УДК 537.63:539.26

Посвящается профессору
кафедры физики твердого тела
и неравновесных систем
Самарского университета,
д.ф.-м.н. Покоеву Александру Владимировичу

ВЛИЯНИЕ ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПАРАМЕТРЫ МАГНИТОПЛАСТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В АЛЮМИНИЕВОМ СПЛАВЕ В95пч

© 2024 г. Ю. В. Осинская[a, *], С. В. Воронин[a], С. Р. Макеев[a], И. И. Левин[a]

[a]*Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева, Самара, 443086 Россия*
**e-mail: ojv76@mail.ru*

Поступила в редакцию 22.06.2023 г.
После доработки 25.08.2023 г.
Принята к публикации 25.08.2023 г.

Проведено комплексное экспериментальное исследование магнитопластического эффекта, который обнаружен в алюминиевом сплаве В95пч, состаренном в слабом постоянном магнитном поле. Получены данные о химическом составе алюминиевого сплава В95пч, режимах термической и термомагнитной обработок и основных экспериментально наблюдаемых закономерностях изменений значений микротвердости, модуля упругости отдельных локальных областей и фазового состава алюминиевого сплава В95пч, состаренного при температуре 140°С, времени отжига от 2 до 8 ч, в постоянном магнитном поле напряженностью 557.0 кА/м и в его отсутствии. Установлено, что постоянное магнитное поле в значительной мере влияет на прочностные свойства и структуру алюминиевого сплава В95пч. Обнаружен отрицательный магнитопластический эффект, величина которого составляет 21%. При этом наблюдается, что постоянное магнитное поле не оказывает существенного влияния на средний размер зерна, однако размер и количество наблюдаемых инородных включений внутри зерна становится значительно меньше по сравнению со старением в отсутствии магнитного поля. Кроме этого, наложение постоянного магнитного поля на процесс фазообразования приводит к формированию более искаженной структуры: полуширина дифракционных линий становятся шире. Обнаружена корреляции результатов измерения микротвердости и модуля упругости алюминиевого сплава В95пч.

Ключевые слова: алюминиевый сплав В95пч, старение, постоянное магнитное поле, магнитопластический эффект, рентгенофазовый анализ.

DOI: 10.31857/S1028096024020095, **EDN:** AZZZTI

ВВЕДЕНИЕ

Новые задачи промышленного производства требуют улучшенных конструкционных характеристик металлических сплавов, из которых изготавливают детали, работающие при разнообразных нагрузках, средах и температурах. Это касается также алюминия и его сплавов, которые широко используют в качестве конструкционных материалов. Одним из наиболее известных методов трансформации свойств металлических сплавов является технология искусственного старения, с помощью которой можно значительно улучшить прочностные характеристики сплавов. В процессе старения в решетке сплава образуются дисперсные кластеры, скорость роста которых зависит от внешних воздействий, в том числе от постоянного магнитного поля (ПМП). Ранее было установлено [1–3], что ПМП существенным образом влияет на структуру и размер фаз, которые тормозят движение дислокаций, что и обуславливает повышение прочностных свойств бериллиевой бронзы БрБ-2. Одной из причин влияния ПМП на микротвердость металлических сплавов является магнитное и структурное упорядочение, возникающее в сплаве [4–6]. Следовательно,

становится актуальным и практически значимым выяснить влияние ПМП на физико-механические свойства, структуру и фазообразование в высокопрочном алюминиевом сплаве В95пч при старении. В связи с этим, целью настоящей работы является комплексное экспериментальное исследование влияния ПМП на структуру, величину и знак магнитопластического эффекта (МПЭ) и фазовый состав состаренного алюминиевого сплава В95пч.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Образцы в виде куба с ребром ~1 см вырезали из промышленного листа алюминиевого технического сплава В95пч, химический состав которого приведен в табл. 1. Далее предварительно закаленные образцы искусственно старили в вакууме ~10^{-3} Па, режимы термомагнитной обработки представлены в табл. 2. Характеристики ПМП, температуру и время старения выбирали на основе литературных данных [2, 7, 8].

Ниже приведены основные результаты, полученные при исследовании микротвердости, структуры и фазового состава методами металлографического и рентгенофазового анализа, рельефа поверхности образцов и модуля упругости локальных областей методом сканирующей силовой зондовой микроскопии.

Металлографические измерения проводили на оптическом металлографическом микроскопе МИМ–8М. Средний размер зерен вычисляли с помощью программы “ВидеоТестРазмер-5.0”. Относительная ошибка измерений среднего значения размера зерна составила 38%.

Микротвердость по методу Виккерса [9] измеряли с помощью микротвердомера HAUSER при нагрузке 100 г и времени нагружения – 7 с. Каждое значение микротвердости получали усреднением по 20 измерениям. Относительная ошибка определения среднего значения микротвердости составила 3–5%.

Рентгенофазовый анализ выполняли с использованием CoKα-излучения на дифрактометре “ДРОН-2”, оснащенном аппаратно-программным комплексом управления, регистрации и обработки результатов измерений. Параметры эксперимента были следующими: анодный ток – 20 мА; напряжение на рентгеновской трубке – 30 кВ; скорость движения счетчика – 0.4 град/мин; щели 0.5–4–0.5 мм.

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Типичные изображения структуры алюминиевого сплава В95пч после закалки и старения в ПМП и без него представлены на рис. 1. После закалки (рис. 1а) на поверхности металлографического шлифа можно наблюдать инородные включения в виде черных вкраплений, природа

Таблица 1. Химический состав сплава В95пч

Элемент	Содержание в сплаве, вес. %
Al	87.45 – 91.45
Zn	5.00 – 6.50
Mg	1.80 – 2.0
Cu	1.40 – 2.00
Примеси, не более	
Fe	0.05 – 0.25
Mn	0.2 – 0.6
Cr	0.10 – 0.25
Si	до 0.1
Ni	до 0.1
Ti	до 0.05
Всего примесей: 1.35 вес. %	

Таблица 2. Режимы термомагнитной обработки для алюминиевого сплава В95пч

Температура отжига T, °C	Время отжига t, ч	Напряженность магнитного поля H, кА/м
Закалка при 470°C (1 ч) водой (20°C)		
140	2	0
		557.0
	4	0
		557.0
	6	0
		557.0
	8	0
		557.0

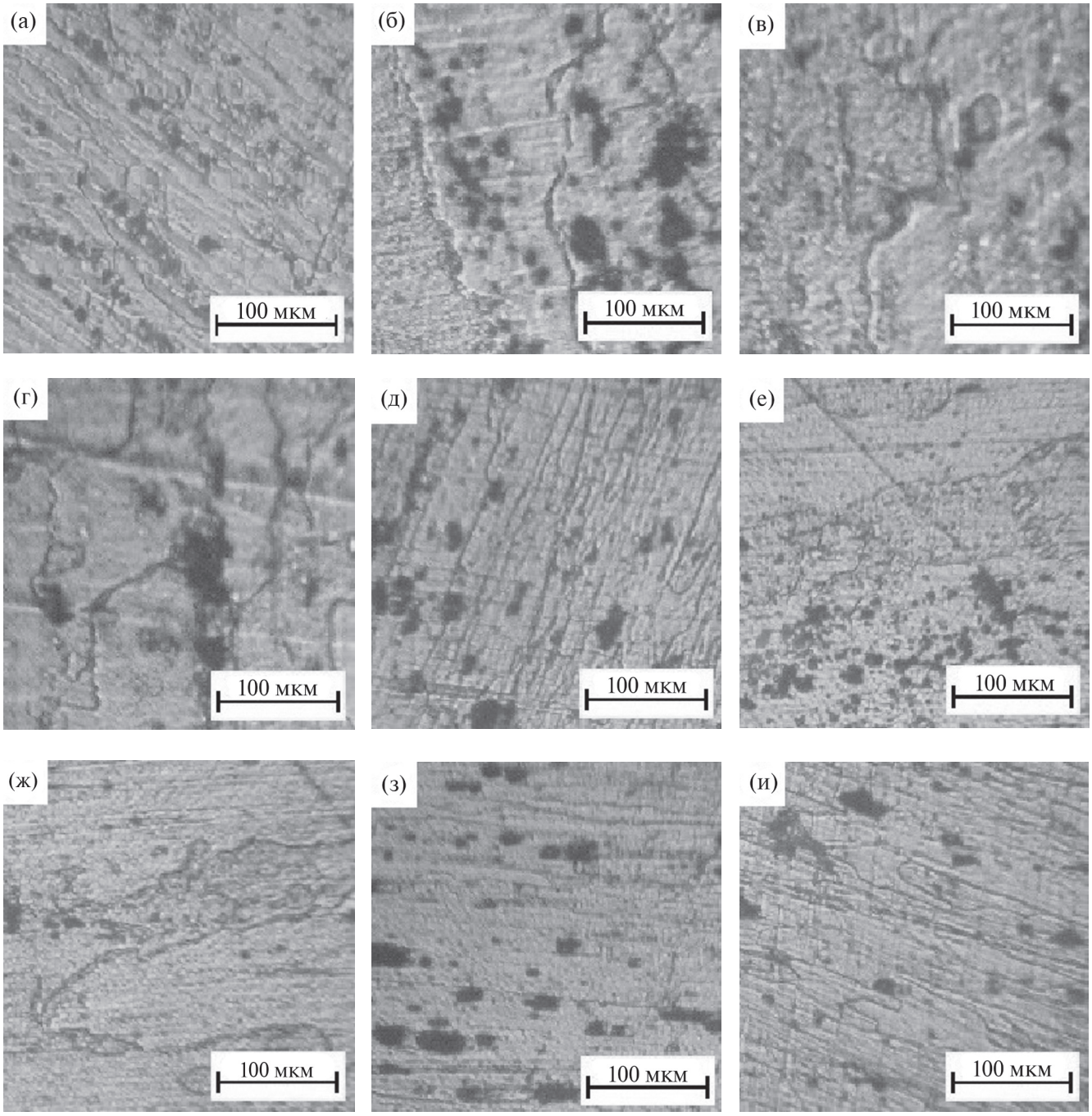

Рис. 1. Результаты металлографического исследования сплава В95пч: закаленного при 470°С (1 ч) в воде 20°С (а); состаренного в течение 2 (б, в), 4 (г, д) 6 (е, ж) и 8 ч (з, и) при напряженности магнитного поля 0 (б, г, е, з) и 557.0 кА/м (в, д, ж, и).

которых на данный момент не установлена (предположительно это могут быть не растворившиеся при нагреве интерметаллидные фазы). После отжига сплава длительностью от 2 до 8 ч без наложения магнитного поля (рис. 1б, 1г, 1е, 1з) структура сплава претерпевает некоторые изменения, а именно: размер включений становится значительно больше, чем в закаленном состоянии, границы зерен становятся ярко выраженными. Средний размер зерен составил 210 ± 80 мкм. Наложение ПМП при старении сплава (рис. 1в, 1д, 1ж, 1и) приводит к уменьшению количества и размера включений, а в некоторых случаях они практически полностью отсутствуют. Кроме этого, обнаружены зерна, средний размер которых не претерпевает изменений и достигает значения 205 ± 78 мкм.

Результаты влияния ПМП на микротвердость алюминиевого сплава В95пч представлены в табл. 3, а также наглядно изображены на рис. 2. Из рис. 2 видно, что после закалки значение микротвердости достигает значения 1363 МПа. Полученные результаты согласуются с литературными данными [7], что свидетельствует об их достоверности.

Старение в течение 2 ч без наложения ПМП приводит к существенному возрастанию микротвердости до 1853 МПа. Известно [7, 11], что при старении металлического сплава В95пч выделяются фазы (в частности, $MgZn_2$ и $MgZn_4$), которые тормозят движение дислокаций и тем самым, приводят к возрастанию прочностных свойств сплава. После отжига 4 ч наблюдается минимальные значения микротвердости сплава, а дальнейшее увеличение длительности старения до 8 ч приводит к росту микротвердости до 1755 МПа. Возможно, данный ход зависимости микротвердости сплава связан со стадийностью процесса зарождения, роста и формирования фазы. Максимальное значение микротвердости наблюдается при времени старения 2 ч.

Наложение ПМП на старение сплава всегда приводит к увеличению микротвердости до 21%. Это так называемый отрицательный магнитопластический эффект [12–18]. Кроме того, обнаружено, что ПМП не изменяет кинетики процесса старения исследуемого сплава. Максимум микротвердости также был достигнут при времени старения 2 ч и составил 2029 МПа. Увеличение микротвердости можно объяснить тем, что при наложении ПМП структура сплава становится более искаженной, как показали результаты рентгенофазового анализа, приведенные ниже. Вследствие этого движущиеся дислокации встречают на своем пути значительно большее количество стопоров (фазы, границ зерен и т.д.), и сплав становится более прочным.

В результате проведенного рентгенофазового анализа исследуемых образцов (рис. 3) были идентифицированы фазы, выделившиеся в процессе старения сплава в ПМП и без него. На дифрактограммах закаленного образца присутствуют отражения от α-твердого раствора на основе алюминия, которые смещены в сторону меньших углов относительно линий чистого алюминия. Данное смещение линий обусловлено наличием примеси магния в твердом растворе алюминия. Размеры атомов магния на 12% больше, чем атомов алюминия, что приводит к увеличению параметра решетки сплава, и, как следствие, к смещению дифракционных линий. Кроме этого, все обнаруженные отражения на дифрактограмме закаленного образца стали менее интенсивными,

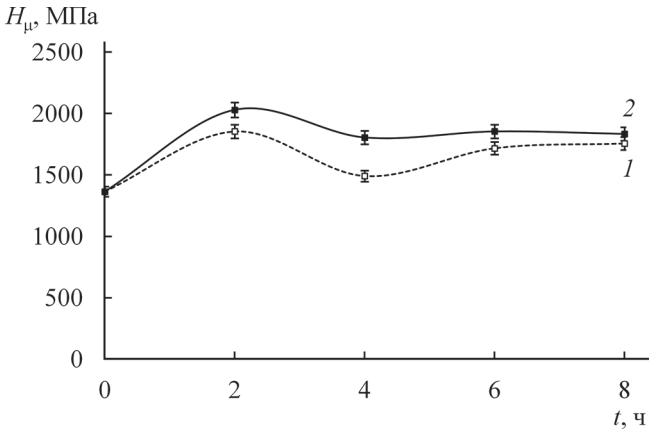

Рис. 2. Зависимость микротвердости алюминиевого сплава В95пч от времени старения в отсутствие магнитного поля (*1*) и при напряженности магнитного поля 557.0 кА/м (*2*).

Таблица 3. Результаты измерения микротвердости сплава В95пч

Время отжига t, ч	Напряженность магнитного поля H, кА/м	$H_\mu \pm \Delta H_\mu$, МПа	$(H_{\mu,H\neq0} - H_{\mu,H=0})/H_{\mu,H=0}$, %
Закалка 470°С → 20°С	–	1363 ± 19	–
2	0	1853 ± 19	10
2	557.0	2029 ± 19	
4	0	1490 ± 29	21
4	557.0	1804 ± 19	
6	0	1716 ± 49	8
6	557.0	1853 ± 49	
8	0	1755 ± 19	4
8	557.0	1833 ± 19	

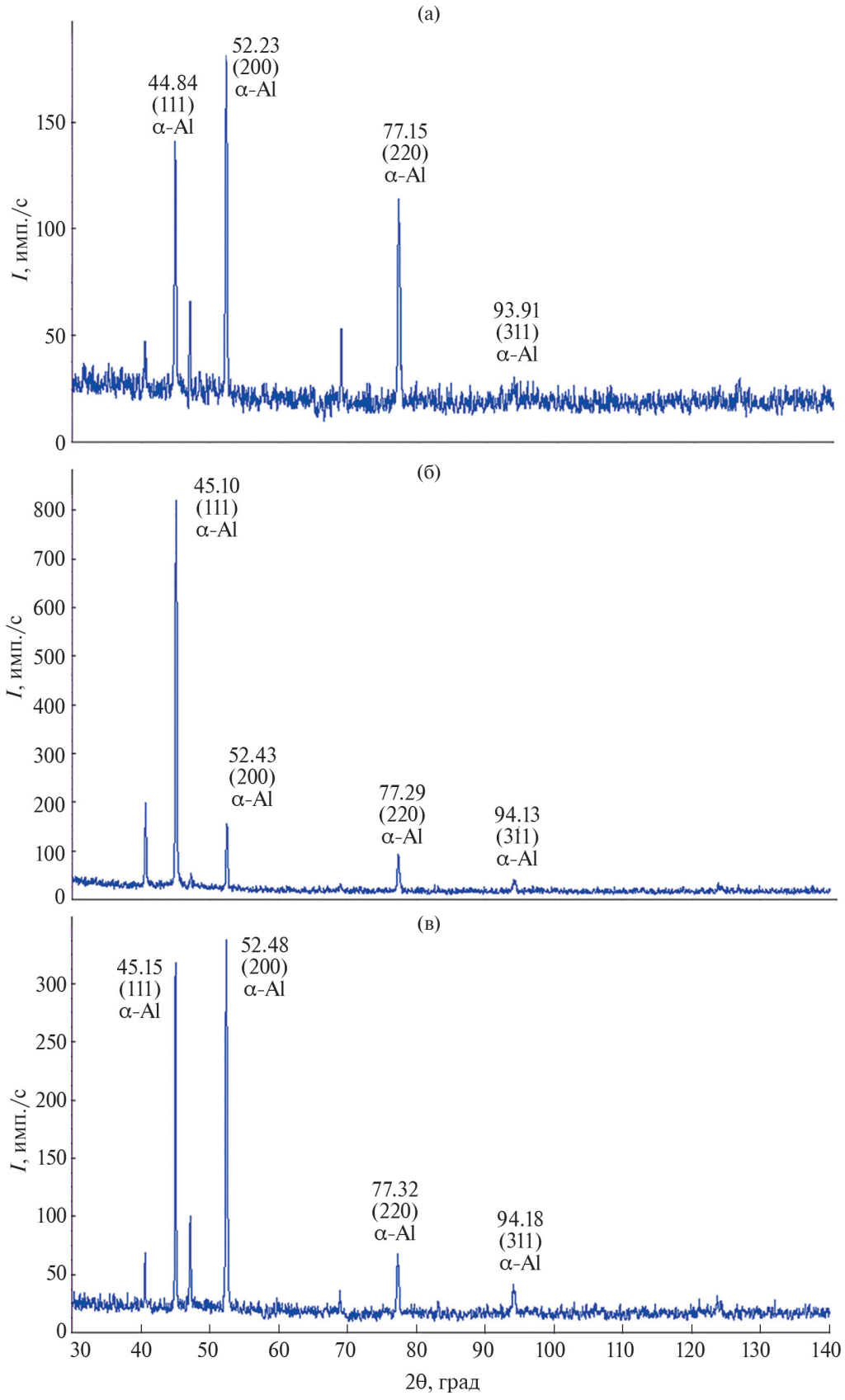

Рис. 3. Дифрактограммы, полученные от алюминиевого сплава В95пч, закаленного при 470°С (1 ч) в воде 20°С (а); состаренного в течение 2 ч при напряженности магнитного поля 0 (б) и 557.0 кА/м (в). Отмечены индексы отражений, относящихся к фазе α-Al.

и их полуширина увеличилась, что свидетельствует об искаженности кристаллической решетки вследствие наличия в сплаве примесей магния, цинка и меди.

Отжиг от 2 до 8 ч без наложения магнитного поля приводит к увеличению интенсивности до 3 раз и уширению дифракционных максимумов на 0.15°, соответствующих α-твердому раствору на основе алюминия, по сравнению со случаем закаленного образца. Данный факт указывает об искаженности кристаллической решетки сплава, связанной с процессами старения и перестройкой структуры. Также наблюдается смещение дифракционных линий в сторону больших углов на 0.12°, что связано с уменьшением параметра кристаллической решетки сплава, обусловленным процессом старения.

Наложение ПМП на процесс старения приводит к увеличению полуширины дифракционных максимумов на 0.18°, соответствующих α-твердому раствору на основе алюминия, по сравнению со старением без поля. Данный факт свидетельствует об еще большей искаженности кристаллической решетки сплава. Также наблюдали смещение дифракционных максимумов в сторону больших углов на 0.05°, что связано с уменьшением параметра кристаллической решетки сплава, обусловленным процессом старения.

Результаты исследований методом сканирующей зондовой микроскопии и оптическое изображение металлографического шлифа алюминиевого сплава В95пч, состаренного в ПМП и в его отсутствие, представлены на рис. 4. В табл. 4 занесены полученные средние значения модуля упругости.

Таблица 4. Результаты измерения модуля упругости алюминиевого сплава В95пч

Область структуры	Модуль упругости, ГПа	
α-твердый раствор на основе алюминия	Старение, 2 ч, 140°С 0 кА/м	Старение, 2 ч, 140°С 557.0 кА/м
	91 ± 7	75 ± 8

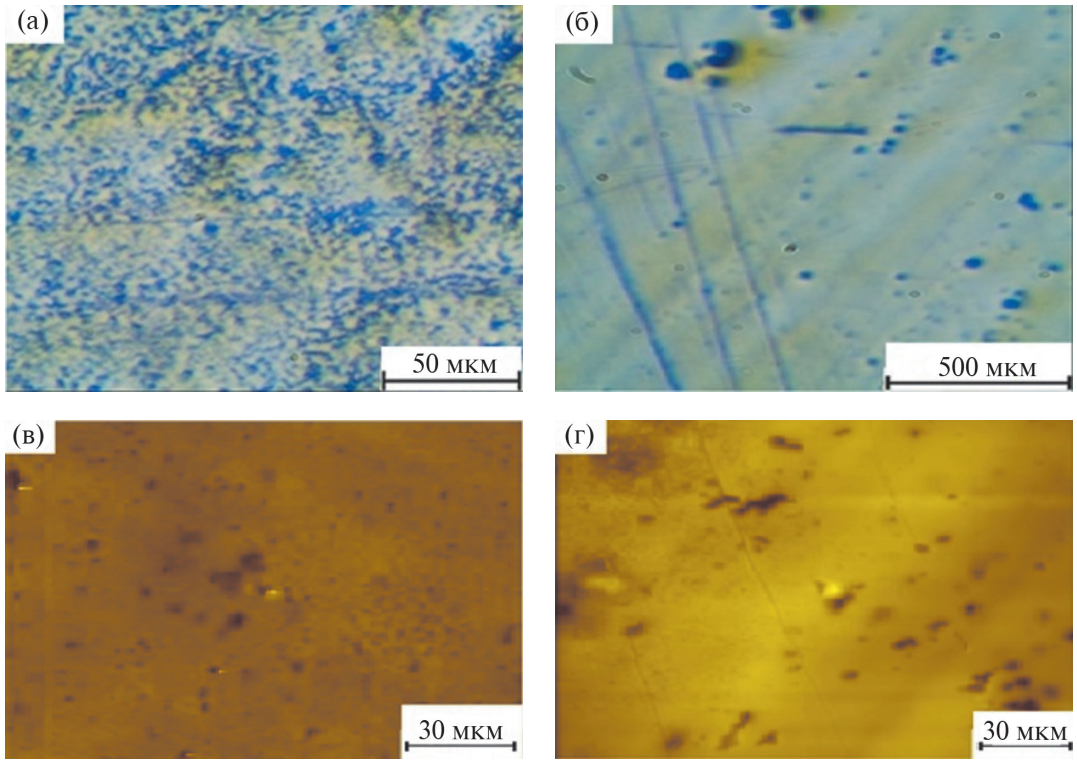

Рис. 4. Оптическое изображение поверхности металлографического шлифа (а, б) и результаты исследований с помощью сканирующей зондовой микроскопии (в, г) образца алюминиевого сплава В95пч, состаренного в течение 2 ч при напряженности магнитного поля 0 (а, в) и 557.0 кА/м (б, г).

Из рис. 4 видно, что структура алюминиевого сплава В95пч представляет собой α-твердый раствор на основе алюминия с включениями в виде черных вкраплений, подобные результаты были получены также методом металлографического анализа (рис. 1). Значения модуля упругости (табл. 4), полученные в отсутствие магнитного поля, согласуются со справочными данными [19, 20], что свидетельствует о их достоверности. Наложение ПМП на процесс старения приводит к уменьшению значений модуля упругости алюминиевого сплава В95пч на 17% по сравнению со старением без поля. Данный факт указывает на корреляцию результатов измерения модуля упругости и микротвердости (рис. 2, табл. 3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных результатов исследования структуры и прочностных характеристик сплава В95пч позволяет сделать следующие выводы. Результаты металлографического анализа показывают, что ПМП оказывает существенное воздействие на структуру сплава, однако средний размер зерен не претерпевает значительных изменений. Наложение ПМП на старение алюминиевого сплава В95пч приводит к существенному увеличению микротвердости (до 21%), наблюдается отрицательный магнитопластический эффект. Методом рентгенофазового анализа показано, что ПМП приводит к росту интенсивности дифракционных максимумов до 3 раз и их уширению, что свидетельствует об искаженности структуры сплава и более интенсивном процессе фазообразования. Старение в ПМП приводит к уменьшению модуля упругости на 17% по сравнению со старением без поля. Результаты работы могут быть учтены при создании новых и развития существующих технологий термообработки алюминиевого сплава В95пч и прогнозирования его физико-механических свойств.

Конфликт интересов. Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Осинская Ю.В., Покоев А.В., Пост Р., Вильде Г., Дивинский С.В.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2020. № 5. С. 36. https://www.doi.org/10.31857/S102809602005012X.
2. *Post R., Osinskaya J.V., Divinski S.V., Pokoev A.V., Wilde G.* // Defect and Diffusion Forum. 2018. V. 383. P. 173. https://www.doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.383.173.
3. *Чуистов К.В.* Старение металлических сплавов. Киев: Наукова думка, 1985. 230 с.
4. *Загуляев Д.В., Коновалов С.В., Ярополова Н.Г., Иванов Ю.Ф., Комиссарова И.А., Громов В.Е.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2015. № 5. С. 99. https://www.doi.org/10.7868/S0207352815010187
5. *Осинская Ю.В., Покоев А.В.* // Вестник Тамбовского университета. 2016. Т. 21. Вып. 3. С. 1207. https://www.doi.org/10.20310/1810-0198-2016-21-3-1207-1210
6. *Осинская Ю.В., Покоев А.В., Дивинский С.В., Магамедова С.Г.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2023. № 3. С. 105. https://www.doi.org/10.31857/S1028096022030123
7. *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., Фриндляндер И.Н.* Металловедение алюминия и его сплавов. М.: Металлургия, 1983. 280 с.
8. *Зенин М.Н., Гурьев А.М., Иванов С.Г., Гурьев М.А., Черных Е.В.* // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2022. Т. 19. № 1. С. 106. https://www.doi.org/10.25712/ASTU.1811-1416.2022.01.012
9. *Геллер Ю.А.* Материаловедение. М.: Металлургия, 1989. 456 с.
10. *Cappella B., Dietler G.* // Surf. Sci. Rep. 1999. V. 34. Iss. 1–3. P. 104. https://www.doi.org/10.1016/S0167-5729(99)00003-5
11. *Алиева С.Г., Альтман М.Б., Амбарцумян С.М.* Промышленные алюминиевые сплавы: Справ. Изд. М.: Металлургия, 1984. 528 с.
12. *Альшиц В.И., Даринская Е.В., Колдаева М.В., Петржик Е.А.* // Кристаллография. 2003. Т. 48. С. 838.
13. *Головин Ю.И.* // Физика твердого тела. 2004. Т. 46. Вып. 5. С. 769.
14. *Молоцкий М.И.* // Физика твердого тела. 1993. Т. 35. Вып. 1. С. 11.
15. *Бучаченко А.Л.* // ЖЭТФ. 2007. Т. 132. Вып.4. С. 827.
16. *Молоцкий М.И.* // Физика твердого тела. 1991. Т. 33. Вып. 10. С. 3112.
17. *Моргунов Р.Б.* // Успехи физических наук. 2004. Т. 174. № 2. С. 131. https://www.doi.org/10.3367/UFNr.0174.200402c.0131
18. *Альшиц В.И., Даринская Е.В., Колдаева М.В., Котовский Р.К., Петржик Е.А., Трончик П.* // Успехи физических наук. 2017. Т. 187. № 3. С. 327. https://www.doi.org/10.3367/UFNr.2016.07.037869
19. Цветные металлы и сплавы, применяемые в электронной промышленности. Справочник. Научно-исследовательский институт, 1972. 125 с.
20. *Кикоин И.К.* Таблицы физических величин. Справочник. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.

Influence of a Constant Magnetic Field on the Parameters of the Magnetoplastic Effect in Aluminum Alloy B95pch

J. V. Osinskaya[1, *], S. V. Voronin[1], S. R. Makeev[1], I. I. Levin[1]

[1]Samara National Research University, Samara, 443086 Russia
**e-mail: ojv76@mail.ru*

The present work is devoted to the comprehensive experimental study of the magnetoplastic effect found in the aluminum alloy B95pch aged in a weak constant magnetic field. The data on chemical composition of aluminum alloy B95pch, modes of thermal and thermomagnetic treatments and main experimentally observed regularities of changes in values of microhardness, modulus of elasticity of separate local areas and phase composition of aluminum alloy B95pch, aged at temperature 140°C, time from 2 to 8 h, in a constant magnetic field with intensity 557.0 kA/m and in its absence are presented. It was found that the constant magnetic field significantly affects the strength properties and structure of aluminum alloy B95pch. The negative magnetoplastic effect has been detected, the value of which is 21%. It is observed that the constant magnetic field does not significantly affect the average grain size, however, the size and number of observed foreign inclusions within the grain become significantly smaller compared to aging in the absence of magnetic field. In addition, the imposition of the constant magnetic field on the phase formation process leads to the formation of a more distorted structure: the half-width of diffraction lines becomes wider. The results of microhardness and modulus of elasticity measurements of aluminum alloy B95pc were found to be correlated.

Keywords: aluminum alloy B95pch, aging, constant magnetic field, magnetoplastic effect, X-ray phase analysis.