

УДК 669.01

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СПЛАВА АК7ч ДЛЯ СОКРАЩЕНИЯ ВРЕМЕНИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГОТОВОЙ ПРОДУКЦИИ

**Е.М. Фомичёва**

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: rouge@mail.ru

*Исследовано влияние режимов термической обработки на получение качественных механических свойств и микроструктуры деталей из марки литейного алюминиевого сплава АК7ч, соответствующих требованиям производственной инструкции по термической обработке. Методами металлографического анализа изучена микроструктура сплава детали и разрывных образцов и их механические свойства по двум разным режимам (с естественным старением и без естественного старения). Описан выбор режимов дальнейшей термической обработки материала деталей. Благодаря исследованию технологического процесса изготовления деталей сокращено время их производства без потери качества их свойств.*

**Ключевые слова:** закалка, литейный алюминиевый сплав АК7ч, микроструктура, естественное старение, механические свойства.

В мировой промышленности алюминиевые сплавы характеризуются наибольшим объемом производства среди цветных металлов и уступают только стали. Практически нет ни одной отрасли, в которой не использовались бы алюминиевые сплавы. Алюминий и алюминиевые сплавы – первые конструкционные металлы, которые использованы в самолетостроении. Свое значение в самолетостроении алюминий сохраняет и сейчас – до 75 % массы современного самолета составляют детали на его основе [1].

Наибольшее распространение получил сплав АК7ч (АЛ9). Он применяется для изготовления авиационных подвесок, а также тонкостенных отливок сложной формы.

Данный сплав имеет ряд особенностей: повышенную жидкотекучесть, обеспечивающую получение тонкостенных и сложных по конфигурации отливок; сравнительно невысокую линейную усадку; пониженную склонность к образованию горячих трещин [2].

Достоинством сплавов на основе системы Al–Si является повышенная коррозионная стойкость во влажной и морской атмосферах. Недостатки этих сплавов – повышенная газовая пористость и пониженная жаропрочность. Технология литья сплава АК7ч более сложна и требует применения операций модифицирования. Получаемые отливки плотны, герметичны, имеют концентрированную усадочную раковину [3].

Детали подвергаются термической обработке: закалка + естественное старение.

Цель закалки – получить в сплаве предельно неравновесное фазовое состояние (пересыщенный твердый раствор с максимальным содержанием легирующих элементов). Такое состояние обеспечивает, с одной стороны, непосредственное повышение (по сравнению с равновесным состоянием) твердости и прочности, а с другой стороны, возможность дальнейшего упрочнения при последующем старении.

Старение представляет собой выдержку закаленного сплава при некоторых (относительно низких) температурах, при которых начинается распад пересыщенного твердого раствора или в твердом растворе происходят структурные изменения, являющиеся подготовкой к распаду. Цель старения – дополнительное повышение прочности закаленных сплавов.

Выдержку закаленных алюминиевых сплавов в естественных условиях (при температуре окружающей среды), которая приводит к определенным изменениям структуры и свойств (прочность, как правило, повышается), называют естественным старением.

Свойства алюминиевых сплавов в свежезакаленном состоянии могут значительно отличаться от их свойств спустя определенное время после закалки (в результате естественного старения) [4].

Марка АК7ч распространена в производстве не только в России, но и в зарубежных странах. По западной классификации марка АК7ч входит в систему 4xxx (сплавы, где главный легирующий элемент – Si). В табл. 1 представлены точные и ближайшие зарубежные аналоги материала АК7ч.

Таблица 1

Зарубежные аналоги материала АК7ч

США	Германия	Япония	Франция	Англия	Китай	Inter
–	DIN, WNr	JIS	AFNOR	BS	GB	ISO
323 356.0 A03560	G- AlSi7Mg	AC4C	A-S7G AS7G03	LM25	HZL101 ZAlSi7Mg ZL101 ZL11	AlSi7Mg AlSi7Mg(Fe)

Вопросы технологии термической обработки данного материала также поднимаются в зарубежной литературе. В 2010 г. проведено исследование влияния температуры закалки на фазу кремния в микроструктуре сплава A356, который является аналогом сплава АК7ч. Выяснено, что оптимальной температурой закалки для сфероидизации кремния является температура 535 °С с выдержкой 4 ч [5]. В свою очередь, в данной работе детали и образцы также проходили закалку при похожем режиме (закалка при температуре 535 °С с выдержкой 5 часов).

В зарубежной литературе большое внимание уделялось процессам искусственного старения данных сплавов, их влиянию на микроструктуру, механическим свойствам, рассматривались различные температуры и выдержки при обработке образцов [6-9].

На производстве при изготовлении деталей из данного сплава возник вопрос сокращения времени изготовления деталей. Режим термической обработки для деталей указан в производственной инструкции, где выдержка при естественном

старении составляет 48 часов, что является нерентабельным для производства. Для решения вопроса оптимизации процесса производства необходимо изучить влияние термической обработки данного сплава: влияние режимов старения на микроструктуру и механические свойства отливок.

Целью данного исследования является изучение процесса термической обработки деталей из данного сплава для сокращения времени изготовления готовой продукции с сохранением микроструктуры и механических свойств соответственно нормативно-технической документации.

### Материалы и методики

Для изготовления тонкостенных отливок сложной формы, в том числе авиационных подвесок, используется алюминиевый литой сплав марки АК7ч. Химический состав данного алюминиевого сплава по ГОСТ 1583-93 «Сплавы алюминиевые литейные» указан в табл. 2.

Таблица 2

**Химический состав алюминиевого литейного сплава АК7ч по ГОСТ 1583-93**

Fe	Si	Mn	Al	Cu	Pb	Be	Mg	Zn	Sn	Примеси	–
До 1,5	6–8	До 0,5	89,6 – 93,8	До 0,2	До 0,05	До 0,1	0,2–0,4	До 0,3	До 0,01	Всего 2	Ti+Zr<0,15

В исследовании рассматривались 4 плавки образцов. Химический состав каждой из плавков указан в табл. 3.

Таблица 3

**Химический состав плавков эксперимента**

№ плавки	Fe	Si	Mn	Cu	Mg	Zn
2	0,3	7,5	0,05	0,06	0,29	0,05
3	0,3	7,7	0,03	0,04	0,3	0,04
4	0,13	6,9	0,04	0,04	0,2	0,04
6	0,3	6,6	0,03	0,11	0,3	0,07

Изначальные данные по параметрам и режимам технологии производства деталей из алюминиевого сплава АК7ч взяты из технологического процесса предприятия.

Литье отливок производится в кокиль. Для измельчения структуры эвтектики и размеров кристаллов кремния расплав подвергают модифицированию, то есть в жидкий расплав вводят NaCl (1/3) в количестве 2 % от массы жидкого сплава.

После модифицирования отливаются экспресс-пробы на спектральный анализ материала. Спектральный анализ производят на спектрометре МФС-8. После подтверждения соответствия химического состава нормативно-технической документации производят отливку деталей и образцов на механические испытания. Далее детали и образцы-свидетели загружают в печь для проведения термической обработки в виде закалки, после закалки детали и образцы выдерживают 48 ч, за это время происходит процесс естественного старения, время выдержки которого описано в производственной инструкции и занесено в технологический процесс.

По окончании цикла термической обработки из образцов-свидетелей на слесарно-токарных станках вырезаются цилиндрические образцы на растяжение (предел прочности и относительное удлинение), а также образец на контроль микроструктуры (отсутствие пережога). Образец на пережог проходит процесс шлифовки и полировки на пробоподготовительном оборудовании металлографической лаборатории. Для выявления микроструктуры он травится в реактиве  $\text{HF} + \text{HNO}_3 + \text{HCl} + \text{H}_2\text{O}$ . Микроструктура шлифа смотрится с помощью анализатора фрагментов микроструктуры твердых тел Siams 700.

Механические свойства проверяются на двух образцах от плавки на разрывной машине ИР 5047-50.

### Результаты

Процесс закалки деталей и образцов-свидетелей проводился при температуре  $535 \pm 5$  °С с выдержкой 4-5 ч, охлаждение происходило в воде. Естественное старение происходило при комнатной температуре с выдержкой 48 ч.

В ходе эксперимента для выявления влияния времени выдержки при естественном старении на микроструктуру и механические свойства производился отбор проб на механические испытания без выдержки и с выдержкой 12, 24, 48 ч, а также проверена микроструктура на разрывных образцах со старением и без старения, на деталях со старением и без старения.

Механические свойства образцов указаны в табл. 4.

Таблица 4

**Механические свойства отливок после закалки и естественного старения с различным временем выдержки**

№ плавки	Время выдержки, ч	Предел прочности $\sigma_B$ , кгс/мм <sup>2</sup>	Относительное удлинение $\delta$ , %
2	Без старения	26	12
3	12	25	14
4	24	24	13
6	48	25	14

На рис. 1, 2 показаны микроструктуры разрывных образцов со старением и без старения, а также шлифов, вырезанных из деталей со старением и без старения.

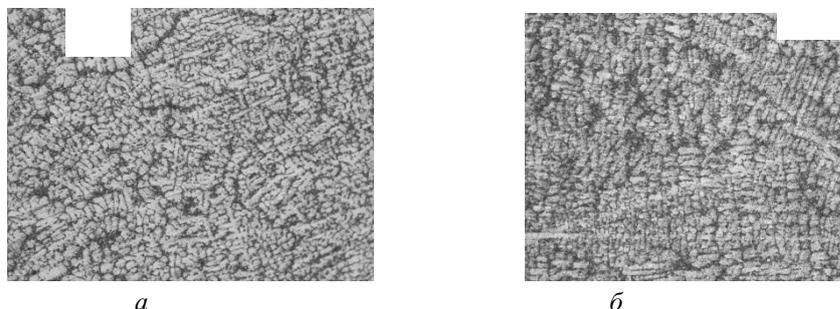


Рис. 1. Микроструктура разрывного образца:  
а – без старения; б – со старением, увеличение  $\times 100$

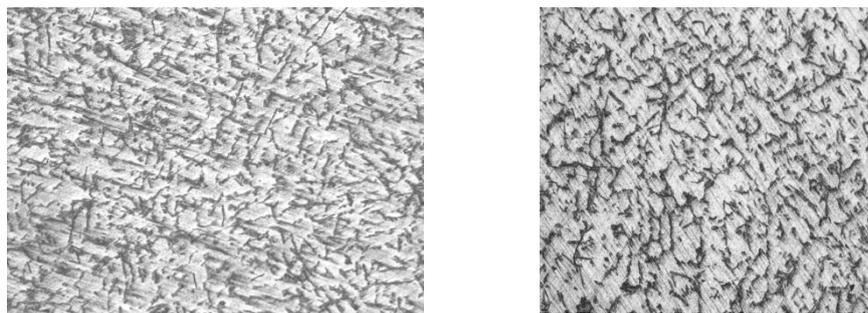


Рис. 2. Микроструктура детали:  
*a* – со старением; *б* – без старения, увеличение  $\times 100$

### Обсуждение результатов

В настоящее время процесс изготовления деталей из сплава АК7ч широко рассматривается в основном в зарубежной литературе. Особое внимание уделяется процессам закалки и искусственного старения. Исследуются температуры и время выдержки на сфероидизацию кремниевых включений, механические свойства (предел прочности и удлинение), твердость.

В ходе анализа иностранной литературы выяснено, что в настоящее время приоритетным режимом термической обработки аналогов сплава АК7ч является режим закалка + искусственное старение. Температуры закалки варьируются от 550 °С с выдержкой 1 ч до 535 °С с выдержкой 4 ч [5]. Температуры искусственного старения исследуются в диапазоне 155–200 °С [9].

Одним из важных моментов получения качественной микроструктуры деталей является процесс модифицирования сплава. После модифицирования структура состоит из мелкодисперсной эвтектики и мелкозернистых кристаллов кремния. Измельчение структуры объясняется тем, что силицид натрия  $\text{Na}_2\text{Si}$  обволакивает пленкой кристаллы кремния и затрудняет их рост. Добавление магния в сплав дает дополнительную упрочняющую фазу –  $\text{Mg}_2\text{Si}$ .

Данный эксперимент поставлен для сокращения времени изготовления деталей, так как выдержка при естественном старении составляет 48 ч по производственной инструкции, что является экономически невыгодным для производственного предприятия.

Старение свойственно многим алюминиевым сплавам. Оно происходит в том случае, если вводимые в алюминий элементы образуют между собой или с алюминием интерметаллическое соединение, то есть химическое соединение двух или большего числа металлов, растворимое в алюминии при температуре закалки и стремящееся выделиться из твердого раствора при понижении температуры.

При наличии в химическом составе достаточного количества таких легирующих элементов, как медь, магний образует соединение с медью  $\text{CuAl}_2$  и тройное соединение с медью и магнием  $\text{Al}_2\text{CuMg}$ , что характерно для алюминиевых сплавов системы Al–Cu. Оба эти соединения растворяются в алюминии при температуре закалки; при комнатной температуре растворимость их резко падает, и сплавы с этими фазами сильно упрочняются в результате процесса старения [4].

Из табл. 3 видно, что данные плавки имеют низкое процентное содержание меди и магния и наибольшее упрочнение вызывает фаза  $\text{Mg}_2\text{Si}$ , а фазы, способствующие упрочнению при естественном старении, отсутствуют.

Для подтверждения теоретической информации отобранные плавки подвергались закалке и различным по времени выдержкам при комнатной температуре. Плавка № 2 естественно не состаривалась, механические свойства и микроструктура достигались сразу после того, как деталь приобретала комнатную температуру после закалки. Плавки № 3, 4, 6 выдерживались при комнатной температуре по 12, 24 и 48 ч соответственно.

В ходе эксперимента выяснена зависимость механических свойств от времени выдержки деталей при естественном старении. Как видно из табл. 4, при увеличении времени выдержки предел прочности и относительное удлинение практически не меняются, неидентичность значений можно отнести к разнице химического состава в плавках.

На рис. 1 и 2 рассмотрена микроструктура образцов без естественного старения и с естественным старением. Из рисунков видно, что естественное старение не влияет на дисперсность зерна и распределение кремния.

### Заключение

Из полученных данных можно сделать вывод: выдержка деталей в течение 2 суток необязательна, соответственно процесс изготовления деталей возможно сократить и производить дальнейшие операции сразу после охлаждения деталей до комнатной температуры, что экономически выгодно для производства.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Илларионов Э.И., Колобнев Н.И., Горбунов П.З.* Алюминиевые сплавы в авиакосмической технике. – М.: Наука, 2001. – 192 с.
2. *Davis J.R., Ed.* Aluminum and Aluminum Alloys. – ASM International, 1993.
3. *Белов Н.А.* Фазовый состав промышленных и перспективных алюминиевых сплавов: Монография. – М.: Изд. дом МИСиС, 2010. – 511 с.
4. *Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.И.* Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. – М.: МИСиС, 1999. – 416 с.
5. Effect of heat treatment on microstructure and tensile properties of A356 alloys // PENG Ji-hua, TANG Xiao-long, HE Jian-ting, XU De-ying // *Trans/ Nonferrous Met/ Soc/ China* 21 (2011)/ 1950-1956.
6. *Akhil K.T., Arul Sanjivi, Sellamuthu R.* The Effect of Heat Treatment and Aging Process on Microstructure and Mechanical Properties of A356 Aluminium Alloy Sections in Casting, *Procedia Engineering*, Volume 97, 2014, Pages 1676–168.
7. *Rincon E., Lopez H.F., Cisneros M.M., Mancha H.* Temperature effects on the tensile properties of cast and heat treated aluminum alloy A319 *Materials Science and Engineering: A* Volume 519, Issues 1–2, 30 August 2009, Pages 128–140.
8. *Mohammad Azadi, Mehdi Mokhtari Shirazabad.* Heat treatment effect on thermo-mechanical fatigue and low cycle fatigue behaviors of A356.0 aluminum alloy *Materials & Design* Volume 45, March 2013, Pages 279–285.
9. *Tash M., Samuel F.H., Mucciardi F., Doty H.W.* Effect of metallurgical parameters on the hardness and microstructural characterization of as-cast and heat-treated 356 and 319 aluminum alloys *Materials Science and Engineering: A* Volume 443, Issues 1–2, 15 January 2007, Pages 185–201.
10. *Alexopoulos N.D., Pantelakis Sp.G.* Quality evaluation of A357 cast aluminum alloy specimens subjected to different artificial aging treatment *Materials & Design* Volume 25, Issue 5, August 2004, Pages 419–430.
11. *Окладникова Н.В., Овчинникова Е.С., Васимов С.А., Волков В.О.* Влияние режимов термической обработки на структуру и свойства сплава АК7Пч // Сибирский федеральный университет [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2010/pdf/16/79.pdf>

Статья поступила в редакцию 5 марта 2015 г.

## RESEARCH OF TECHNOLOGICAL PROCESS OF HEAT TREATMENT OF DETAILS OF THE ALLOY AK74 FOR REDUCTION OF TIME OF PRODUCTION OF FINISHED GOODS

*E.M. Fomicheva*

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

*Influence of the modes of heat treatment on obtaining qualitative mechanical properties and microstructure in the details from casting aluminum alloy AK74 conforming to requirements of the production instruction on heat treatment is investigated. Methods of the metalgraphic analysis studied the microstructure of details and explosive samples and their mechanical properties on two different modes (with natural aging and without natural aging). The choice of the further heat treatment modes of material is described. Due to the research of technological details production the time of their production is reduced without loss of quality of their properties.*

**Keywords:** *quenching, casting aluminium alloy, microstructure, natural ageing, mechanical properties.*