

Учреждение образования Республики Беларусь  
«Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого»  
Механико-технологический факультет

Кафедра "Материаловедение в машиностроении"

Лабораторная работа № 3

по теме: «СТРУКТУРА И СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ»

Выполнил:  
студент группы ТТ-21  
Галицкий И.П.  
Принял преподаватель:  
Поздняков Е.П.

**СТРУКТУРА И СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

**Цель работы:** изучить маркировку, применение и влияние термической обработки на структуру и свойства алюминиевых сплавов.

**Приборы и материалы:** лабораторные камерные электропечи, образцы сплавов алюминия, закалочный бак с водой, щипцы, прибор типа Роквелла ТК-2М, индентор – стальной шарик.

**Теоретическая часть.**

Алюминий имеет гранецентрированную кубическую решетку. Его температура плавления составляет  $660,37^{\circ}\text{C}$ , а плотность —  $2,699 \text{ г/см}^3$  (при  $20^{\circ}\text{C}$ ). Значения теплопроводности и электропроводности составляют примерно  $2/3$  от соответствующих значений для меди. Алюминиевые сплавы подразделяют на деформируемые, литейные и порошковые, а также на термически упрочняемые и термически неупрочняемые.

Промышленные литейные алюминиевые сплавы согласно маркируют буквой А, за которой следуют буквы, обозначающие легирующий элемент. Цифры после обозначения элемента указывают среднее его содержание. Если концентрация элемента не превышает 1,5 %, то после его обозначения цифры не проставляют. Буквы *ч* или *пч* в конце марки (чистый, повышенной чистоты) указывают на пониженное содержание примесей.

Для повышения пластичности литейные алюминиевые сплавы подвергают закалке, а для повышения прочности, кроме того, и старению.

Отличительная особенность алюминия заключается в его высокой теплопроводности, в связи с чем проблема прокаливаемости не имеет особой остроты. Склонность алюминия и его сплавов к взаимодействию с газами, составляющими атмосферу печи, невелика.

Для алюминиевых сплавов наибольшее распространение получили три вида термической обработки: отжиг, закалка и старение.

Таблица 1

**Химический и фазовый составы промышленных литейных сплавов (без учета малых добавок и примесей)**

№	Базовая система	Содержание, %				Фазовый состав	Фазы-упрочнители	$T_E, ^{\circ}\text{C}$
		Si	Mg	Cu	Zn			
1	Al-Si	4,5-13	—	—	—	(Al)+(Si)	—	577
2	Al-Si-Mg	6-11	0,1-0,6	—	—	(Al)+(Si)+ $\text{Mg}_2\text{Si}$	$\beta', \beta''$	555
3	Al—Si—Cu	7-13	—	1,5-5	—	(Al)+(Si)+ $\text{Al}_2\text{Cu}$	$\theta', \theta''$	525
4	Al—Si—Cu—Mg	4-23	0,2-1,1	10,5-8	—	(Al)+(Si)+ $\text{Al}_2\text{Cu}$ + $\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$	$\theta', \theta'', \beta', \beta'', S (\text{Al}_2\text{CuMg})$	505
5	Al—Si—Cu—Mg—Zn	6-10	0,1-0,5	10,3-1,5	12	(Al)+(Si)+ $\text{Al}_2\text{Cu}$ + $\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6(\text{Q})$	$\theta', \theta'', \beta', \beta'', S (\text{Al}_2\text{CuMg})$	505
6	Al—Cu	—	—	3,5-11	—	(Al)+ $\text{Al}_2\text{Cu}$	$\theta', \theta''$	548
7	Al—Mg	—	2,5-12	—	—	(Al)+ $\text{Al}_3\text{Mg}_2$	—	450
8	Al—Mg—Zn	—	0,5-2,4	—	2,5-6	(Al)+ $\text{MgZn}_2$	$\eta, \eta', T'$	475
9	Al—Zn—Mg—Cu	—	1,5-2,5	10,4-1,5	8	(Al)+ $\text{MgZn}_2$ + $\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6(\text{Q})$	$\eta, \eta'$	470 475

\*Фазы, образующиеся при старении после закалки.

Таблица 2

**Обозначение видов термообработки для литейных алюминиевых сплавов**

Вид термообработки	Обозначение
Без термообработки	—
Искусственное старение после литья (без закалки)	T1
Отжиг	T2
Закалка (плюс естественное старение)	T4
Закалка и неполное искусственное старение	T5
Закалка и старение на максимальную прочность	T6
Закалка и стабилизирующий отпуск (перестаривание)	T7
Закалка и смягчающий отпуск	T8

Наиболее распространенными алюминиевыми сплавами для получения изделий с помощью методов аддитивных технологий являются AlSi10Mg, AlSi12-A, AlSi7Mg0,6, AlSi9Cu3 и др.

Сплав **AlSi10Mg-0403** является аналогом алюминиевого сплава (аналог АК9ч). Он состоит из алюминиевой основы, легированной кремнием с массовой долей до 10 %, небольшим количеством магния и железа и другими незначительными элементами (табл. 3). Наличие в составе кремния делает сплав тверже и прочнее, чем чистый алюминий благодаря формированию соединения  $Mg_2Si$ .

Таблица 3

**Химический состав сплава AlSi10Mg-0403, масс. %**

Al	Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti
			не более							
основа	9,0-11	0,2-0,4	0,55	0,05	0,45	0,05	0,10	0,05	0,05	0,15

Алюминиевый сплав **AlSi12-A** – это легированный порошок на основе алюминия AlSi12-A LMF. Детали, выполненные из данного порошка, по своему составу соответствуют устойчивому к коррозии алюминиевому сплаву 3.2582 (АМг4.5). Данный сплав не является термически упрочняемым. Химический состав приведен в табл. 4.

Таблица 4

**Химический состав сплава AlSi12-A, масс. %**

Al	Si	Mn	Cu	Zr	Mg	Zn	Ti	остальных месей
		не более						
84,3-90	10-13	0,5	0,6	0,1	0,1	0,3	0,1	2,7

Этот сплав обладает низким удельным весом, высокой прочностью при литье в кокиль и под давление (157 МПа), достаточной твердостью, высокой термостойкостью, но низкой пластичностью (относительное удлинение не более 3%). Этот сплав плохо обрабатывается резанием и давлением (прокатка), но для него характерна повышенная жидкотекучесть. В дальнейшем из отливок изготавливают детали для бытовой техники, горно-металлургической, авиастроительной, машиностроительной отраслей промышленности. Используется для изготовления картеров, поршней, блоков цилиндров, мясорубок, теплообменников, корпусов помп, трубопроводной арматуры, переходников и др. сложнопрофильных деталей.

**AlSi7Mg0,6** (русский аналог **АК7ч** или **АЛ9**) – сплав на основе алюминия, который часто используется в тех случаях, когда в число требований входят отличная теплопроводность, хорошая коррозионная стойкость и устойчивость к деформации. Применяется в автомобильной и аэрокосмической отрасли, для прототипирования, а также в научных исследованиях. Сплав обладает неплохой прочностью 225МПа, малой усадкой (1%), но низкой пластичностью (1...4%). Химический состав этого сплава приведен в табл. 5.

*Таблица 5*

**Химический состав сплава AlSi7Mg0,6, масс.%**

Al	Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Be	Zn	Pb	Sn	остальных месей
не более										
89,6-91	6-8	0,2-0	1,5	0,2	0,5	0,1	0,10	0,05	0,01	2

**AlSi9Cu3** (русский аналог **АК8М3**) – сплав на основе алюминия, кремния и меди, который отличается низкой плотностью, хорошей высокотемпературной прочностью и коррозионной стойкостью. Сплав применяется для изготовления силовых и герметичных деталей, работающих при температурах до +250 °С. По сравнению со сплавом AlSi7Mg0,6 он имеет повышенный предел прочности порядка 390 МПа и относительное удлинение достигает 5 %. Химический состав этого сплава приведен в табл. 6.

*Таблица 6*

**Химический состав сплава AlSi9Cu3, масс.%**

Al	Si	Mg	Ti	Cu	Be	Zn	Fe	Zr	Cd	остальных месей
не более										
85,4-89	7-8,5	0,2-0,5	0,1-0,3	2,5-3	0,05-0,1	0,5-1	0,4	0,15	0,15	0,6

**Основы термической обработки алюминиевых сплавов.** Термическая обработка слитков и деформированных полуфабрикатов является мощным средством воздействия на их структуру и свойства.

Равновесная структура промышленных алюминиевых сплавов, суммарное содержание легирующих компонентов в которых, за редким исключением, не превышает 15-18%, представляет собой твердый раствор с низким содержанием легирующих компонентов (десятые доли процента) с включениями интерметаллидных фаз Al<sub>2</sub>Cu, Al<sub>2</sub>CuMg, MgZn<sub>2</sub>, Mg<sub>2</sub>Si и т.д.

При таком фазовом составе сплавы, как правило, обладают низкой прочностью и очень высокой пластичностью. Самой неустойчивой при комнатной температуре структурой в алюминиевых сплавах, имеющих фазовые превращения в твердом состоянии (термически упрочняемых сплавах), является пересыщенный твердый раствор легирующих компонентов в алюминии, концентрация которых может в десятки раз превышать равновесную. При такой структуре алюминиевые сплавы также пластичны, но значительно прочнее, чем в равновесном состоянии.

Для алюминиевых сплавов широкое распространение в металлургическом производстве получили три основных вида термообработки: отжиг, закалка и старение.

**Отжиг** полуфабрикатов применяется в тех случаях, когда возникшее по тем или иным причинам неравновесное состояние сплава обуславливает появление нежелательных свойств, чаще всего пониженной пластичности.

Применительно к алюминиевым сплавам наиболее распространены три

разновидности неравновесных состояний:

1. *Неравновесное состояние, свойственное литым сплавам.* Скорость охлаждения сплавов при кристаллизации слитков значительно превышает скорости охлаждения, необходимые для равновесной кристаллизации. Особенности литой структуры деформируемых алюминиевых сплавов, в частности неравновесная эвтектика по границам дендритных ячеек в виде почти непрерывных ободков интерметаллидных фаз, обуславливают пониженную пластичность слитков, особенно из высокопрочных (высоколегированных) сплавов, а отсюда трудности их деформирования.

2. *Неравновесное состояние, вызванное пластической деформацией, особенно холодной.*

3. *Неравновесное состояние, являющееся результатом предыдущей упрочняющей обработки (закалки и старения).* Основная особенность такого состояния – присутствие в сплаве более или менее пересыщенного (легирующими компонентами) твердого раствора с дисперсными выделениями интерметаллидных фаз. Между этим неравновесным состоянием и двумя выше рассмотренными имеется принципиальное различие: оно может быть получено только в сплавах, претерпевающих фазовые превращения в твердом состоянии, т.е. в термически упрочняемых сплавах, в то время как два других состояния наблюдаются и в сплавах без фазовых превращений в твердом состоянии, и в сплавах с такими превращениями.

В соответствии с тремя рассмотренными выше разновидностями неравновесных состояний, различают *три разновидности отжига*:

- 1) гомогенизирующий отжиг слитка, или гомогенизация;
- 2) рекристаллизационный и дорекристаллизационный отжиг деформированных изделий после обработки давлением;
- 3) гетерогенизационный отжиг, как правило, термически упрочненных полуфабрикатов (до распада пересыщенного твердого раствора и коагуляция выделившихся интерметаллидов) с целью разупрочнения.

*Гомогенизация* – разновидность отжига, которая применяется при производстве деформированных полуфабрикатов. Гомогенизация слитка – первая термическая обработка в технологическом процессе.

*Рекристаллизационный отжиг* наиболее распространен в качестве промежуточной термической обработки между операциями холодной деформации или между горячей и холодной деформацией.

*Дорекристаллизационным отжигом* является неполный отжиг, который применяют в качестве окончательной термообработки с целью получения полуфабрикатов (обычно листов) с промежуточными свойствами – между свойствами нагартованного состояния (высокая прочность и низкая пластичность) и рекристаллизованного, полностью отожженного (низкая прочность и высокая пластичность).

*Гетерогенизационный отжиг термически упрочненных полуфабрикатов с целью их разупрочнения* применяют только для сплавов, упрочняемых термообработкой. Он необходим в тех случаях, когда полуфабрикаты, упрочненные закалкой и старением, требуется разупрочнить (например, закаленные листы перед холодной штамповкой).

*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.

Закалку применяют для сплавов, претерпевающих фазовые превращения в твердом состоянии. В алюминиевых сплавах, используемых в промышленности, наблюдается

лишь один вид фазовых превращений; при нагреве интерметаллидные фазы растворяются в алюминии, а при охлаждении вновь выделяются из твердого раствора

Таким образом, закалка возможна только для алюминиевых сплавов, содержащих компоненты, растворимость которых в твердом алюминии возрастает с температурой (Cu, Mn, Si, Zn, Li), причем в количествах, превышающих растворимость при комнатной температуре.

Закалка алюминиевых сплавов заключается в нагреве сплавов до температуры, при которой избыточные интерметаллидные фазы полностью или большей частью растворяются в  $\alpha$ -фазе, выдержке при данной температуре и быстром охлаждении до комнатной температуры для получения перенасыщенного твердого раствора. На рис. 1 приведена схема диаграммы состояния для системы алюминий–медь, на которой пунктиром показаны зоны нагрева сплавов под закалку.

Время выдержки в печи, необходимое для растворения интерметаллидных фаз, зависит от структуры сплавов, типа печи и толщины изделия и составляет от 10 мин до 3,5 ч. Охлаждение обычно проводят в холодной воде, а фасонных отливок – в подогретой до 50...100 °С.

После закалки изделия подвергают старению естественному или искусственному.

**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.

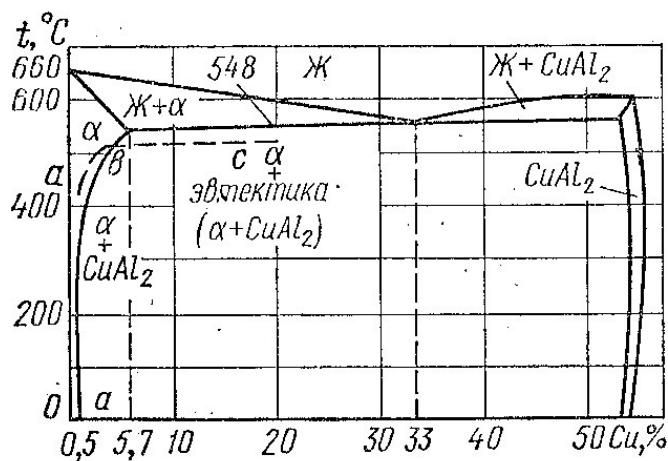


Рис. 1. Диаграмма состояния Al–Cu

*Распадом* называют процесс, в результате которого из одной фазы (пересыщенный твердый раствор) образуются две фазы: твердый раствор, обедненный легирующими компонентами и выделения интерметаллидов, отличающиеся от твердого раствора по составу и кристаллической решетке, и отделенные от твердого раствора поверхностью раздела.

Сильная пересыщенность твердого раствора в закаленном сплаве обуславливает его термодинамическую нестабильность. Распад твердого раствора, приближающий фазовое состояние к равновесному, а следовательно, к уменьшению свободной энергии сплава, является самопроизвольно идущим процессом.

Во многих закаленных алюминиевых сплавах подготовительные стадии распада, а иногда и начало собственно распада проходят без специального нагрева, при вылеживании в естественных условиях в цехе, на складе или в другом помещении, в котором хранятся изделия, где температуры обычно находятся в пределах от 0 до 30 °С.

В некоторых алюминиевых сплавах (Al-Cu-Mn) подготовка к распаду и начальные стадии распада происходят лишь при нагреве закаленного сплава до температуры 100...200 °С. Смысл этого нагрева - термическая активация диффузионных процессов.

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*.

Нагрев закаленных алюминиевых сплавов до относительно невысоких температур (обычно в интервале 100...200 °С) и выдержку при этих температурах (в пределах от нескольких часов до нескольких десятков часов) называют *искусственным старением*.

Способность многих алюминиевых сплавов к старению при комнатной температуре обусловила возникновение применительно к алюминиевым сплавам термина "свежезакаленное состояние", т.е. состояние сплава непосредственно после закалки. Свойства алюминиевых сплавов в свежезакаленном состоянии могут значительно отличаться от их свойств спустя определенное время после закалки (в результате естественного старения). Естественное и низкотемпературное искусственное старение связано с тонкими изменениями структуры, которые не обнаруживаются в световом, а в ряде случаев и в электронном микроскопе. И только специальные методы рентгеноструктурного анализа позволили Гинье и независимо от него Престону описать механизм подготовительных стадий распада пересыщенного твердого раствора.

Холодная пластическая деформация закаленных алюминиевых сплавов, которая значительно увеличивает плотность вакансий и дислокаций в решетке, ускоряет распад твердого раствора при прочих равных условиях, поскольку выделение промежуточных фаз предпочтительнее на дефектах кристаллической решетки.

Изменения структуры алюминиевых сплавов при распаде пересыщенных твердых растворов влияют на свойства.

На рис.2, а схематично показана типичная закономерность изменения прочности закаленных алюминиевых сплавов в зависимости от температуры нагрева при последующей термообработке. Рост прочности связан с первыми стадиями процесса распада пересыщенных твердых растворов образованием зон ГП, с выделением промежуточных метастабильных  $\Theta''$ - $\Theta'$ -фаз (в сплавах Al-Cu). Последующие стадии - нарушение когерентности выделений метастабильных фаз, образование и коагуляция стабильных фаз – обуславливают снижение прочности.

Экспериментальные кривые изменения прочности дуралюмина в зависимости от температуры и продолжительности старения показаны на рис.2, б. Температуру старения алюминиевых сплавов выбирают экспериментально, она обычно соответствует либо образованию в пересыщенных твердых растворах зон ГП, либо выделению метастабильных когерентных фаз.

При выборе режима старения (температура и продолжительность), как правило, исходят из условия обеспечения максимальной прочности. Температура старения на максимальную прочность для различных алюминиевых сплавов колеблется от 20 °С (комнатная) до 200 °С. В последнее время, однако, нередки случаи, когда при выборе режима старения определяющими являются другие свойства (например, коррозионная стойкость) и при этом приходится мириться с некоторым снижением прочностных характеристик сплава.

Согласно ГОСТ 4784 – 97\* для сплава Д16 рекомендуется цифровое обозначение 1160: первая цифра 1 означает основу сплава - алюминий; вторая цифра 1 - добавка меди и магния; 6 - номер сплава. Последняя цифра 0 - обозначает деформируемый сплав. Химический состав сплава Д16 дан в табл. 7.

Таблица 7

**Химический состав сплава Д16, %**

Al	Cu	Mg	Mn	Примеси				
				Fe	Si	Zn	Ti	Ni
Основа	3,8-4,9	1,2-1,8	0,8-0,9	0,5	0,5	0,3	0,1	0,1

**Практическая часть**

1.Познакомиться с химическим составом, структурой, свойствами, термообработкой и применением сплава Д16.

2.Познакомиться с технологией и обосновать режимы термической обработки сплава Д16: температура, время выдержки, скорость охлаждения.

3. Измерить твердость HRB сплава Д16 в исходном состоянии.

4. Выполнить закалку с 500°C.

5. Измерить твердость по шкале HRB.

6. Выполнить искусственное старение при 150°C в течение 30 мин.

7. Измерить твердость образцов после искусственного старения.

8. Полученные данные свести в таблицу.

Таблица 8

**Результаты экспериментальных данных термической обработки сплава Д16**

№ п/	Исходная твердость, МПа	Твердость после закалки, МПа	Твердость после искусственного старения, МПа
1	19	38	

**Вывод:** изучили маркировку, применение и влияние термической обработки на структуру и свойства алюминиевых сплавов.

**Контрольные вопросы и задания**

- Охарактеризуйте алюминий и сплавы на его основе.
- Какие легирующие элементы входят в состав алюминиевых сплавов?
- Дайте характеристику сплаву AlSi10Mg.
- Отразите особенности сплава AlSi12-A.
- Какими свойствами обладает сплав AlSi7Mg0,6?
- Дайте характеристику сплаву AlSi9Cu3.
- Перечислите виды термообработки для алюминиевых сплавов.
- Какова цель проведения закалки для алюминиевых сплавов?
- Какие фазовые превращения протекают с алюминиевыми сплавами при старении?
- Для чего необходимо проведения отжигов для изделий из алюминиевых сплавов?
- Что такое возврат при старении?