УДК 669.716.621.785

DOI: 10.35211/1990-5297-2020-4-239-64-68

*О. Б. Крючков, А. Ф. Трудов, Д. А. Мордвинцева, Ю. Ю. Турапин, А. А. Бочинская***ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ВРЕМЕННЫХ ФАКТОРОВ
НА СТРУКТУРУ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АД31 СИСТЕМЫ Al-Mg-Si****Волгоградский государственный технический университет**

e-mail: mv@vstu.ru

Приведены результаты исследования макро- и микроструктуры, размеров зерен и их дисперсии, а также степени трансформации α - и β -железистых фаз, в цилиндрических заготовках диаметром 0,203 м и длиной 6,4 м из алюминиевого сплава АД31 системы Al-Mg-Si, полученного по технологии: выплавка, полунепрерывная разливка, механическая обработка, гомогенизационный отжиг при температурах 560, 570 и 590 °C с последующей выдержкой в течение 0,5 ч и охлаждением: вместе с печью, вентилятором, спрейером и в воде. Установлено, что наиболее высокая скорость охлаждения и наименьшие средний размер зерна и дисперсия наблюдаются в сторону уменьшения для сред: вода, спрейер, вентилятор, печь. Выявлено, что высокотемпературный отжиг при температуре 590 °C более эффективен, чем отжиг при температурах 560 и 570 °C, что связано со снижением количества железистых фаз с одновременным увеличением доли трансформированных включений.

Ключевые слова: гомогенизационный отжиг, алюминиевый сплав системы Al-Mg-Si-АД31, интерметаллидные включения типа α -AlFeSi и β -Al₅(FeMn)₂Si, величина зерна, дисперсия.

*О. В. Kryuchkov, A. F. Trudov, D. A. Mordvintseva, Yu. Yu. Turapin, A. A. Bochinskaya***STUDY OF INFLUENCE OF TEMPERATURE-TIME FACTORS
ALUMINIUM ALLOY STRUCTURE АД31 Al-Mg-Si SYSTEM****Volgograd State Technical University**

The results of the study of macro and microstructure, grain sizes and their dispersion, as well as the degree of transformation of α and β iron phases, in cylindrical blanks with diameter of 0.203 m and length of 6.4 m from aluminium alloy АД31 Al-Mg-Si system obtained according to the technology: Melting, semi-continuous casting, mechanical treatment, homogenization annealing at temperatures of 560, 570 and 590 °C with subsequent holding for 0.5 h and cooling together with furnace, fan, sprayer and in water. It has been found that the highest cooling rate and lowest average grain size and dispersion are observed downwards for media: water, sprayer, fan, oven. It has been found that high temperature annealing at a temperature of 590 °C is more effective than annealing at temperatures of 560 and 570 °C, which is due to a decrease in the number of iron phases with a simultaneous increase in the proportion of transformed inclusions.

Keywords: homogenization annealing, aluminium alloy of Al-Mg-Si -АД31 system, intermetallic inclusions of α -AlFeSi and β -Al₅(FeMn)₂Si type, grain size, dispersion.

Алюминиевые сплавы системы Al-Mg-Si (АД31, АД33, АД35 ГОСТ 4784-97), называемые авиалами, ввиду высокой штампуемости и свариваемости, а также обрабатываемости резанием при сравнительно высоких прочности и коррозионной стойкости в термически упрочненном состоянии, находят широкое применение в авиационной промышленности, ракетостроении, судостроении, а также железнодорожном и автомобильном транспорте. В качестве исходной заготовки для прессования используются слитки [1] сортового профиля простой формы, полученные непрерывной или полунепрерывной разливкой, которые подвергаются разрезке на мерные заготовки, гомогенизационному отжигу, необходимому для придания слиткам из алюми-

ниевого сплава однородной структуры, и охлаждению. Далее заготовки нагреваются, прессуются и подвергаются закалке и старению.

Температура гомогенизационного отжига [2–5] влияет на соотношение в алюминиевом сплаве долей благоприятных компактных интерметаллидных включений типа α -AlFeSi и менее благоприятных – β -Al₅(FeMn)₂Si.

Скорость охлаждения после термической обработки является очень важным элементом технологического процесса [2], способствующая уменьшению времени технологического процесса, но не должна быть слишком большой во избежание возникновения опасных термических напряжений, которые могут вызвать нарушение сплошности или коробление заготовок.

В настоящей работе исследовалось влияние температуры гомогенизирующего отжига и последующей выдержки на уменьшение содержания β -фазы и перевод ее в более компактную и благоприятную α -фазу, а также – влияние различных способов охлаждения образцов из сплава системы Al–Mg–Si на величину зерна и разнотернистость.

Материал исследования

В качестве материала для исследования был выбран цилиндрический слиток из сплава АД31 системы Al–Mg–Si диаметром 0,203 м и длиной 6,4 м, от которого отрезались поперечные диски толщиной 25 мм, на одном из ко-

торых исследовалась макроструктура литого металла, а второй – подвергался разрезке на образцы для исследования. Химический состав сплава АД31 по ГОСТ 4784–74 [6] приведен в табл. 1, поперечный диск и схема его разрезки на образцы для исследования – на рис. 1.

Таблица 1

Химический состав сплава АД31 ГОСТ 4784–74

Содержание химического элемента, %						
Mg	Si	Fe	Zn	Mn	Cu	Al
0,45–0,9	0,2–0,6	<0,5	<0,2	<0,1	<0,1	≈98

24.1	23.1	22.1	1.5	22.2	23.2	24.2
21.1	20.1	19.1	1.4	18.2	19.2	20.2
17.1	16.1	15.1	1.3	14.2	15.2	16.2
13.1	12.1	11.1	1.2	9.2	10.2	11.2
8.1	7.1	6.1	1.1	4.2	5.2	6.2
2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7
8.4	7.4	6.4	5.4	4.4	3.4	2.4
13.4	12.4	11.4	10.4	9.4	8.4	7.4
17.4	16.4	15.4	14.4	13.4	12.4	11.4
21.4	20.4	19.4	18.4	17.4	16.4	15.4
24.4	23.4	22.4	21.4	20.4	19.4	18.4

Рис. 1. Поперечный диск цилиндрического слитка из сплава АД31 и схема вырезки образцов

При проведении экспериментов для создания одинаковых условий нагревов образцы вырезались из одинаковых зон поперечного диска: 4,1; 4,2; 4,3 4,4; 5,1; 5,2; 5,3 5,4 и 6,1; 6,2; 6,3 6,4

(рис. 1). В процессе нагрева образцов проводили замеры в них температуры с использованием термопар ТХА, представленных на рис. 2.

Рис. 2. Исследуемые образцы с закрепленными в них термопарами ТХА

В качестве печи для нагрева использовалась лабораторная муфельная электропечь сопротивления типа СНОЛ-1, 6.2, 5/1-П-М1, ТУ 16-531. 408-72 и 8-и точечный регистрирующий

потенциометр марки ЭПР-09 МЗ, ГОСТ 7164-66. Лабораторная муфельная электропечь сопротивления с нагреваемыми образцами и термопарами представлена на рис. 3.

Рис. 3. Электрическая муфельная печь с образцами и термопарами

Методика исследования

Макроструктура литого слитка [7, 8] до проведения гомогенизирующего отжига исследовалась на поперечном диске-темплете, торцевая поверхность которого протачивалась и травилась в 15–20 % растворе гидроокиси натрия с последующим осветлением в 30 % водном растворе азотной кислоты. На макрошлифах определяли плотность и однородность структуры слитка, наличие раковин, трещин, расслоений, пористости, шлаковых, окисных и других посторонних включений. Внешний вид деталей и поверхностей деформации фиксировали цифровой фотокамерой при естественном освещении.

Оценку структуры [8] исследуемых образцов проводили на травленых шлифах путем замеров линейным методом размеров зерен и определения степени трансформации железистых фаз. Исследованию подвергались образцы в термообработанном состоянии по трем вариантам: нагрев вместе с печью четырех образцов с закрепленными в них термопарами до температур 560; 570 и 590 °С с последующей выдержкой в печи течение 0,5 ч. После выдержки в печи образцы охлаждались: один – в воде, второй под вентилятором, третий – подвергали спрейерному охлаждению водой, а четвертый образец охлаждался вместе с печью.

После охлаждения образцов до комнатной температуры на одинаково ориентированных поверхностях изготавливались шлифы, которые на части шлифа подвергались травлению с помощью реактива Келлера. Микроструктура [9,10] на поверхности шлифов исследовалась на микроскопе «Olympus» BX61.

Результаты исследования

На первом этапе была исследована макроструктура темплета из сплава АД31, представленного на рис. 4, которая не выявила пористости, подкорковых пузырей, крупнозернистой зоны, трещин, расслоений, шлаковых и других посторонних включений. Макроструктура по всему сечению исследуемого металла плотная и однородная.

Рис. 4. Макроструктура темплета из сплава АД31

Зеренная структура в образцах из алюминиевого сплава АД31 после гомогенизационного отжига при различных температурах, охлаждения в различных средах и последующего травления, представлены на рис. 5. Средние результаты замеров размеров зерен и расчетов дисперсии представлены в табл. 2.

Результаты табл. 2 показывают, что наибольший размер зерна наблюдается на образцах, охлаждаемых вместе с печью. При охлаждении образцов в воде, а также при использовании спрейера и вентилятора, размер зерна уменьшается. Причем, использование воды и спрейера в качестве охлаждающей среды более эффективно, чем охлаждение с помощью вентилятора. На рис. 6 приведены экспериментальные кривые охлаждения образцов из сплава АД31 с температуры 590 °С, что подтверждает результаты таблицы 2: малые скорости охлаждения образцов (в печи и с помощью вентилятора) способствуют большей величине зерна. Одновременно результаты замеров большого количества зерен на исследуемых образцах показали, что наилучшая дисперсия наблюдается на образцах, охлажденных после гомогенизирующего отжига в воде и с помощью спрейера.

Рис. 5. Зерна в образцах после гомогенизационного отжига при различных температурах, охлаждения в различных средах и последующего травления

Таблица 2

Средние размеры величин зерен и дисперсий в образцах из алюминиевого сплава АД31 в зависимости от способов охлаждения

№ образца	Количество замеров	Температура отжига, °C	Способ охлаждения	Средняя величина зерна, мкм	Дисперсия
4.4; 6.4; 5.2	1096	560; 570; 590	с печью	168	4,90
4.1; 6.1; 5.1	1592		в воде	129	3,02
4.3; 6.3; 5.3	1523		спрейером	143	2,85
4.2; 6.2; 5.4	1315		с вентилятором	152	3,52

Рис. 6. Изменение температуры образцов из сплава АД31 при различных вариантах охлаждения с температуры 590 °C

С целью изучения влияния температуры гомогенизационного отжига на степень трансформации железистых фаз, а именно уменьшение содержания β -фазы и перевод ее в благоприятную α -фазу, имеющую на порядок меньшие размеры, были проведены отжики при температурах: 560, 570–590 °С. Результаты оценки степени трансформации железистых фаз в зависимости от температуры отжига представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Оценка степени трансформации железистых фаз
в зависимости от температуры отжига**

Температура отжига, °С	Количество трансформировавшихся включений, %
560	78
570	90
590	96

После проведения гомогенизирующего отжига основными интерметаллидными включениями в различных участках слитков сплава АД31, выделившимися вдоль границ дендритных ветвей, являются близкие к равноосным компактные включения α -AlFeSi. Исходя из данных табл. 3 видно, что с увеличением температуры отжига с 560 до 590 °С, увеличилась доля трансформировавшихся включений. Так, доля вытянутой с отношением длина/толщина ≥ 5 β -Al₅(FeMn)₂Si-фазы после отжига при 560 °С составила 22 %, после отжига при 570 °С – 10 %, а после отжига при 590 °С – всего 4 %. Высокотемпературный нагрев способствует реализации процессов трансформации и сфероидизации железосодержащих фаз. Чем выше температура, тем интенсивнее происходят эти процессы, даже при малых выдержках.

Заключение

1. Наиболее высокая скорость охлаждения, наименьшие средний размер зерна и дисперсия на образцах из алюминиевого сплава АД-31 в сторону уменьшения наблюдаются для сред: вода, спрейер, вентилятор, печь.

2. Установлено, что высокотемпературный отжиг при температуре 590 °С более эффекти-

вен, чем отжиг при температурах 560 и 570 °С, что связано со снижением количества железистых фаз с одновременным увеличением доли трансформировавшихся включений: доля вытянутой с отношением длина/толщина ≥ 5 β -Al₅(FeMn)₂Si-фазы после отжига при 560 °С составила 22 %, после отжига при 570 °С – 10 %, а после отжига при 590 °С – всего 4 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- ГОСТ 19437–81 Слитки алюминиевые цилиндрические. Технические условия. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2003.
- Исследование и оптимизация режимов термической обработки слитков сплавов системы Al-Mg-Si: автореферат дис. ... канд. техн. наук научный руководитель профессор, д-р техн. наук В. С. Золоторевский. – Москва, 2007.
- Гуревич, Л. М. Изменение микроструктуры деформируемых алюминиевых сплавов производства филиала «ВГАЗ-СУАЛ» при гомогенизационном отжиге / Л. М. Гуревич, Л. В. Рагозин, А. Н. Богомолов, В. В. Плотников, А. Н. Жоров, О. С. Киселев // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 15 (118) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – С. 118–123.
- Оптимизация режимов гомогенизации слитков из алюминиевых деформируемых сплавов / Э.В.Седов, О. П. Бондарева, Л. В. Палаткина, И. С. Тарасов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2014. – С. 1–4.
- Влияние химического состава на структуру и свойства сплава системы Al-Mg-Si / А. О. Кузнецов, М. С. Оглодков, А. А. Климкина / Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации] / Труды ВИАМ № 7 (67), 2018.
- ГОСТ 4784–74 Межгосударственный стандарт. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. – ИПК Издательство стандартов. – Москва, 1997. – 10 с.
- Инструкция «Макроконтроль слитков алюминиевых цилиндрических (ГОСТ 419437–81) [7], ОАО «СУАЛ» филиал «ВГАЗ-СУАЛ».
- Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Литейное материаловедение». Раздел «Изучение макро- и микроструктуры металлов и сплавов» для студентов специальности 12.03 / сост.: В. Г. Борщ, П. В. Доценко. – Одесса : ОПИ, 2015. – 32 с.
- ГОСТ 21073.1–75 Межгосударственный стандарт / Металлы цветные. Определение величины зерна методом сравнения со шкалой микроструктур. – М. : ИПК Издательство стандартов, Москва, 2002.
- Металловедение алюминия и его сплавов : справ. изд. / А. И. Беляев [и др.]. – М. : Металлургия, 1983. – 280 с.