

ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЛИТЕЙНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ

А. Д. Грешилов¹, Д. С. Фильчаков¹, Б. Д. Лыгденов^{1, 2}, Мэй Шунчи²

¹ Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления,
г. Улан-Удэ, Россия

² Уханьский текстильный университет, г. Ухань, Китай

В работе исследованы сплавы системы алюминий – кремний и алюминий – медь, отличающиеся фазовым составом в литом состоянии и разным эффектом старения при последующей термической обработке. Показано формирование структуры и фазового состава при циклическом тепловом воздействии.

Ключевые слова: силумин, коагуляция, термоциклирование, сплав

THERMOCYCLING TREATMENT OF CASTING ALLOYS BASED ON ALUMINUM

A. D. Greshilov¹, D. S. Filchakov¹, B. D. Lygdenov^{1, 2}, Mey Shunchi²

¹ East Siberia state university of technology and management, Ulan-Ude, Russia

² Wuhan Textile University, Wuhan, China

We studied alloys of aluminum – silicon and aluminum – copper, different phase composition in the cast state and different effects of aging during the subsequent heat treatment. The formation of the structure and the phase composition at the cyclical heat is shown.

Keywords: silumin, coagulation, thermal cycling, rafting

Особенности структурообразования при термоциклировании заэвтектических силуминов описаны в работе [1]. Термоциклирование сплавов проводилось в интервале температур $500 \leftrightarrow 300$ °С с изотермической выдержкой при каждой температуре 15 мин (максимальное количество циклов – 35). Отмечаются деление кристаллов кремния, их сфероидизация и коагуляция, чему способствует пластическая деформация и рекристаллизация твердого раствора. Развитие последних связывают (в отличие от утверждений авторов работы [2]) с различием не только коэффициентов линейного расширения алюминия и кремния, но и их модулей упругости, а также изменением концентрации кремния в твердом растворе при теплосменах. В качестве важнейшего механизма деления кристаллов, определяющего его кинетику и механические свойства сплавов после ТЦО, авторы называют процесс трещинообразования в кремнии и, как следствие, его дробление, что также подтверждается авторами работы [3].

В работе [4] показана возможность из-

менения эвтектических составляющих литейных сплавов алюминий – кремний и алюминий – медь при их термоциклической обработке, включающей нагрев до 530 °С, многократные охлаждения и нагревы с выдержками при конечных температурах термоциклирования и окончательное охлаждение на воздухе. Во время термоциклирования также отмечаются процессы дробления частиц кремния и CuAl_2 в эвтектических смесях (после трех циклов) и их коагуляции (при количестве циклов более трех). В качестве особенностей структурообразования при термоциклировании авторами называются глобуляризация и сфероидизация пластин эвтектики. Отмечено, что наибольший эффект достигается в случае, когда исходная структура эвтектики более дифференцирована. Ускорение растворения эвтектических составляющих, изменение параметра кристаллической решетки α -твердого раствора наблюдаются и при термоциклировании литых деформированных сплавов [5, 6].

Закономерности изменения параметра

ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЛИТЕЙНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ

объясняются изменением концентрации легирующих элементов в алюминии с учетом атомных диаметров и коэффициентов диффузии. Было показано, что первоначальное увеличение параметра решетки вызывается интенсивным растворением участков эвтектики, при котором атомы различных легирующих элементов перемещаются на разные расстояния. Так, магний перемещается на расстояние, большее, чем медь. Одновременно происходит распад пересыщенного по марганцу твердого раствора. Процесс растворения эвтектических составляющих ограничивается не диффузией, а скоростью перестройки решетки.

Проведенный анализ микро- и субструктуры сплавов показал, что в процессе термоциклирования на трансформацию структуры оказывает влияние как ширина температурного интервала, так и количество циклов. В [7, 8] проведены исследования формирования структуры и свойств литейных алюминии-

евых сплавов разных систем, отличающихся фазовым составом в литом состоянии и разным эффектом старения при последующей термической обработке. При этом использовали сплавы системы алюминий – кремний и алюминий – медь. По принятой для литых сплавов классификации [9, 10], это сплавы I (АЛ4 и ВАЛ5) и III (ВАЛ10) групп. Химический состав сплавов приведен в таблице 1.

Сплав АЛ4 является наиболее типичным представителем I группы, сплавы которой характеризуются высоким содержанием кремния и большим количеством (50–70 %) эвтектики, что обуславливает хорошие литейные свойства – высокую жидкотекучесть, пониженную литейную усадку.

Высоко- и жаропрочный литейный сплав ВАЛ10 относится к системе Al – Cu с высоким содержанием меди и небольшим количеством эвтектики. Существенный недостаток данного сплава – повышенная склонность к деформации.

Таблица 1 – Химический состав исследуемых сплавов, мас. % (без учета примесей)

Сплав	Cu	Si	Mg	Mn	Ti	Cd	Be
АЛ4	–	8,0–10,5	0,17–0,30	0,25–0,50	–	–	–
ВАЛ5	–	6,5–8,5	0,35–0,55	–	0,1–0,3	–	0,15–0,40
ВАЛ10	4,5–5,1	–	–	0,35–0,80	0,15–0,35	0,07–0,25	–

В литом состоянии основными структурными составляющими сплава АЛ4 являются α-твердый раствор, кремний, входящий в состав эвтектики α + Si, фаза Mg₂Si и при наличии примеси железа железомарганцовистая фаза AlSiMnFe. В структуре закаленных от 535 °С отливок присутствуют грубые частицы кремния эвтектического происхождения и включения нерастворимой фазы AlSiMnFe. Фаза Mg₂Si полностью растворяется при нагреве под закалку. При старении сплава происходит распад пересыщенного твердого раствора с выделением кремния и фазы Mg₂Si.

Фазовый состав сплава ВАЛ5 в литом состоянии характеризуется наличием α-твердого раствора, частиц кремния, входящих в состав эвтектики α + Si + Mg₂Si, а также фаз Al₃Ti, AlSiBe₃; при наличии примесей железа возможно образование фаз AlFeBe и Al₃Fe. Фаза AlFeBe имеет округлую форму и благоприятно влияет на механические свойства сплава в отличие от фазы Al₃Fe пластинчатой формы, способствующей снижению пластичности [9, 11]. Закалка от 535 °С приводит к растворению упрочняющей фазы Mg₂Si и некоторой коагуляции кремния в эвтектике.

Фазовый состав сплава ВАЛ10 в литом состоянии характеризуется наличием значительного количества фазы CuAl₂, входящей в состав эвтектики α + CuAl₂, α-твердого раствора и фазы Al₁₂Mn₂Cu, а также наличием отдельных пластинчатых частиц фазы Al₃Ti [12]. В структуре сплава после закалки (от 545 °С) наблюдаются нерастворимые в α-твердом растворе избыточные фазы Al₁₂Mn₂Cu и Al₃Ti. Фаза CuAl₂ полностью переходит в α-твердый раствор и обеспечивает упрочнение сплава при старении. Наличие крупных частиц фазы Al₃Ti приводит к понижению пластичности сплава.

Термоциклическая обработка сплавов предполагала циклические воздействия в области α-твердого раствора с переходом через линию сольвус, когда нижняя температура цикла соответствует температурам возможного распада твердого раствора. Температуры в цикле выбраны с учетом критических точек на соответствующих диаграммах состояния, рекомендуемых температур закалки, структуры сплава в литом состоянии.

Трансформация микро- и субструктуры сплава АЛ4 при высокотемпературной термоциклической обработке в интервале

$t_{\text{зак}} \leftrightarrow t_{\text{сольвус}}$ приводит к диспергированию эвтектических составляющих и первичных выделений, степень дисперсности которых при этом зависит от температурного интервала и количества циклов. Циклирование в интервале $535 \leftrightarrow 20^\circ\text{C}$ (15, 20 циклов) приводит к сфероидизации эвтектического кремния.

В сплаве ВАЛ5 на процессы диспергирования и растворения избыточной фазы при высокотемпературной термоциклической обработке влияют те же факторы, что и при циклировании сплава АЛ4. Меньшее проявление эффекта термоциклирования для этого сплава в интервале $535 \leftrightarrow 435^\circ\text{C}$ объясняется меньшим влиянием на процессы структурообразования структурных и термических напряжений. Повышение однородности распределения и изменение формы частиц кремния при циклической закалке можно объяснить дополнительным влиянием термических напряжений, связанных с резким охлаждением в холодной воде, при этом диффузионные процессы практически отсутствуют.

Вывод: Динамичность процесса ВТЦО при уменьшении времени обработки позволяет существенно диспергировать структуру α -твердого раствора по сравнению с традиционной термической обработкой.

Список литературы

1. Термоциклическая обработка сталей, сплавов и композиционных материалов [Текст] / Под ред. М. Х. Шоршорова. – М., 1984.
2. Подзоров, Б. Н. [Текст] / Б. Н. Подзоров, М. Е. Смагоринский // Цвет, металлы. – 1980. – № 12. – С. 66–68.
3. Ждановская, В. А., Термоциклическая обработка заэвтектических силуминов. [Текст] / В. А. Ждановская, Н. В. Шепельский, В. С. Биронт // Термоциклическая обработка деталей машин. – Волгоград. – 1981. – С. 120–122.
4. Биронт, В. С. [Текст] / В. С. Биронт, Б. С. Заиграйкина // Литейное производство. – 1982. – № 7 – С. 15–16.
5. Кенис, Н. С. [Текст] / Н. С. Кенис, Б. Ф. Трахтенберг, Л. В. Трошина // Термоциклическая обработка металлических изделий. – Л., 1982. – С. 144–146.
6. Терентьев, В. Ф. [Текст] / В. Ф. Терентьев // Докл. АН СССР. – 1969. – Т. 185, – № 2. – С. 324–327.
7. Тофпенек, Р. Л. [Текст] / Р. Л. Тофпенек, А. Д. Грешилов, И. И. Шиманский // Изв. ЛИ БССР:

Серия физ.-техн. наук. – 1989. – № 3. – С. 118. Деп. в ВИНТИ 02.01.89, № 50-В89.

8. Грешилов, А. Д. Исследование и создание технологии термоциклической обработки литейных алюминиевых сплавов для деталей, склонных к короблению: Дис. ... канд. техн. наук. [Текст] / – Мн., – 1990.

9. Аристова, Н. А. Термическая обработка литейных алюминиевых сплавов. [Текст] / Н. А. Аристова, И. Ф. Колобнев. / ВЦП, № Д-32552. Пер. ст.: Итикава М. // Сэймицу кикай. – 1980. – Т. 46, – № 10. – С. 1265–1272.

10. Колобнев, И. Ф. [Текст] / И. Ф. Колобнев, В. В. Крымов, А. В. Мельников // Справочник литейщика. – М., – 1974.

11. Колобнев, И. Ф. Термическая обработка алюминиевых сплавов [Текст] / И. Ф. Колобнев. – М., 1961.

12. Захаров, А. М. Промышленные сплавы цветных металлов. Фазовый состав и структурные составляющие [Текст] / А. М. Захаров. – М., 1980.

13. Лыгденов, Б. Д. Термоциклирование. Структура и свойства [Текст] / Б. Д. Лыгденов, Ю. П. Хараев, А. Д. Грешилов, А. М. Гурьев. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2014. – 252 с.

14. Тофпенек, Р. Л. Физические основы термоциклической обработки стареющих сплавов [Текст] / Р. Л. Тофпенек, И. И. Шиманский, А. Г. Анисович, А. Д. Грешилов. – Мн.: Наука і тэхніка, 1992. – 190 с.

15. Гурьев, А. М. Фазовый состав и механизм образования диффузионного слоя при борировании сталей в условиях циклического теплового воздействия [Текст] / А. М. Гурьев, Б. Д. Лыгденов, О. А. Власова, С. Г. Иванов, Э. В. Козлов, И. А. Гармаева // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. – № 1. – С. 20–27.

Грешилов Анатолий Дмитриевич² – к.т.н., доцент, декан Машиностроительного факультета (МСФ)

Фильчаков Дмитрий Сергеевич – старший преподаватель

Лыгденов Бурьял Дондокович – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Металловедение и технологии обработки материалов»

Мэй Шунчи² – к. т.н., декан факультета механики и автоматики

¹ ФГБОУ ВПО «Восточно-сибирский государственный университет технологий и управления» (ВСГУТУ), г. Улан-Удэ, Россия

² Уханьский текстильный университет, г. Ухань, Китай