., Ma Y. 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>
7. Koch C.C. Experimental evidence for magnetic or electric field effects on phase transformations. *Materials Science and Engineering: A*. 2000;287(2):213–218. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)00778-4](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)00778-4)
8. Алышиц В.И., Даринская Е.В., Колдаева М.В., Петржик Е.А. Магнитоэластический эффект: основные свойства и физические механизмы. *Кристаллография*. 2003;48(5):838–867. EDN: ONUMFP.
9. Моргунов Р.Б., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Королев Д.В. Термодинамический анализ магнитоэластических эффектов в «немагнитных» металлах. *Труды ВИАМ*. 2018;12(72):79–87. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-12-79-87>
10. Пост Р., Осинская Ю.В., Вильде Г., Дивинский С.В., Покоев А.В. Влияние температу-

- ры отжига и постоянного магнитного поля на распад закаленной бериллиевой бронзы БрБ-2. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2020; 5:36–44. EDN: WHUPDI.
<https://doi.org/10.31857/S102809602005012X>
11. Al-lubani S.E., Matarneh M., Al-Wedyan H., Rayes A. Heat treatment of aluminum alloy 7449. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Chemical, Materials Science and Engineering*. 2013;7(8):51–56.
 12. Быков С.Ю., Схиртладзе С.А. Испытания материалов: учеб. Пособие. Старый Оскол: ТНТ, 2015:135.
 13. Фульц Б., Хау Д.М. Просвечивающая электронная микроскопия и дифрактометрия материалов. Москва: Техносфера, 2011:904.
 14. Cappella B., Dietler G. Force-distance curves by atomic force microscopy. *Surface Science Reports*. 1999;34(1-3):1–3,5–104.
<https://doi.org/10.1016/S0167-5729%2899%2900003-5>
 15. Богодухов С.И. Материаловедение: учеб. для вузов. Москва: Машиностроение, 2015:503.
 16. Сенаторова О.Г., Антипов В.В., Бронз А.В., Сомов А.В., Серебренникова Н.Ю. Высокопрочные и сверхпрочные сплавы традиционной системы Al-Zn-Mg-Cu, их роль в технике и возможности развития. *Технология легких сплавов*. 2016;2:С. 43–49. EDN: WZTBVD
 17. Патент № 2764254 РФ. Способ термической обработки деталей из алюминиевого сплава В95пч в постоянном магнитном поле / Покоев А.В., Осинская Ю.В., Гречников Ф.В., Ерисов Я.А.; заявл. 01.11.2021; опубл. 14.01.2022. Бюл. № 2.
 18. Головин Ю.И. Магнитопластичность твердых тел. *Физика твердого тела*. 2004;46(5):769–803. EDN: RCZVLN.
 19. Hu Y., Zhao H., Yu X., Li J., Zhang B., Li T. Research progress of magnetic field regulated mechanical property of solid metal materials. *Metals*. 2022;12:1988.
<https://doi.org/10.3390/met12111988>
 20. Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. И.К. Кикоина. Москва: Атомиздат, 1976:1008.
 2. Williams J.C., Starke E.A. Progress in structural materials for aerospace systems. *Acta Materialia*. 2003;51(19):5775–5779.
<https://doi.org/10.1016/J.ACTAMAT.2003.08.023>
 3. Lee Y.S., Koh D.H., Kim H.W., Ahn Y.S. Improved bake-hardening response of Al-Zn-Mg-Cu alloy through pre-aging treatment. *Scripta Materialia*. 2018;147:45–49.
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2017.12.030>
 4. Ringer S.P., Hono K. microstructural evolution and age hardening in aluminium alloys: atom probe field-ion microscopy and transmission electron microscopy studies. *Materials Characterization*. 2000;44(1–2):101–131.
[https://doi.org/10.1016/S1044-5803\(99\)00051-0](https://doi.org/10.1016/S1044-5803(99)00051-0)
 5. Alcantara V. A Critical review of age treatment hardening mechanisms in aluminum alloys. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*. 2022;19:32–51.
<https://doi.org/10.9790/1684-1906013251>
 6. 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>
 7. Koch C.C. Experimental evidence for magnetic or electric field effects on phase transformations. *Materials Science and Engineering: A*. 2000;287:213. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)00778-4](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)00778-4)
 8. Al'shits V.I., Darinskaya E.V., Koldaeva M.V., Petrzhik E.A. The magnetoplastic effect: basic properties and physical mechanisms. *Kristallografiya*. (In Russ.). 2003;48(5):838. (In Russ.). EDN: ONUMFP.
 9. Morgunov R.B., Piskorskii V.P., Valeev R.A., Korolev D.V. Thermodynamic analysis of magnetoplastic effects in “non-magnetic” metals. *Trudy VIAM*. 2018;12:79–87. (In Russ.).
<https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-12-79-87>
 10. Osinskaya Yu.V., Pokoev A.V., Post R., Vil'de G., Divinskii S.V. The effect of annealing temperature and a constant magnetic field on the decay of hardened beryllium bronze BrB-2. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neutronnye issledovaniya*. 2020;5:36–44. (In Russ.). EDN: WHUPDI.
<https://doi.org/10.31857/S102809602005012X>
 11. Al-lubani, S., Matarneh, M., Al-Wedyan, H., Rayes, A. Heat treatment of aluminum alloy 7449. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Chemical, Materials Science and Engineering*. 2013;7:51–56.

REFERENCES

1. Zhu L., Li N., Childs P.R.N., Light-weighting in aerospace component and system design. *Propulsion and Power Research*. 2018;7(2):103–119.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jprr.2018.04.001>

12. Bykov S. Yu., Skhirtladze S.A. *Materials research: manual*. Stary Oskol: TNT, 2015;135. (In Russ.).
13. Fultz B., Howe D.M. *Transmission electron microscopy and diffractometry of materials*. Moscow: Tekhnosphere, 2011;904. (In Russ.).
14. Cappella B., Dietler G. Force-distance curves by atomic force microscopy. *Surface Science Reports*. 1999;34(1–3):1–3,5–104.
<https://doi.org/10.1016/S0167-5729%2899%2900003-5>
15. Bogodukhov S.I. *Materials science: manual*. Moscow: Mashinostroenie, 2015;503. (In Russ.).
16. Senatorova O.G., Antipov V.V., Bronz A.V., Somov A.V., Serebrennikova N.Yu. High-strength and super-strength alloys of the traditional Al-Zn-Mg-Cu system, their role in technology and development opportunities. *Technology of light alloys*. 2016;(2):43–49. (In Russ.).
17. Pokoev A.V., Osinskaya Yu.V., Grechnikov F.V., Erisov Ya.A. The method of heat treatment of aluminum alloy parts B95h in a constant magnetic field. Pat. No.2764254 RF. *Byulleten' izobretenii*. (In Russ.).
18. Golovin Yu.I. *Magnetoplasticity of solids*. *Fizika tverdogo tela*. 2004;46(5):769. EDN: RCZVLN. (In Russ.).
19. Hu Y., Zhao H., Yu X., Li J., Zhang B., Li T. Research progress of magnetic field regulated mechanical property of solid metal materials. *Metals*. 2022;12:1988.
<https://doi.org/10.3390/met12111988>
20. Kikoin I.K. *Tables of physical quantities. Guide*. Moscow: Atomizdat. 1976:1008. (In Russ.).

Сведения об авторах

Юлия Владимировна Осинская, к.ф.-м.н., заведующий кафедрой физики твердого тела и неравновесных систем, Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева

E-mail: ojv76@mail.ru

ORCID: 0000-0002-4586-4596

SPIN-код: 4675-6648

Сергей Романович Макеев, студент, учебный мастер кафедры физики твердого тела и неравновесных систем, Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева

E-mail: makeev.sr@ssau.ru

ORCID: 0009-0003-3200-070X

Сергей Васильевич Воронин, к.т.н., доцент кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения, Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева

E-mail: voronin.sv@ssau.ru

ORCID: 0000-0002-4370-9832

SPIN-код: 5010-5268

Екатерина Владимировна Терентьева, студент, Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева

E-mail: Terka2502@yandex.ru

ORCID: 0009-0008-5290-1384

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 named after Academician S.P. Korolev

E-mail: ojv76@mail.ru

ORCID: 0000-0002-4586-4596

SPIN-код: 4675-6648

Sergey R. Makeev, student, teaching master of the Department of Solid State Physics and Nonequilibrium Systems, Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev

E-mail: makeev.sr@ssau.ru

ORCID: 0009-0003-3200-070X

Sergey V. Voronin, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Metal Technology and Aviation Materials Science, Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev

E-mail: voronin.sv@ssau.ru

ORCID: 0000-0002-4370-9832

SPIN-код: 5010-5268

Ekaterina V. Terentyeva, student, Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev

E-mail: Terka2502@yandex.ru

ORCID: 0009-0008-5290-1384

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 18.03.2024

После доработки 04.06.2024

Принята к публикации 05.06.2024

Received 18.03.2024

Revised 04.06.2024

Accepted 05.04.2024