



Научная статья
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
УДК 669.1

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.016



ИССЛЕДОВАНИЕ ИСКАЖЕНИЙ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЁТКИ В ТВЁРДОМ РАСТВОРЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д16 (AA2024) ПОСЛЕ ОТЖИГА И СТАРЕНИЯ

Екатерина Александровна Носова ¹, Александр Петрович Амосов ²,

¹ Самарский университет, Самара, Россия

² Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

¹ eanosova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5490-3235>

² mvm@samgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1994-5672>

Аннотация. Проведены отжиг, закалка, естественное и искусственное старение алюминиевого сплава Д16 (AA2024) системы Al-Cu-Mg при температурах 100 и 200 °С в течение 15 и 30 минут. С помощью растровой электронной микроскопии с применением микрорентгенспектрального анализа установлен химический состав твёрдого раствора. На основании результатов химического состава твёрдого раствора проведён расчёт изменения среднего межатомного расстояния, которое отражает величину искажения кристаллической решётки. Рентгеноструктурным методом изучены искажения кристаллической решётки, связанные с остаточными напряжениями. Установлено, что отожжённое состояние и искусственно состаренное при температуре 200 °С в течение 30 минут характеризуются схожим содержанием легирующих элементов в твёрдом растворе, причём массовая доля меди в 15...16 раз, а магния в 4...5 раз выше, чем должно быть в твёрдом растворе в равновесном состоянии согласно равновесным диаграммам состояния. Выдержка в течение 15 минут при искусственном старении при температуре 100 и 200 °С не приводит к существенным различиям в уровне остаточных напряжений, значения которых получены расчётным путём и экспериментально. Высокий уровень остаточных напряжений в твёрдом растворе в закалённом состоянии и при искусственном старении при температурах 100 и 200 °С и коротких выдержках до 30 минут позволяет получать высокие показатели прочностных характеристик, но может отрицательно сказываться на стойкости сплава Д16 к расслаивающей коррозии в водно-солевых средах.

Ключевые слова: алюминиевый сплав Д16 (AA2024), отжиг, закалка, старение, среднее межатомное расстояние, остаточные напряжения.

Для цитирования: Носова Е. А., Амосов А. П. Исследование искажений кристаллической решётки в твёрдом растворе алюминиевого сплава Д16 (AA2024) после отжига и старения // Ползуновский вестник. 2022. № 4. Т. 2. С. 125–132. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.016. EDN: <https://elibrary.ru/OMDZDG>.

RESEARCH OF CRYSTAL LATTICE DISTORTION IN SOLID SOLUTION OF ALUMINUM ALLOY D16 (AA2024) AFTER ANNEALING AND AGING

Ekaterina O. Nosova ¹, Alexander P. Amosov ²

¹ Samara University, Samara, Russia

² Samara State Technical University, Samara, Russia

¹ eanosova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5490-3235>

² Samara, mvm@samgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1994-5672>

Abstract. Annealing, quenching, natural and artificial aging at 100 and 200 °C during 15 and 30 minutes of Al-Cu-Mg alloy D16 (AA2024) are provided. Chemical composition of solid solution is found using scanning electron microscopy and micro-X-ray-spectral analysis. Based on results of chemical analysis the calculation of average interatomic distance changing in the solid solution is found, which shows the value of crystal lattice distortion. Also crystal lattice distortion and residual stresses in the solid solution are studied using X-ray analysis. It was found, annealed state and artificial aging at 200 °C during 30 minutes lead to similar content of alloying elements in the solid solution, mass percentage of Cu 15...16 times and Mg 4...5 times higher than should be in the solid solution at equilibrium state in accordance with state diagram. Exposition of 15 minutes for artificial aging at temperature of 100 and 200 °C does not lead to significant difference in the level of residual stresses calculated and measured. High level of residual stress in the solid solution of alloy D16 at quenched state and after short exposition before 30 minutes allows receiving the high strength, but may give less exfoliation corrosion resistance in water-salt environment.

Keywords: aluminum alloy D16 (AA2024), annealing, quenching, aging, average interatomic distance, residual stress.

For citation: Nosova, E. A., Amosova, A. P. (2022). Research of crystal lattice distortion in solid solution of aluminum alloy D16 (AA2024) after annealing and aging Article title. *Polzunovskiy vestnik*, 4(2), 125-132. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.016. EDN: <https://elibrary.ru/OMDZDG>.

ВВЕДЕНИЕ

Сплав Д16 на сегодняшний день является одним из самых распространённых в строительстве, авиастроении, железнодорожном транспорте и прочих [1, 2]. Необходимые свойства в этом деформируемом термически упрочняемом алюминиевом сплаве системы Al-Cu-Mg формируются в результате гомогенизации, закалки, старения, деформации [3–7].

Режимы обработки связаны с получением наилучших показателей прочности [4, 7], коррозионной стойкости [6–8]. Интерес исследователей в основном направлен на изучение трансформаций структуры, связанных с зерном, растворением или выделением упрочняющих фаз [3–11], кристаллографической текстуры. Несомненно, эти особенности структуры оказывают влияние на служебные, механические, технологические свойства сплава. Вместе с тем, старение алюминиевых сплавов приводит к измене-

нию распределения легирующих элементов, что, в свою очередь, вызывает изменение остаточных напряжений в кристаллической решётке [9].

Значительные остаточные напряжения и их распределение оказывают влияние на состояние поверхности, изменение геометрии изделий в процессе их хранения или обработки [11–14].

Для оценки остаточных напряжений применяются различные методики: сверление [11], ультразвуковое исследование, компьютерное моделирование, а также рентгеноструктурный анализ [13, 14]. Структурные превращения в металлах приводят к изменению положения интерференционных пиков по горизонтали, – вдоль координаты θ (2θ), к уширению пиков, к изменению их относительной высоты. Согласно [13, 14], эти изменения могут быть переведены в значения напряжений, измеряемых в МПа через соотношение E/μ , где E – модуль упругости Юнга, μ – коэффициент Пуассона. Согласно одной из классификаций остаточных напряжений, их

ИССЛЕДОВАНИЕ ИСКАЖЕНИЙ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЁТКИ В ТВЁРДОМ РАСТВОРЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д16 (AA2024) ПОСЛЕ ОТЖИГА И СТАРЕНИЯ

разделяют на макронапряжения (или напряжения 1 рода), которые уравниваются в объёме всего металла, микронапряжения или напряжения 2 рода, которые уравниваются в объёме нескольких зёрен, и статические искажения или напряжения 3 рода, которые уравниваются в объёме нескольких элементарных ячеек. Чаще всего на практике измеряют или изучают напряжения 1 рода или макронапряжения, а двумя остальными видами напряжений пренебрегают. Хотя различные способы воздействия, такие как пластическая деформация или термическая обработка, могут приводить к изменению структуры на различных структурных уровнях, что может отразиться на видоизменении дифрактограмм [7].

Целью работы было изучить изменение среднего межатомного расстояния сплава Д16 в результате его термической обработки.

МЕТОДЫ

Исследование проводили на листовых образцах из сплава Д16 (AA2024) толщиной 2 мм, прошедших термическую обработку:

1. Отжиг при температуре 500 °С в течение 1 часа.

2. Закалка при температуре 500 °С, выдержка 30 мин, охлаждение в воду комнатной температуры, естественное старение в течение 7 суток.

3. Закалка при температуре 500 °С, выдержка 30 мин, охлаждение в воду комнатной температуры, искусственное старение при температуре 100 °С в течение 15 мин.

4. Закалка при температуре 500 °С, выдержка 30 мин, охлаждение в воду комнатной температуры, искусственное старение при температуре 100 °С в течение 30 мин.

5. Закалка при температуре 500 °С, выдержка 30 мин, охлаждение в воду комнатной температуры, искусственное старение при температуре 200 °С в течение 15 мин.

6. Закалка при температуре 500 °С, выдержка 30 мин, охлаждение в воду комнатной температуры, искусственное старение при температуре 200 °С в течение 30 мин.

Режимы термической обработки (от 1 до 6) выбраны из соображений типовых рекомендаций (1–4), встречающихся в литературных источниках [1–16], а также проведения ускоренной термической обработки, приводящей к получению наибольшей прочности, так называемое пиковое старение [10], и дальнейшему перестариванию (5–6) [6].

В публикации [17] представлен состав спектров твёрдого раствора на основе алюминия в зависимости от режимов термической обработки сплава Д16.

На основании этих значений концентраций легирующих элементов рассчитано среднее межатомное расстояние по формуле [18]:

$$a = \sqrt[3]{\frac{M}{\rho \cdot N_A}}$$

где M – молярная масса, г/моль; ρ – плотность, г/см³; $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ – число Авогадро.

Искажения кристаллической решётки были измерены с помощью рентгеноструктурного анализа по изменению угла отражения θ от плоскостей (111), (200), (220), (311), (222), уширения линий интерференции отражённых лучей от этих же плоскостей, высоты интерференционных пиков для плоскостей (111) и (200).

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунке 1 представлена диаграмма изменения химического состава твёрдого раствора в сплаве Д16 в зависимости от вида и режима термической обработки. Верхние линии показывают содержание меди и магния в составе сплава согласно нормативным документам, т.е. при полном растворении в алюминии, горизонтальные линии – содержание меди и магния в твёрдом растворе согласно равновесным диаграммам состояния [19]

Из рисунка 1 видно, что после отжига в твёрдом растворе сплава Д16 концентрация меди и магния имеет низкие значения по сравнению с полным растворением легирующих элементов, которое может быть получено при закалке, но она выше, чем диктуется равновесными диаграммами состояния Al-Mg, Al-Cu и Al-Mg-Cu [19]. Это может свидетельствовать либо о неравномерности распределения легирующих элементов в твёрдом растворе, либо о неравновесном охлаждении образцов при отжиге, в результате чего концентрация легирующих элементов может оставаться довольно высокой.

После старения при 200 °С в течение 30 мин. (перестаренное состояние) [6], когда ожидается, что диффузия элементов из твёрдого раствора прошла полностью, концентрация меди и магния в твёрдом растворе ниже, чем получилось для отожжённого состояния, что может быть связано с присутствием зон Гинье–Престона, не обнаруживаемых с помощью растровой электронной микроскопии, но влияющих на концентрацию меди и магния в областях, лежащих поблизости от наблюдаемых частиц упрочняющих фаз, как показано в [9].

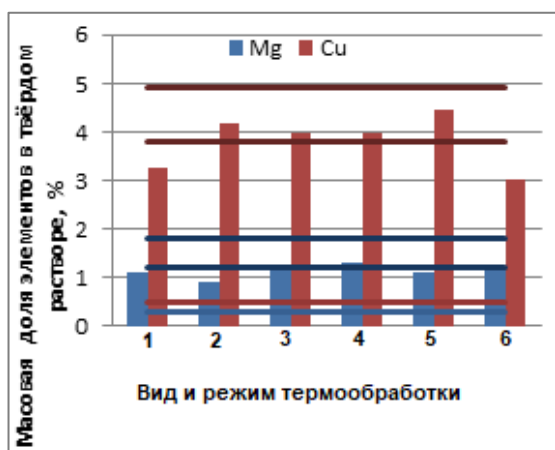


Рисунок 1 – Изменение массовой доли магния и меди в твёрдом растворе в зависимости от вида и режима термообработки

Figure 1 - Mg and Cu mass% in the solid solution of aluminum depending on heat treatment mode

На картах распределения магния и меди, представленных в статьях [2, 3, 7], контрастными точками обозначено присутствие этих элементов, которое не равномерно по площади. При наличии чётких границ частиц упрочняющих фаз на изображениях микроструктуры, на картах распределения меди и магния чёткие границы отсутствуют. Более правильным было бы сказать, что на картах распределения элементов присутствуют области с повышенной концентрацией меди и магния, напоминающие очертаниями форму частиц упрочняющих фаз, имеющие размытые границы. Т.е. вокруг частиц упрочняющих фаз присутствуют зоны повышенной концентрации легирующих элементов, которые входят в состав упрочняющих частиц CuAl_2 , CuMgAl_2 . Отметим также, что изменение концентрации элементов происходит независимо один от другого: например, после естественного старения и искусственного старения при 200 °C в течение 15 минут наблюдается увеличение концентрации меди и понижение содержания магния в твёрдом растворе по сравнению с отожжённым состоянием, после искусственного старения при 100 °C в течение 15 и 30 минут концентрация меди и магния в твёрдом растворе повышается, а после старения при 200 °C в течение 30 минут концентрация меди в твёрдом растворе снижается, а концентрация магния повышается.

Эти изменения химического состава твёрдого раствора влияют на среднее межатомное расстояние (рис. 2, верхняя линия показывает значения среднего межатомного расстояния при минимальном содержании легирующих элементов, нижняя – при максимальном).

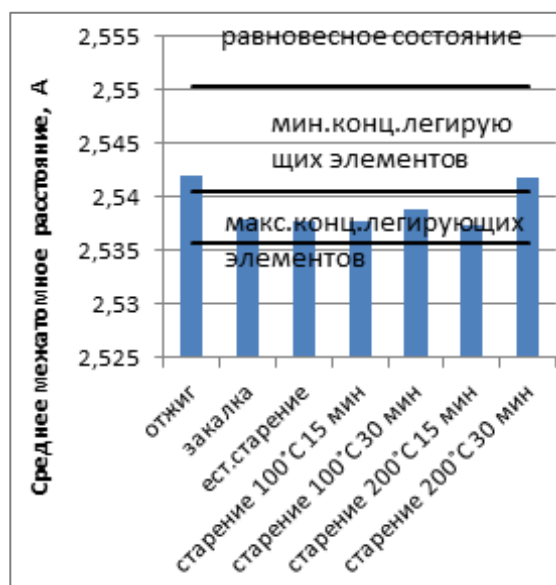


Рисунок 2 – Изменение среднего межатомного расстояния в твёрдом растворе в зависимости от вида и режима термообработки

Figure 2 - Average interatomic distance in the solid solution depending on heat treatment mode

Из рисунка 2 видно, что наибольшее среднее межатомное расстояние наблюдается для отожжённого и перестаренного состояний, но при этом полученные значения на 0,32...0,33 % ниже, чем характерные для концентрации легирующих элементов в твёрдом растворе согласно диаграммам состояния.

Для состаренного состояния по всем проведённым режимам среднее межатомное расстояние находится в пределах максимальной и минимальной концентрации легирующих элементов в сплаве. Расчёты показывают, что среднее межатомное расстояние в твёрдом растворе сплава Д16 уменьшается по сравнению с чистым алюминием при добавлении меди, магния и других легирующих элементов: в техническом алюминии среднее межатомное расстояние $a = 2,5509 \cdot 10^{-10}$ м, а в твёрдом растворе сплава Д16 среднее межатомное расстояние $a = 2,5503 \cdot 10^{-10}$ м при концентрации 0,5 масс.% Cu и 0,2 масс.% Mg.

Это объясняется характеристиками атомно-кристаллического строения алюминия, меди и магния: период решётки алюминия $d = 4,04 \cdot 10^{-10}$ м, меди $d = 3,615 \cdot 10^{-10}$ м, магния $a = 3,2 \cdot 10^{-10}$ м, $c = 5,2 \cdot 10^{-10}$ м. Радиус атома алюминия $r = 143 \cdot 10^{-12}$ м, меди $r = 128 \cdot 10^{-12}$ м, магния $r = 160 \cdot 10^{-12}$ м [20]. Соответственно добавление этих элементов в алюминий приводит к уменьшению среднего межатомного расстояния. Период решётки и среднее межатомное расстояние связаны между собой. Как показывают данные атом-

ИССЛЕДОВАНИЕ ИСКАЖЕНИЙ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЁТКИ В ТВЁРДОМ РАСТВОРЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д16 (AA2024) ПОСЛЕ ОТЖИГА И СТАРЕНИЯ

но-кристаллического строения металлов с гранецентрированной кубической решёткой [20], интерпретированные в виде рисунка 3, период решётки d связан со средним межатомным расстоянием a линейной зависимостью $d = 1,595a + 0,0188$. Следовательно, относительное изменение периода решётки или межплоскостных расстояний приводит к одинаковому изменению среднего межатомного расстояния.

На рисунке 4 представлено влияние содержания магния и меди в твёрдом растворе на изменение среднего межатомного расстояния и остаточные напряжения, которые могли бы привести к таким искажениям кристаллической решётки. Как следует из рисунка 4, минимальные значения остаточных напряжений, приводящие к искажению кристаллической решётки, наблюдаются в отожжённом состоянии и после искусственного старения при 200 °C в течение 30 минут.

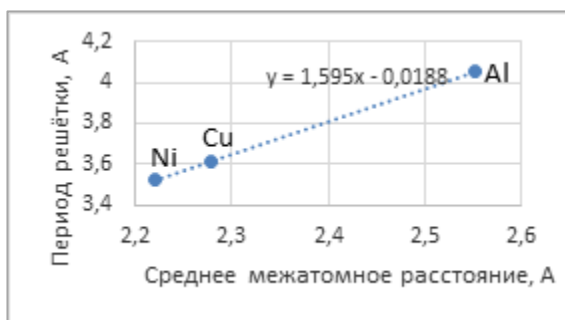


Рисунок 3 – Взаимосвязь среднего межатомного расстояния и периода решётки

Figure 3 - Correlation between the average interatomic distance and the lattice period

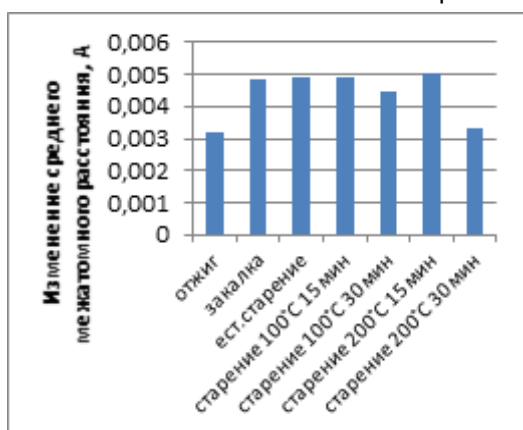


Рисунок 4 – Изменение среднего межатомного расстояния в твёрдом растворе сплава Д16 в зависимости от способа обработки

Figure 4 - Average interatomic distance in aluminum solid solution of alloy D16 versus heat treatment mode

Искажения кристаллической решётки после закалки, естественного старения и искусственного старения при температурах 100 и 200 °C в течение 15 минут не обладают значительными различиями. Увеличение продолжительности старения при температурах 100 и 200 °C до 30 минут приводит к снижению остаточных напряжений и искажений кристаллической решётки твёрдого раствора.

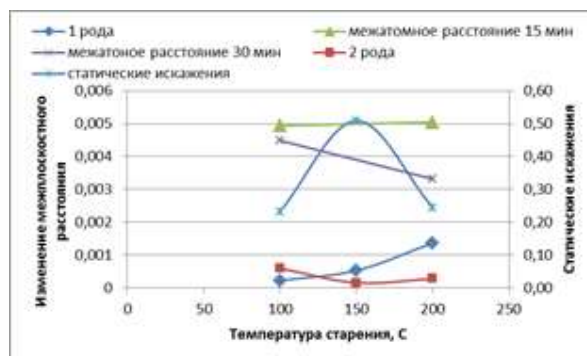


Рисунок 5 – Изменение межатомных расстояний в сплаве Д16, измеренных с помощью рентгеноструктурного анализа

Figure 5 - Average interatomic distance in alloy D16 measured by X-ray analysis

Из рисунка 5 видно, что искажения кристаллической решётки, измеренные рентгеноструктурным методом по изменению угла отражения (1 рода) и по уширению интерференционных пиков (2 рода) значительно ниже, чем искажения кристаллической решётки, рассчитанные на основании химического состава твёрдого раствора. Для короткой выдержки 15 минут при температуре старения 100 и 200 °C значительных изменений в уровне искажения кристаллической решётки не наблюдается, но при выдержке 30 минут влияние температуры старения становится более заметным.

ОБСУЖДЕНИЕ

В источнике [11] показано, что увеличение температуры старения сплава 2024 от 146 до 300 °C приводит к сокращению периода, в течение которого достигается максимум твёрдости, от 120 часов до 12 минут, однако при этом значения твёрдости уменьшаются от 160 до 85 HV. Остаточные напряжения, измеренные с помощью сверления отверстий и измерения их размеров, уменьшаются от 43 до 20 МПа по мере увеличения продолжительности старения при температурах 200 и 250 °C от 15 минут до 100 часов. При малых выдержках до 1 часа значительных различий в уровне остаточных напряжений после ста-

рения при температурах 200 и 250 °С не выявлено, что согласуется с результатами, представленными на рисунках 4 и 5.

В работе [21] зависимость предела прочности, предела текучести и относительного удлинения от продолжительности старения в течение 20...360 минут при температуре 190 °С совпадает с изменением искаженности кристаллической решётки, оценка которой производилась с помощью микронапряжений, т.е. по величине относительного уширения интерференционных пиков. Уровень микронапряжений находится в пределах 0,1...0,3 %, что совпадает с результатами, представленными на рисунке 5. Влияние остаточных напряжений, полученных сплавом AA2024 в результате холодной прокатки с обжатиями 25, 50 и 75 %, на механические свойства, в том числе усталостные характеристики, сохраняется даже после проведения закалки и естественного старения, как показано в исследовании [7].

В исследовании [1] увеличение температуры закалки сплава 2024 до 500 °С приводит к достижению максимальных значений предела прочности, предела текучести, твёрдости и электропроводности, но после закалки с температуры 510 °С значения этих характеристик в сплаве снижаются, что авторы исследования связывают с пережогом. В процессе искусственного старения при температуре 180 °С выделяются зоны Гинье–Престона и частицы S-фазы, чем авторы объясняют упрочнение. На этапе, предшествующем максимальному упрочнению, резко возрастает количество зон Гинье–Престона и частиц S-фазы, что обеспечивает упрочнение. После достижения максимального, “пикового”, упрочнения количество зон Гинье–Престона начинает снижаться, а частицы S-фазы становятся хрупкими. Косвенно это подтверждает снижение остаточных напряжений в твёрдом растворе.

В [22] исследована коррозионная стойкость к расслаивающей коррозии в водном растворе NaCl и KNO₃ и HNO₃ сплава 2024 после старения при температуре 210 °С в течение 2...8 часов. Длительные выдержки при старении сплава до 8 часов приводят к более высокой коррозионной стойкости по сравнению с закалённым состоянием. Аналогичные результаты получены в [2, 7, 8]: глубина коррозии остаётся неизменной в “перестаренном” состоянии, т.е. после старения при температуре 180 °С в течение 49 часов, в то время как для закалённого сплава с температуры 495 °С при нагреве в течение 1 часа и после искусственного старения на макси-

мальную прочность при температуре 180 °С в течение 3 часов наблюдается рост глубины коррозии в водном растворе KNO₃ при температуре 40 °С с ростом времени экспозиции, что можно объяснить меньшим уровнем остаточных напряжений в твёрдом растворе в перестаренном состоянии по сравнению с закалённым состоянием или искусственно состаренным на максимальную прочность. Высокие значения остаточных напряжений, как видно, приводят к высоким показателям прочности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование искажений кристаллической решётки в твёрдом растворе сплава Д16 (2024) после отжига и искусственного старения при температурах 100 и 200 °С в течение 13 и 30 минут показало:

1. Отожжённое и перестаренное состояние характеризуются схожим содержанием легирующих элементов в твёрдом растворе, причём массовая доля меди в 15...16 раз, а магния в 4...5 раз выше, чем должно быть в твёрдом растворе в равновесном состоянии в соответствии с диаграммами состояния.

2. Выдержки в течение 15 минут при искусственном старении при температуре 100 и 200 °С не приводят к существенным различиям в уровне остаточных напряжений.

3. Высокий уровень остаточных напряжений в твёрдом растворе в закалённом состоянии и при коротких выдержках до 30 минут позволяет получать высокие показатели прочностных характеристик, но может отрицательно сказываться на стойкости сплава Д16 к расслаивающей коррозии в водно-солевых средах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Effects of solution and aging treatments on the microstructure and mechanical properties of cold rolled 2024 Al alloy sheet / Lu Sun [и др.] // Journal of materials research and technology. – 2021. – Т. 12. – С. 1126–1142. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.03.051>.
2. Effects of aging treatment and peripheral coarse grain on the exfoliation corrosion behaviour of 2024 aluminium alloy using SR-CT / Shuangqing Sun [и др.] // Journal of materials research and technology. – 2020. – Т. 9. – С. 3219–3229. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.01.069>.
3. Homogenization of ECAPed Al 2024 alloy through age-hardening / G. Kotan [и др.] // Materials Science & Engineering A. – 2013. – Т. 559. – С. 601–606. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.08.148>.
4. Effect of actual and accelerated ageing on microstructure evolution and mechanical properties of a 2024-T351 aluminium alloy / M. Prudhomme [и др.] // International Journal of Fatigue. – 2018. – Т. 107. – С. 60–71. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.10.015>.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИСКАЖЕНИЙ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЁТКИ В ТВЁРДОМ РАСТВОРЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д16 (AA2024) ПОСЛЕ ОТЖИГА И СТАРЕНИЯ

5. The effect of artificial ageing heat treatments on the corrosion-induced hydrogen embrittlement of 2024 (Al-Cu) aluminium alloy / N.D. Alexopoulos [и др.] // *Corrosion Science*. – 2016. – Т. 102. – С. 413–424. doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.10.034>.
6. The intergranular corrosion susceptibility of 2024 Al alloy during re-ageing after solution treating and cold-rolling / Zhixiu Wang [и др.] // *Corrosion Science*. – 2017. – Т. 114. – С. 156–168. doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.11.013>.
7. Multiscale study of cold-rolling deformation on mechanical and corrosion behaviors of AA2024-T4 aluminum alloy / S. Benamirouche [и др.] // *Journal of the Indian Chemical Society*. – 2022. – № 99. – Т. 1. – С. 100307. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jics.2021.100307>.
8. Effects of solution and aging treatments on the microstructure and mechanical properties of cold rolled 2024 Al alloy sheet / Lu Sun [и др.] // *Journal of materials research and technology*. – 2021. – Т. 12. – С. 1126–1142. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.03.051>.
9. Effects of solution treatment on the microstructure and mechanical properties of naturally aged EN AW 2024 Al alloy sheet / Mengchao Liang [и др.] // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2020. – С. 153943. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.153943>.
10. Influence of ageing on the corrosion behaviour of 2024 aluminium alloy coated with a trivalent chromium conversion layer // R. Saillard [и др.] // *Corrosion Science*. – 2021. – Т. 182. – С. 109192. doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.109192>.
11. Double-peak age strengthening of cold-worked 2024 aluminum alloy / Y.L. Zhao [и др.] // *Acta Materialia*. – 2013. – Т. 61. – С. 1624–1638. doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.11.039>.
12. Residual stress and yield strength evolution with annealing treatments in an age-hardenable aluminum alloy matrix composite / R. Fernandez [и др.] // *Materials Science & Engineering A*. – 2018. – Т. 731. – С. 344–350. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.06.031>.
13. Ludian, T., Wagner, L. Effect of age-hardening conditions on high-cycle fatigue performance of mechanically surface treated Al 2024 // *Materials Science and Engineering A*. – 2007. – Т. 468–470. – С. 210–213. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.07.169>.
14. Influence of restraint conditions on residual stress and distortion of 2219-T8 aluminum alloy TIG welded joints based on contour method / Qiang Wang [и др.] // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2021. – Т. 68. – С. 796–806. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.05.065>.
15. Vinay Kumar Yadav, Vidit Gaur, Singh I.V. Combined effect of residual and mean stresses on fatigue behavior of welded aluminum 2024 alloy // *International Journal of Fatigue*. – 2022. – Т. 155. – С. 106565. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106565>.
16. Effect of ageing on precipitation kinetics, tensile and work hardening behavior of Al-Cu-Mg (2024) alloy / N.D. Alexopoulos [и др.] // *Materials Science & Engineering A*. – 2017. – Т. 700. – С. 457–467. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.05.090>.
17. Гречников, Ф.В., Носова, Е.А. Влияние состава и распределения дисперсных фаз при старении на штампуемость листов из сплава Д16 // *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*. – 2017. – № 5. – С. 60–68. doi: <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2017-5-60-68>.
18. Колбасников, Н.Г., Кондратьев, С.Ю. Структура. Энтропия. Фазовые превращения и свойства металлов. – СПб.: СПбГПУ, 2006. – 363 с.
19. Мондольфо, Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов; пер. с англ. – Москва: Металлургия, 1979. – 640 с.
20. Физические величины: справочник / А.П. Бабичев [и др.]. – Москва: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
21. Ning Ai-lin, Liu Zhi-yi, Zeng Su-min. Effect of large cold deformation on characteristics of age-strengthening of 2024 aluminum alloys // *Trans. Nonferrous Met. SOC. – China*. – 2006. – Т. 16. – С. 1121–1128. doi: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(06\)60388-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(06)60388-9).
22. Alexopoulos, N.D. On the corrosion-induced mechanical degradation for different artificial aging conditions of 2024 aluminum alloy // *Materials Science and Engineering A* 2009. – Т. 520. – С. 40–48. doi: [10.1016/j.msea.2009.05.023](https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.05.023).

Информация об авторах

А. П. Амосов – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы» Самарского государственного технического университета, заслуженный деятель науки РФ.

Е. А. Носова – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технология металлов и авиационное материаловедение» Самарского национального исследовательского университета.

REFERENCES

1. Sun, L., Guo, Y., Chen, L. & Zhao, G. (2021). Effects of solution and aging treatments on the microstructure and mechanical properties of cold rolled 2024 Al alloy sheet. *Journal of materials research and technology*, (12), 1126-1142. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.03.051>.
2. Sun, S., Fanga, Y., Zhang, L., Lia, C. & Hu, S. (2020). Effects of aging treatment and peripheral coarse grain on the exfoliation corrosion behaviour of 2024 aluminium alloy using SR-CT. *Journal of materials research and technology*. (9), 3219-3229. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.01.069>.
3. Kotan, G., Tan, E., Kalay, Y.E. & Gur, C.H. (2013). Homogenization of ECAPed Al 2024 alloy through age-hardening. *Materials Science & Engineering A*, (559), 601-606. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.08.148>.
4. Prudhomme, M., Billy, F., Alexis, J., Benoit, G., Hamon, F., Larignon, C., Odemer, G., Blanc, C., Hénaff, G. (2018). Effect of actual and accelerated ageing on microstructure evolution and mechanical properties of a 2024-T351 aluminium alloy. *International Journal of Fatigue*, (107), 60-71. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.10.015>.

5. Alexopoulos, N.D., Velonaki, Z., Stergiou, C.I. & Kourkoulis, S.K. (2016). The effect of artificial ageing heat treatments on the corrosion-induced hydrogen embrittlement of 2024 (Al-Cu) aluminium alloy. *Corrosion Science*, (102), 413-424. doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.10.034>.
6. Wang, Z., Chen, P., Li, H., Fang, B., Song, R. & Zheng, Z. (2017). The intergranular corrosion susceptibility of 2024 Al alloy during reageing after solution treating and cold rolling. *Corrosion Science*, (114), 156-168. doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.11.013>.
7. Benamirouche, S., Abdi, A., Hemmouche, L., Mejias, A., El Amine Belouchrani, M., Chicot, D., Amrouche, A. & Trari, M. (2022). Multiscale study of cold-rolling deformation on mechanical and corrosion behaviors of AA2024-T4 aluminum alloy. *Journal of the Indian Chemical Society*, 99 (1), 100307. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jics.2021.100307>.
8. Sun, L., Guo, Y., Chen, L. & Zhao, G. (2021). Effects of solution and aging treatments on the microstructure and mechanical properties of cold rolled 2024 Al alloy sheet. *Journal of materials research and technology*, (12), 1126-1142. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.03.051>.
9. Liang, M., Chen, L., Zhao, G. & Guo, Y. (2020). Effects of solution treatment on the microstructure and mechanical properties of naturally aged EN AW 2024 Al alloy sheet. *Journal of Alloys and Compounds*, 153943. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.153943>.
10. Saillard, R., Zanna, S., Seyeux, A., Fori, B., Swiatowska, J., Blanc, C. & Marcus, P. (2021). Influence of ageing on the corrosion behaviour of 2024 aluminium alloy coated with a trivalent chromium conversion layer. *Corrosion Science*, (182), 109192. doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.109192>.
11. Zhao, Y.L., Yang, Z.Q., Zhang, Z., Su, G.Y. & Ma, X.L. (2013). Double-peak age strengthening of cold-worked 2024 aluminum alloy. *Acta Materialia*, (61), 1624-1638. doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.11.039>.
12. Fernandez, R., Cabeza, S., Mishurova, T., Fernandez-Castrillo, P., Gonzalez-Doncel, G. & Bruno, G. (2018). Residual stress and yield strength evolution with annealing treatments in an age-hardenable aluminum alloy matrix composite. *Materials Science & Engineering A*, (731), 344-350. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.06.031>.
13. Ludian, T. & Wagner, L. (2007). Effect of age-hardening conditions on high-cycle fatigue performance of mechanically surface treated Al 2024. *Materials Science and Engineering A*, (468-470), 210-213. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.07.169>.
14. Wang, Q., Zhao, Y., Zhao, T., Yan, D., Wang, G. & Wu, A. (2021). Influence of restraint conditions on residual stress and distortion of 2219-T8 aluminum alloy TIG welded joints based on contour method. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021, (68), 796-806. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.05.065>.
15. Yadav, V.K., Gaur, V. & Singh, I.V. (2022). Combined effect of residual and mean stresses on fatigue behavior of welded aluminum 2024 alloy. *International Journal of Fatigue*, (155), 106565. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106565>.
16. Alexopoulos, N.D., Velonaki, Z., Stergiou, C.I. & Kourkoulis, S.K. (2017). Effect of ageing on precipitation kinetics, tensile and work hardening behavior of Al-Cu-Mg (2024) alloy. *Materials Science & Engineering A*, (700), 457-467. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.05.090>.
17. Grechnikov, F.V. & Nosova, E.A. (2017). Effect of composition and dispersion of the reinforcement phases after aging on the stampability of the sheet blanks of D16 alloy. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Non-ferrous metals*, № 5, P. 60-68. (In Russ.). doi: <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2017-5-60-68>.
18. Kolbasnikov, N.G. & Kondratiev, S.U. (2006). Structure. Entropy. Phase transformations and properties of metals. SPb.: SPbGPU. (In Russ.).
19. Mondolfo, L.F. (1976). Aluminum Alloys. Structure and Properties. Butterworth-Heinemann.
20. Babichev, A.P., Babushkina, N.A., Bratkovsky, A.M. [et al.] (1991). Physical quantities: Handbook. Moscow: Energoatomizdat. (In Russ.).
21. Ning, A., Liu, Z. & Zeng, S. (2006). Effect of large cold deformation on characteristics of age-strengthening of 2024 aluminum alloys. *Trans. Nonferrous Met. SOC. China*, (16), 1121-1128. doi: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(06\)60388-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(06)60388-9).
22. Alexopoulos, N.D. (2009). On the corrosion-induced mechanical degradation for different artificial aging conditions of 2024 aluminum alloy. *Materials Science and Engineering A*, (520), 40-48. doi: [10.1016/j.msea.2009.05.023](https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.05.023).

Information about the authors

A. P. Amosov - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Metal Science, Powder Metallurgy and Nanomaterials, Samara State Technical University, Honored Scientist of Russian Federation.

E. A. Nosova - Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of the Department of Metal Technology and Aviation Material Science, Samara National Research University.

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

Статья поступила в редакцию 10.10.2022; одобрена после рецензирования 30.11.2022; принята к публикации 15.12.2022.

The article was received by the editorial board on 10 Oct 2022; approved after editing on 30 Nov 2022; accepted for publication on 15 Dec 2022.