

УДК 537.63:539.26

## ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОЦЕСС ФАЗООБРАЗОВАНИЯ В СОСТАРЕННОМ АЛЮМИНИЕВОМ СПЛАВЕ Al–Si–Cu–Fe

© 2022 г. Ю. В. Осинская<sup>а</sup>, \*, А. В. Покоев<sup>а</sup>, С. Г. Магамедова<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Самара, 443086 Россия

\*e-mail: oju76@mail.ru

Поступила в редакцию 25.06.2021 г.

После доработки 22.07.2021 г.

Принята к публикации 29.07.2021 г.

В работе представлен краткий обзор полученных в последние годы экспериментальных данных по магнитопластическому эффекту, возникающему в алюминиевых сплавах после старения в слабых постоянных магнитных полях. Приведены сведения о составе, режимах термомагнитной обработки и основных экспериментально наблюдаемых закономерностях изменений микротвердости, параметра решетки и фазового состава алюминиевого сплава Al–Si–Cu–Fe, отожженного при температуре 175°C в течение 4 ч в постоянном магнитном поле напряженностью от 79.6 до 557.0 кА/м и в его отсутствие. Сформулированы основные наблюдаемые закономерности изменения структуры и свойств материала в процессе отжига.

**Ключевые слова:** магнитопластический эффект, алюминиевый сплав, магнитное поле, термомагнитная обработка, микротвердость, рентгенофазовый анализ, старение, искусственное старение, отжиг, закалка.

DOI: 10.31857/S1028096022020091

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время установлено, что на процесс упрочнения стареющих закаленных сплавов существенным образом влияют внешние воздействия: пластическая деформация, статическое и динамическое давление, ультразвуковое воздействие, корпускулярное облучение, малые добавки примесей и т.д. В последние годы наблюдается повышенный интерес к изучению влияния слабых магнитных полей на характеристики и физико-механические свойства различных материалов. Слабые магнитные поля могут влиять на микро- и макроскопические свойства различных диамагнитных материалов, данный эффект получил название магнитопластического эффекта (МПЭ). Под действием магнитных полей изменяются микротвердость, внутреннее трение, предел прочности и другие макроскопические свойства [1–3] в ионных кристаллах, полупроводниках, металлах, молекулярных кристаллах, полимерах и т.д.

В работах [4–6] установлено, что при искусственном старении закаленного технического сплава бериллиевой бронзы БрБ-2 в постоянном магнитном поле (ПМП) увеличение микротвердости может достигать ~30%. Поскольку пласти-

ческие свойства сплава при этом уменьшаются, наблюдаемый эффект можно определить как “отрицательный” МПЭ [1–3].

Целью данной работы является экспериментальное исследование влияния напряженности постоянного магнитного поля на параметры магнитопластического эффекта и фазообразование при старении в алюминиевом сплаве Al–Si–Cu–Fe.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В табл. 1 представлены режимы термомагнитной обработки для алюминиевого сплава Al–Si–Cu–Fe. Предварительно образцы подвергали закалке, с этой целью образцы выдерживали в печи в атмосфере воздуха при температуре 535°C в течение 2 ч, затем охлаждали быстрым погружением в воду при температуре  $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$ . Далее закаленные образцы искусственно старили в динамическом вакууме  $\sim 10^{-3}$  Па [7]. Температуру и время старения выбирали используя литературные данные или результаты ранее проведенных предварительных опытов.

Ниже приводятся основные результаты, полученные методами рентгеновского анализа, и из-

мерения микротвердости с их компьютерной обработкой.

Микротвердость по методу Виккерса [8] измеряли с помощью микротвердомера HAUSER при нагрузке 100 г и времени нагружения 7 с ошибкой измерений не более  $\sim 2\text{--}3\%$  [9]. Каждое значение микротвердости получали усреднением по 30 измерениям.

Рентгенографический анализ проводили с помощью дифрактометра ДРОН-2 ( $\text{CoK}_\alpha$ -излучение), оснащенного аппаратно-программным комплексом управления, регистрации и обработки результатов измерений. Режимы рентгеновской съемки: анодный ток составлял 20 мА; напряжение на рентгеновской трубке – 30 кВ; скорость движения счетчика – 0.2 и 0.4°/мин.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты измерений влияния напряженности постоянного магнитного поля на микротвердость алюминиевых сплавов представлены на рис. 1.

Как следует из рис. 1, в закаленном состоянии среднее значение микротвердости составляет 774 МПа. Полученное значение микротвердости согласуется с литературными данными [10, 11], что свидетельствует о достоверности результатов настоящей работы. Старение при температуре 175°C и времени 4 ч приводит к увеличению микротвердости исследуемого сплава до значения 1156 МПа. Это объясняется тем, что при старении металлического сплава выделяются фазы (в частности,  $\text{Mg}_2\text{Si}$ ), которые тормозят движение дислокаций и тем самым приводят к возрастанию прочностных свойств сплава [12]. Отжиг алюминиевого сплава Al–Si–Cu–Fe в постоянном магнитном поле напряженностью от 79.6 до 557.0 кЭ при времени 4 ч приводит к меньшему росту микротвердости исследуемого сплава (до 862 МПа), что на 250–300 МПа меньше, чем для отжига без приложения поля. Наблюдается положительный МПЭ величиной до 25%. Стоит отметить, что с увеличением напряженности постоянного магнитного поля значения микротвердости практически не изменяются.

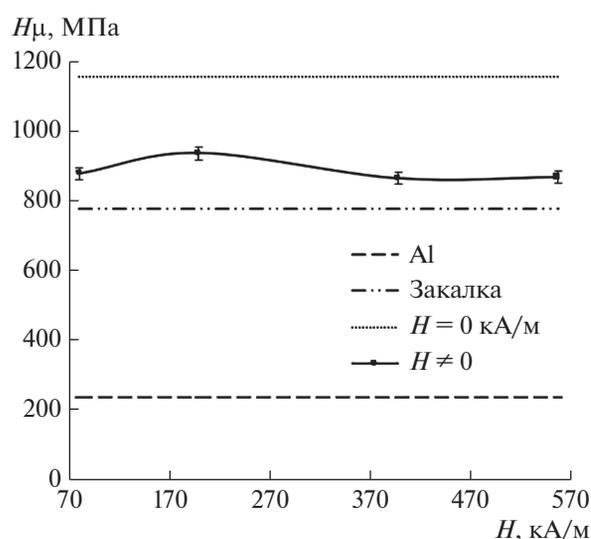
Большую информацию о структуре исследуемого материала несут сведения о параметрах решетки. Поэтому в данной работе был проведен рентгенографический анализ (РГА) образцов, отожженных в постоянном магнитном поле и без него. В табл. 2 приведены результаты РГА (бреговские углы, индексы отражающих плоскостей, параметры решетки) образцов, прошедших тер-

**Таблица 1.** Режимы термомагнитной обработки алюминиевого сплава Al–Si–Cu–Fe

Температура отжига $T$ , °С	Время отжига $t$ , ч	Напряженность постоянного магнитного поля, кА/м
Закалка 535°C (2 ч) в воду (20°C)		
175	4	0
		79.6
		198.9
		397.9
		557.0

мическую и термомагнитную обработку, а на рис. 2 представлена временная зависимость параметра решетки при температуре отжига 175°C и времени отжига от 2 до 8 ч, построенная по результатам расчета по линии (311). Данные, полученные методом РГА, дают представление о полной картине изменения параметра решетки исследуемого материала. Среднеквадратичная ошибка отдельного измерения параметра решетки составляет 0.001 Å, относительная ошибка отдельного измерения параметра решетки – 0.04%.

Из рис. 2 следует, что после закалки от 535°C (2 ч), параметр решетки сплава больше параметра решетки чистого алюминия и составляет 4.054 Å, это связано с наличием в твердом растворе алюминия атомов кремния и магния, которые явля-



**Рис. 1.** Зависимость микротвердости алюминиевого сплава Al–Si–Cu–Fe от напряженности постоянного магнитного поля.

**Таблица 2.** Результаты измерений параметров решетки алюминиевого сплава Al–Si–Cu–Fe

Чистый алюминий				Закалка 535°C (2 ч) → 20°C			
2θ, град	θ, град	HKL	a, Å	2θ, град	θ, град	HKL	a, Å
94.30	47.15	311	4.050	94.16	47.08	311	4.054
Старение, 4 ч, 0 кА/м				Старение, 4 ч, 79.6 кА/м			
2θ, град	θ, град	HKL	a, Å	2θ, град	θ, град	HKL	a, Å
94.08	47.04	311	4.057	94.20	47.01	311	4.053
–	–	–	–	Старение, 4 ч, 198.9 кА/м			
–	–	–	–	2θ, град	θ, град	HKL	a, Å
–	–	–	–	94.10	47.05	311	4.056
–	–	–	–	Старение, 4 ч, 397.9 кА/м			
–	–	–	–	2θ, град	θ, град	HKL	a, Å
–	–	–	–	94.14	47.07	311	4.055
–	–	–	–	Старение, 4 ч, 557.0 кА/м			
–	–	–	–	2θ, град	θ, град	HKL	a, Å
–	–	–	–	94.21	47.01	311	4.052

ются примесью внедрения и замещения соответственно.

В процессе старения сплава происходит перераспределение атомов кремния между α-твердым раствором на основе алюминия и фазой кремния, в результате чего значения параметра решетки сплава увеличиваются по сравнению с закаленным состоянием, что наглядно видно на рис. 2.

Наложение постоянного магнитного поля практически не приводит к изменению параметра решетки по сравнению с параметром решетки сплава, состаренного без поля, значения лежат в пределах ошибки измерения.

В результате проведенного рентгенофазового анализа (РФА) по дифрактограммам исследуемых образцов получены данные об интенсивностях дифракционных линий, межплоскостных расстояниях и полуширине линий каждого образца. По полученным данным были идентифицированы фазы, выделившиеся в процессе старения в постоянном магнитном поле и без него.

На дифрактограмме закаленного образца наблюдаются линии α-твердого раствора на основе

алюминия, которые смещены в сторону меньших углов до 0.22° относительно линий чистого алюминия. Данное смещение линий обусловлено наличием в твердом растворе алюминия атомов кремния, которые являются примесью внедрения. Атомы кремния располагаются в междоузлиях кристаллической решетки алюминия, что приводит к увеличению параметра решетки сплава и, как следствие, к смещению линий на дифрактограммах. Также обнаруживаются линии, соответствующие фазе Mg<sub>2</sub>Si и чистому кремнию. Кроме этого, интенсивность всех линий уменьшается в три раза, а их полуширина увеличивается до 0.15°, что свидетельствует об искаженности кристаллической решетки сплава в связи с наличием примесей (Mn, Zn, Mg, Ni).

Отжиг в течение 4 ч без наложения поля приводит к уменьшению интенсивности всех наблюдаемых линий до 1.6 раз и их уширению до 0.17° по сравнению с закаленным образцом. Данный факт указывает о большей искаженности кристаллической решетки, связанной с процессами старения и перестройки структуры. Кроме этого, наблюда-

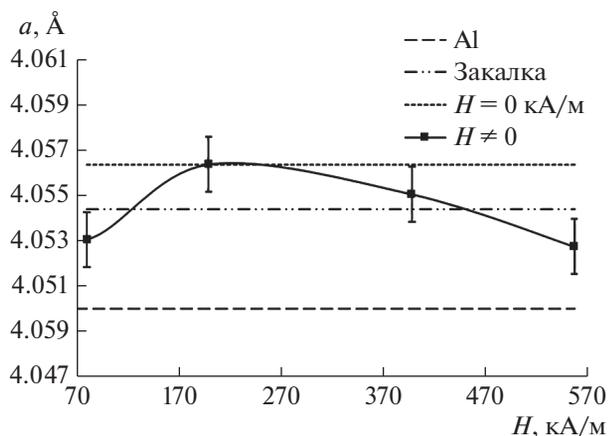


Рис. 2. Зависимость параметра решетки алюминиевого сплава Al–Si–Cu–Fe от напряженности постоянного магнитного поля.

ется смещение линий  $\alpha$ -твердого раствора на основе алюминия в сторону меньших углов до  $0.09^\circ$ , что обусловлено увеличением параметра решетки сплава по сравнению с закаленным состоянием.

Старение алюминиевого сплава Al–Si–Cu–Fe в постоянном магнитном поле напряженностью от 79.6 до 557 кА/м приводит к увеличению интенсивности всех наблюдаемых линий ( $\alpha$ -твердого раствора на основе алюминия, фазы  $Mg_2Si$  и чистого кремния с элементами эвтектики) до 16 раз по сравнению с отжигом без поля и уменьшению их полуширины до  $0.2^\circ$ , что свидетельствует о формировании более совершенной и однородной структуры сплава. Практически всегда наблюдается смещение линий  $\alpha$ -твердого раствора на основе алюминия в сторону больших углов до  $0.42^\circ$ , что обусловлено меньшими значениями параметра решетки сплава по сравнению со старением без наложения поля.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методами рентгеновского анализа, а также посредством измерения микротвердости выполнено комплексное экспериментальное исследование влияния постоянного магнитного поля напряженностью от 79.6 до 557 кА/м, времени старения 4 ч и температуры отжига  $175^\circ C$  на параметры решетки фазовый состав и микротвердость составленного алюминиевого сплава Al–Si–Cu–Fe.

Установлено, что отжиг алюминиевого сплава Al–Si–Cu–Fe в постоянном магнитном поле напряженностью от 79.6 до 557 кА/м приводит к уменьшению микротвердости до 25%, при этом пластические свойства сплава возрастают, что имеет большое практическое значение. Наблюда-

ется положительный магнитоэластический эффект.

Анализ данных, полученных рентгенографическим методом, свидетельствует о том, что отжиг алюминиевого сплава Al–Si–Cu–Fe в постоянном магнитном поле не приводит к существенному изменению параметра решетки сплава по сравнению с отжигом без поля: с увеличением напряженности поля значения параметра решетки практически не изменяются.

Методом рентгенофазового анализа обнаружено, что старение в постоянном магнитном поле напряженностью от 79.6 до 557 кА/м приводит к увеличению интенсивности всех наблюдаемых линий ( $\alpha$ -твердого раствора на основе алюминия, фазы  $Mg_2Si$  и чистого кремния с элементами эвтектики) до 16 раз по сравнению с отжигом без поля и уменьшению их полуширины до  $0.2^\circ$ . Полученный результат свидетельствует о формировании более совершенной и однородной структуры сплава. Практически всегда наблюдается смещение линий  $\alpha$ -твердого раствора на основе алюминия в сторону больших углов до  $0.42^\circ$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альшиц В.И., Даринская Е.В., Колдаева М.В. и др. // Кристаллография. 2003. Т. 48. С. 838.
2. Головин Ю.И. // ФТТ. 2004. Т. 46. Вып. 5. С. 769.
3. Моргунов Р.Б. // УФН. 2004. Т. 174. № 2. С. 131.
4. Осинская Ю.В. Кинетика старения бериллиевой бронзы БрБ-2 в постоянном магнитном поле. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Самара: СамГУ, 2003. 170 с.
5. Осинская Ю.В., Покоев А.В. // Физика и химия обработки материалов. 2003. № 3. С. 12.
6. Post R., Osinskaya J.V., Divinski S.V., Pokoev A.V., Wilde G. // Defect and Diffusion Forum. 2018. V. 383. P. 173.
7. Миронов В.М., Покоев А.В. Камера для отжигов в магнитном поле // Технология получения и исследования порошковых материалов с особыми свойствами: Межвузовский сборник. Куйбышев: Куйбышевский авиационный институт. 1983. С. 98.
8. ISO 6507-1:2005 Metal. mater. Vickers hardness test. Part 1: Test method.
9. Геллер Ю.А. Материаловедение. М.: Металлургия, 1989. 456 с. 10. Белов Н.А., Савченко С.В., Хван А.В. Фазовый состав и структура силуминов: Справочное издание. М.: МИСИС, 2008. 283 с.
10. Белов Н.А., Савченко С.В., Хван А.В. Фазовый состав и структура силуминов: Справочное издание. М.: МИСИС, 2008. 283 с.
11. Золоторевский В.С., Белов Н.А. Материаловедение литейных алюминиевых сплавов. М.: МИСИС, 2005. 369 с.
12. Бунин К.П., Баранов А.А. Металлография. М.: Металлургия, 1970. 254 с.

## Influence of the Intensity of a Constant Magnetic Field on the Process of Phase Formation in an Aged Aluminum Alloy Al–Si–Cu–Fe

J. V. Osinskaya<sup>1</sup>, \*, A. V. Pokoev<sup>1</sup>, and S. G. Magamedova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Samara National Research University, Samara, 443086 Russia*

*\*e-mail: oju76@mail.ru*

A brief review of the experimental data on the magnetoplastic effect (arising in aluminum alloys after aging in weak constant magnetic fields) obtained in recent years is presented. Information on the composition, modes of thermomagnetic treatment and the main experimentally observed regularities of changes in microhardness, lattice parameter and phase composition of the aluminum alloy Al–Si–Cu–Fe, annealed at a temperature of 175°C, annealing time of 4 h, in a constant magnetic field with a strength of 79.6 kA/m up to 557.0 kA/m and in its absence. The main observed regularities of changes in the structure and properties of the material during annealing are formulated.

**Keywords:** magnetoplastic effect, aluminum alloy, magnetic field, thermomagnetic treatment, microhardness, X-ray phase analysis, aging, artificial aging, annealing, hardening.