

САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени академика С. П. КОРОЛЕВА

*А.А. Мельников  
Г.З. Бунова*

**ТЕХНОЛОГИЯ  
ТЕРМООБРАБОТКИ  
АЛЮМИНИЕВЫХ  
ПОЛУФАБРИКАТОВ**

САМАРА 1996

Государственный комитет Российской Федерации  
по высшему образованию

Самарский государственный аэрокосмический  
университет имени академика С.П.Королева

А.А.Мельников Г.З.Бунова

ТЕХНОЛОГИЯ ТЕРМООБРАБОТКИ  
АЛЮМИНИЕВЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ

Учебное пособие к курсовой работе

Самара 1996

УДК 669.017

Технология термообработки алюминиевых полуфабрикатов:  
Учеб. пособие к курсовой работе /А.А.М е л ь н и к о в,  
Г.Э.В у н о в а. Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Самара,  
1996. 87с.

JSBN 5-7883-0010-X

Излагается содержание, объем и последовательность раз-  
работки вопросов, рассматриваемых при выполнении курсовой  
работы по дисциплинам "Металлография" и "Термическая обработ-  
ка металлов и сплавов". Описывается фазовый состав и структу-  
ра сплавов, приводятся основные технологические схемы изготов-  
ления различных полуфабрикатов, их сортамент и свойства. Ана-  
лизируется изменение структуры алюминиевых полуфабрикатов в  
литом состоянии, а также после холодной и горячей пластиче-  
ской деформации. Главное внимание уделено разработке вопросов,  
связанных с выбором и обоснованием технологических режимов  
операций предварительной и окончательной термообработки, с вы-  
бором необходимого термического оборудования. Приводятся также  
основные виды брака при термообработке, его причины и виды ко-  
нтроля качества. Предназначено в качестве учебного пособия  
для студентов специальности II,08. Подготовлено на кафедре  
технологии металлов и авиаматериаловедения.

Табл.20. Ил.64. Библиогр.: 19 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета  
Самарского государственного аэрокосмического  
университета имени академика С.П.Королева

Рецензенты: Г.А.Д о т е л ь н и к о в, Г.В.Ч е р т к о в

JSBN 5-7883-0010-X



Самарский государственный  
аэрокосмический ун-т, 1996

## СО Д Е Р Ж А Н И Е

I. Классификация, фазовый состав и структура сплавов алюминия .....	5
I.1. Технологическая классификация и маркировка сплавов алюминия .....	5
I.2. Фазовый состав и структура сплавов .....	8
2. Технологические схемы изготовления полуфабрикатов различного вида .....	9
2.1. Технологическая схема изготовления листов .....	15
2.2. Технологическая схема изготовления прутков, профилей и труб прессованием .....	16
2.3. Технологическая схема изготовления полуфабрикатов типа прутков, труб и проволоки с использованием волочения .....	16
2.4. Технологическая схема изготовления полуфабрикатов штамповкой .....	19
3. Сортамент полуфабрикатов, получаемых из деформируемых алюминиевых сплавов .....	20
3.1. Листы, ленты, плиты, фольга .....	20
3.2. Профили, прутки .....	27
3.3. Трубы .....	29
3.4. Поковки, штамповки и полуфабрикаты, получаемые выдавливанием .....	31
4. Особенности строения алюминиевых сплавов в литом состоянии .....	34
5. Холодная и горячая обработка давлением алюминиевых сплавов .....	35
5.1. Влияние деформации на структуру полуфабрикатов...	36
5.2. Влияние деформаций на свойства полуфабрикатов ...	39
5.3. Выбор температурного интервала горячей деформации .....	40

6. Термическая обработка полуфабрикатов .....	55
6.1. Выбор операций термообработки в зависимости от технологической схемы изготовления полуфабрикатов .....	56
6.2. Фазовые превращения при термообработке алюминиевых сплавов .....	59
6.3. Изменение структуры при отжиге алюминиевых сплавов после холодной обработки .....	63
7. Оборудование и технология термической обработки алюминиевых сплавов .....	69
7.1. Классификация и конструктивные особенности печей для термообработки алюминиевых полуфабрикатов .....	69
7.2. Комплектование садки и технологические особенности проведения термообработки алюминиевых сплавов .....	71
7.3. Контроль качества термической обработки алюминиевых полуфабрикатов .....	81
8. Технологическая карта процесса термообработки .....	83
Список литературных источников .....	85

## I. КЛАССИФИКАЦИЯ, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И СТРУКТУРА СПЛАВОВ АЛЮМИНИЯ

### I.1. Технологическая классификация и маркировка сплавов алюминия

Алюминий и большинство его сплавов относятся к пластичным материалам, легко поддающимся всем видам обработки давлением. Из алюминиевых сплавов изготавливают практически все виды полуфабрикатов: листы, прутки, трубы, профили, поковки, проволоку и др. Однако одновременно с этим алюминиевые сплавы отличаются высокими литейными свойствами и широко используются в технике при изготовлении отливок различного назначения. В соответствии с этим все сплавы алюминия можно разделить на деформируемые, предназначенные для получения полуфабрикатов методами обработки металлов давлением, и литейные, предназначенные для фасонного литья.

Одновременно с этим по отношению к упрочняющей термообработке алюминиевые сплавы можно разделить на упрочняемые и неупрочняемые термообработкой. Термическое упрочнение алюминиевых сплавов может достигаться закалкой с последующим старением. Для сплавов неупрочняемых термообработкой повышение прочности может быть достигнуто за счет нагартовки.

Все применяемые в промышленности сплавы алюминия можно разделить на системы по наличию в них основных легирующих элементов, которые определяют типичные для данной системы свойства. При этом общность свойств определяется общностью фазового состава.

К числу основных легирующих элементов алюминия относятся: *Mn, Si, Mg, Cu, Zn*, причем магний, медь и цинк входят порознь или совместно в большинство промышленных сплавов. Кроме основных легирующих элементов в сплавы могут входить различные другие добавки, которые сообщают сплавам дополнительные свойства, но не изменяют их основной природы.

Классификация промышленных сплавов по основным легирующим элементам приведена в табл. 1, сравнение в маркировке в различных системах в табл. 2.

Химический состав промышленных алюминиевых сплавов приведен в ГОСТ 4784-74, ОСТ 90026-80, ОСТ 90048-77, а также в справочниках [1,2].

Т а б л и ц а 1

Классификация промышленных алюминиевых деформируемых сплавов по основным легирующим элементам

Группа	Система	Марка сплава	Способность к упрочнению термообработкой
1	<i>Al-Mn</i>	AMc	Термообработкой не упрочняется
2	<i>Al-Mg</i>	AMr1	"
		AMr2	"
		AMr3	"
		AMr5	"
		AMr6	"
3	<i>Al-Cu-Mn</i>	D20	Термообработкой упрочняется
		I20I	"
4	<i>Al-Cu-Mg</i>	DI	"
		DI6	"
		DI8	"
		DI9	"
		B65	"
		BDI7	"
		AK4-I	"
5	<i>Al-Mg-Si</i>	BAДI	"
		AB	"
		AD3I	"
		AD33	"
6	<i>Al-Cu-Mg-Si</i>	AK4	"
		AK6	"
		AK8	"
7	<i>Al-Zn-Mg</i>	I9I5	"
		I925	"
8	<i>Al-Zn-Mg-Cu</i>	B93	"
		B95	"
		B96ц	"
9	<i>Al-Mg-Li</i>	OI42O	"

Т а б л и ц а 2

Маркировка алюминия и алюминиевых сплавов  
в различных системах

Серия	Основные компоненты	Маркировка сплавов			
		ASTM ANSI	B-209 и H35288	DIN 1725	Россия
I	Al		I100	Al 99,0 Cu	А0
			I200	Al 99,0	А0
			I050	Al 99,5	А5
			I060	Al 99,6	А6
			I070	Al 99,7	А7
			I080	Al 99,8	А8
		2	Al Cu (Al Cu Mg)		2014
	2017			AlCuMg1	Д1
	2024			AlCuMg2	Д16
	2618				АК4-1
3	Al Mn (Al Mg, Al Mn Si)		3003	AlMnCu	АМц
			3004	AlMn1Mg1	Д12
			3005	AlMn1Mg0,5	ММ
			3105	AlMn0,5Mg0,5	ММ
5	Al Mg (Al Mg Mn)  Al Mg (Al Mg Mn)		5005A	AlMg1	АМг1
			5050B	AlMg1,5	АМг1
			5052	AlMg2,5	АМг2
			5252	AlMg2,5	АМг2
			5454	AlMg2,7Mn	АМг2, АМг3С*
			5754	AlMg3	АМг3
			5854	AlMg3	АМг3
			5013	AlMg3	АМг3
			5049	AlMg2Mn0,8	АМг2
			5086	AlMg4Mn	АМг4
			5182	AlMg5Mn	АМг4,5
			5082	AlMg4	АМг4
			5083	AlMg4,5Mn	АМг4,5
			5456	AlMg5	АМг5
			5056	AlMg5	АМг5



Серия	Основные компоненты	Маркировка сплавов			
		ASTM ANSI	B-209 и H35288	DIN 1725 Россия	
6	Al Mg Si (Al Si Mg)		6004	AlMgSi	АД31*
			6063	AlMgSi	АД31*
			6101B	AlMgSi0.5	АД31
			6061	AlMg1SiCu	АД33
			6262		
			6082	AlMgSi1	АД35
			6003		АД35*
			6066		АД35*
			6151		АВ
7	Al Zn		7019		І915
			7072	AlZn1	Ац*
			7075	AlMgCu1.5	В95

\* - имеются незначительные отличия по содержанию примесей.

## 1.2. Фазовый состав и структура сплавов

В равновесном состоянии алюминиевые сплавы представляют собой низколегированный твердый раствор с включениями интерметаллидных фаз. К числу основных интерметаллидных фаз относятся  $\text{CuAl}_2$  ( $\theta$ -фаза),  $\text{Mg}_2\text{Si}$ ,  $\text{Al}_2\text{CuMg}$  ( $S$ -фаза),  $\text{Al}_6\text{CuMg}_4$ ,  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  ( $B$ -фаза),  $\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3$  ( $T$ -фаза),  $\text{Al}_x\text{Mg}_y\text{Cu}_z\text{Si}_n$  ( $W$ -фаза).

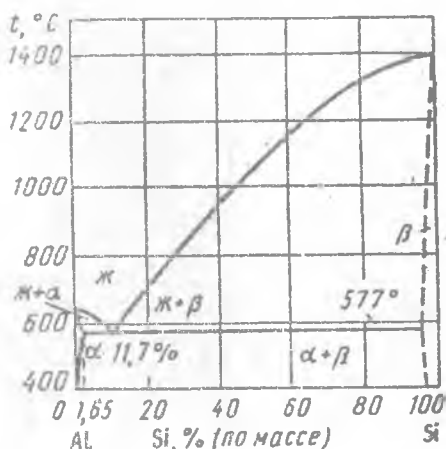
Свойства сплавов зависят от их фазового состава, который в свою очередь определяется диаграммой состояния. Основные диаграммы состояния промышленных алюминиевых сплавов приведены на рис. І-І4, а их описание в источниках [3-5].

К системе  $\text{Al-Cu-Mg-Si}$  относятся до 50% всех сплавов. Упрочняющий эффект в этих сплавах зависит от варианта термообработки и связанного с ним фазового состава. Суммарный эффект упрочнения после закалки и естественного старения в убывающем порядке определяется наличием фаз  $S$ - $\text{Al}_2\text{Cu}$ - $W$ - $\text{Mg}_2\text{Si}$ , а после закалки и искусственного старения соответственно  $W$ - $S$ - $\text{Al}_2\text{Cu}$ - $\text{Mg}_2\text{Si}$ . Фазы  $T$ ,  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  и  $\text{Si}$  можно считать не пающими эффекта упрочнения.

Основные упрочняющие фазы в системах  $Al-Cu$  и  $Al-Cu-Mg$  ( $S$ -фаза) и  $Al_2Cu$  ( $\theta$ -фаза). Неизбежная примесь кремния приводит к появлению менее эффективной упрочняющей фазы  $Mg_2Si$ .

В системе  $Al-Mg-Si$  упрочняющими являются  $Mg_2Si$  и чистый  $Si$ .

В системах  $Al-Zn-Mg$  и  $Al-Zn-Mg-Cu$  основными упрочняющими фазами являются  $MgZn_2$  ( $\eta$ -фаза) и  $Al_2Mg_3Zn_3$  ( $T$ -фаза), значительно меньшую роль играет соединение  $Al_2CuMg$  ( $S$ -фаза).

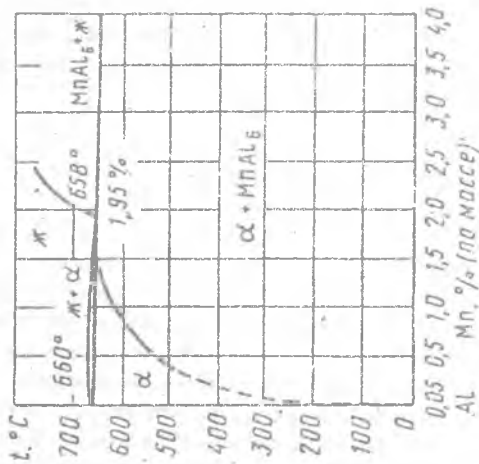


Р и с. I. Диаграмма состояния системы  $Al-Si$

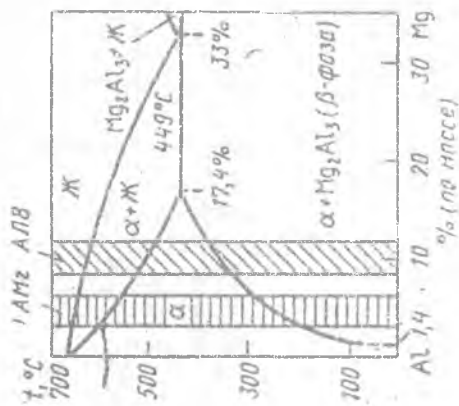
Структура алюминиевых сплавов представляет собой светлые зерна  $\alpha$ -твердого раствора с выделениями интерметаллидных фаз как в центре зерен, так и по их границам, причем иногда в виде эвтектики. Конфигурация и ориентировка зерен, а также размер выделений упрочняющих фаз зависят от технологии переработки того или иного вида полуфабриката и его термической обработки.

## 2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛУФАБРИКАТОВ РАЗЛИЧНОГО ВИДА

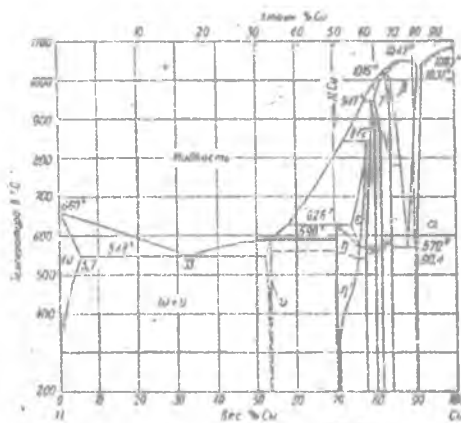
Конкретные деформированные полуфабрикаты (листы, штамповки, профили и т.д.), полученные из одного и того же сплава, после одинаковой термической обработки могут значительно различаться по механическим и другим свойствам. Эти особенности обусловлены теми различиями в структуре, которые зависят от технологии производства полуфабрикатов. Так, технология производства листов, например, в значительной степени отличается от технологии производства штамповок или профилей. Последовательность технологических операций, которым подвергается деформируемый металл, при переделе в конечный продукт называется технологической схемой производства.



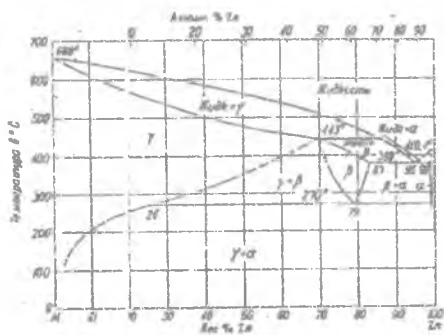
Р и с. 2. Диаграмма состояния системы  $Al-Mg$



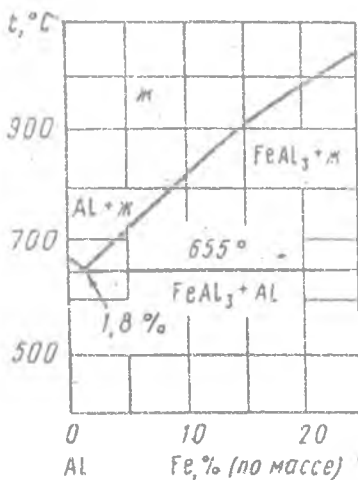
Р и с. 3. Диаграмма состояния системы  $Al-Mg$



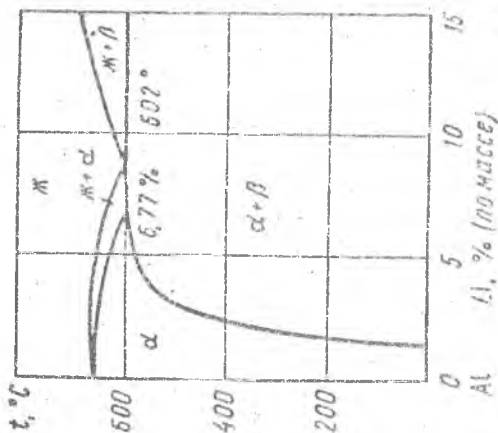
Р и с. 4. Диаграмма состояния системы  $Al-Cu$



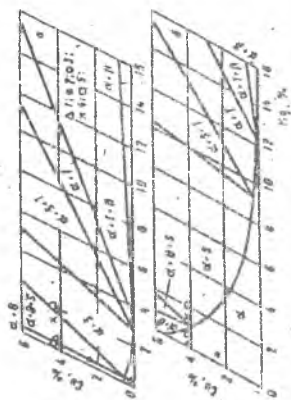
Р и с. 5. Диаграмма состояния системы  $Al-Zn$



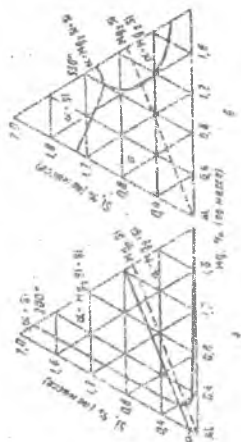
Р и с. 6. Диаграмма состояния системы  $Al-Fe$



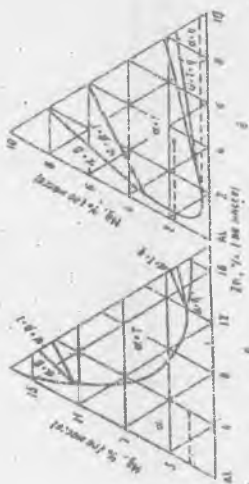
Р и с. 7. Диаграмма состояния системы  $Al-Li$



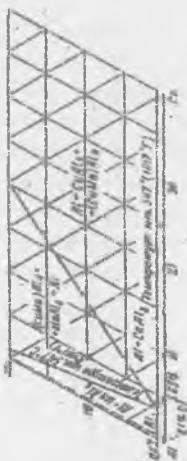
Р и с. 8. Диаграмма состояния системы  $Al-Cu-Mg$ : а - изотермическое сечение при 200°C; б - политермическая кривая максимальной растворимости компонентов в алюминии; 1 - 565; 2 -  $D16$ ; 3 -  $Al$ ; 4 -  $D16$ ; 5 -  $Al9$



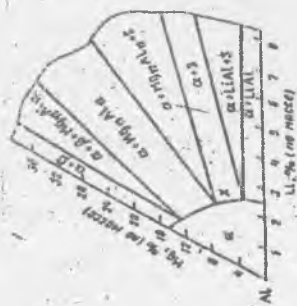
Р и с. 9. Диаграмма состояния системы  $Al-Cu-Mg$ : а - изотермическое сечение при 200°C; б - изотермическое сечение при 550°C



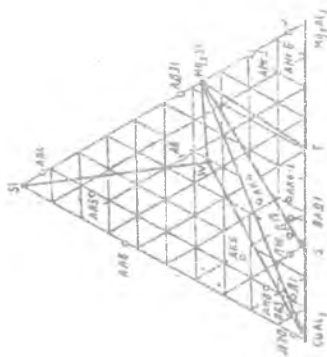
Р и с. 10. Диаграмма состояния системы  $Mg-Zn-Mn$ : а - изотермическое сечение при 400°С; б - изотермическое сечение при 200°С



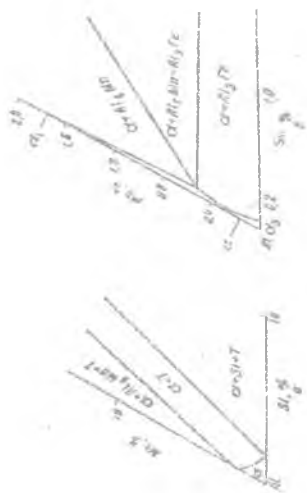
Р и с. 11. Диаграмма состояния системы  $Al-Mg-Si$



Р и с. 12. Диаграмма состояния системы  $Al-Mg-Li$ : изотермическое сечение при 430°С; X - сплав O1420



Р и с. 14. Треугольник соотношения концентраций и фазового состава системы  $AB-Cu-Ni-Si$



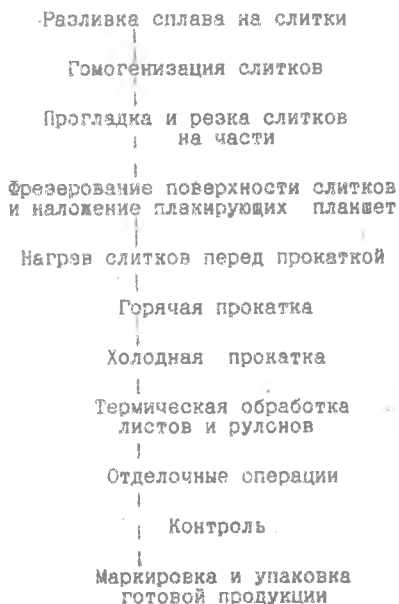
Р и с. 13. Диаграмма состояния системы  $AB-Ni-Si$ : а - после затвердевания; б - при температуре плавления тройной эвтектики

## 2.1. Технологическая схема изготовления листов

Прокаткой называют процесс пластической деформации металла, с помощью которого из слитка получают плиты, листы, ленту и т.п.

Технологическая схема прокатного производства включает в себя три стадии. Первая стадия - подготовка слитка к прокатке. В результате получают полупродукт, т.е. передельную заготовку (для листовой прокатки - сляб). На второй стадии из полученного полупродукта прокатывают продукцию заданной формы. На третьей стадии проводится отделка и контроль продукции.

Общая технологическая схема прокатки представлена на рис. 15.



Р и с. 15. Технологическая схема процесса прокатки

К подготовительным операциям перед горячей прокаткой относят прогладку и правку слитков, резку на заготовки с обрезкой концов, фрезерование поверхности, наложение лакирующих планшет при необходимости получения лакированных листов.



Подробно каждая операция технологической схемы рассмотрена в источниках [6, 7].

## 2.2. Технологическая схема изготовления прутков, профилей и труб прессованием

Процесс прессования используется при производстве полуфабрикатов (прутков, профилей, труб) значительной длины, которая существенно превышает размеры из поперечных сечений. Сущность процесса заключается в выдавливании металла из замкнутой полости (контейнера) через отверстие рабочего инструмента (матрицы).

Заготовкой в процессе прессования также является слиток, полученный способом полунепрерывного литья, причем для труб он должен быть полым. Прессование производится на вертикальных или чаще на горизонтальных гидравлических прессах с предварительным нагревом заготовки в печи.

Общая технологическая схема процесса прессования представлена на рис. 16. В зависимости от способа прессования, вида пресс-изделия и материала возможны видоизменения типовой схемы.

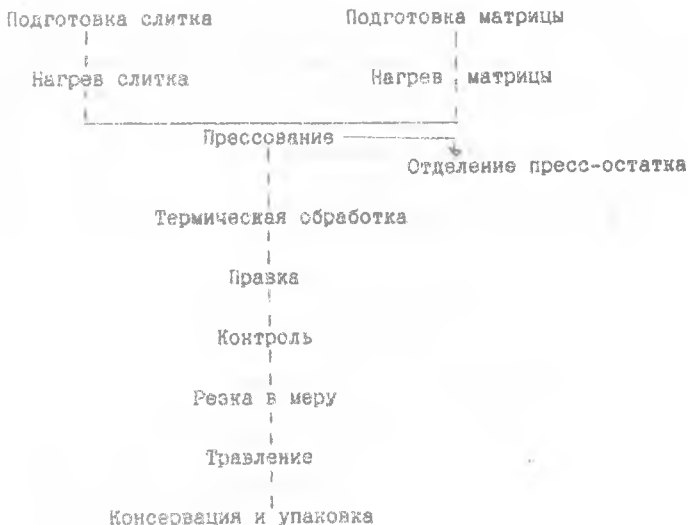
Подготовка слитков к прессованию включает в себя гомогенизацию и резку их на мерные заготовки.

Подробно технология прессования описана в источниках [5, 8, 9].

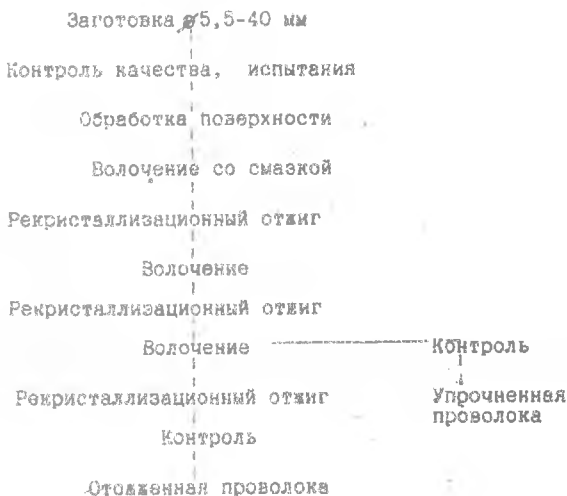
## 2.3. Технологическая схема изготовления полуфабрикатов типа прутков, труб и проволоки с использованием волочения

Волочение применяется при производстве проволоки, прутков, профилей и труб. Заготовку постоянного поперечного сечения протягивают через специальный инструмент (волоку), при этом происходит уменьшение поперечного сечения заготовки и увеличение ее длины.

Наиболее часто процесс волочения применяют для изготовления проволоки. По размерам проволоку, получаемую волочением, подразделяют на группы. Принято считать проволоку диаметром более 3 мм - толстой, 1-3 мм - средней, 0,05-1 мм - тонкой. Заготовкой при волочении служит пруток диаметром от 4,0 до 5,5 мм, полученный прессованием или прокаткой. Технологическая схема производства проволоки волочением приведена на рис. 17.



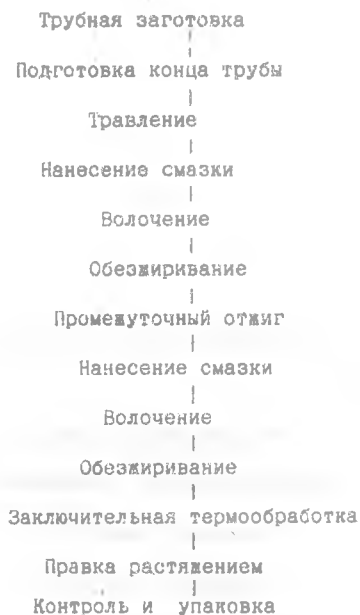
Р и с. 16. Типовая технологическая схема производства полуфабрикатов прессованием



Р и с. 17. Технологическая схема волочения проволоки

Волочение труб применяется при необходимости получения высокоточной продукции. В качестве заготовок применяют бесшовные трубы, полученные прессованием, а также сварные трубы. Перед волочением конец трубы длиной 100-200 мм обжимается, уменьшается в диаметре, чтобы его можно было провести через волоку. Волочение может осуществляться без оправки, а также с подвижной, неподвижной и плавающей оправкой, если необходимо уменьшить толщину стенки трубы.

Технологическая схема волочения труб представлена на рис. 18.



Р и с. 18. Технологическая схема волочения труб

Число требуемых операций волочения определяется суммарным обжатием и соответственно упрочнением металла при холодной деформации.

Подробно процесс волочения рассмотрен в источниках [8, 10].

## 2.4. Технологическая схема изготовления полуфабрикатов штамповкой

Штамповка - это ковка в штампах, форма которых приближается к форме готовой детали или точно ей соответствует. Преимущества штамповки: небольшое число обжатий, высокая производительность, малосотходность.

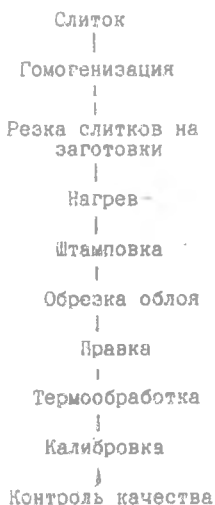
Различают штамповку в открытых и закрытых штампах. В открытом штампе избыток металла выдавливается наружу (в облой), поэтому заготовки можно нарезать с малой точностью на пресс-ножницах. При безоблойной закрытой штамповке весь металл расходуется на изделие, но при этом появляется необходимость в точной нарезке заготовки на пилах.

Заготовкой для штамповки алюминиевых деформируемых сплавов является обычно литой круглый слиток или промежуточная прессованная заготовка преимущественно круглого сечения. В некоторых случаях используют катанную заготовку либо фасонную заготовку, полученную профилированием в вальцах.

В любом случае для повышения технологической пластичности слитка перед резкой на заготовки его подвергают гомогенизирующему отжигу:

Типовая технологическая схема получения изделий штамповкой представлена на рис. 19.

Подробно технологические операции штамповки описаны в источниках [5, 7, II].



Р и с. 19. Технологическая схема штамповки

### 3. СОРТАМЕНТ ПОЛУФАБРИКАТОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ ИЗ ДЕФОРМИРУЕМЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Под полуфабрикатами из цветных сплавов понимают заготовки, полученные при деформации, имеющие заданное состояние и определенные размеры. К основным видам полуфабрикатов из деформируемых алюминиевых сплавов относятся листы, ленты, фольга, трубы, прутки, проволока, прессованные профили.

#### 3.1. Листы, ленты, плиты, фольга

Листы, плиты, ленты получают либо непосредственно после горячей прокатки (горячекатаные), либо после холодной прокатки (холоднокатаные), фольгу - после холодной прокатки. Листами называют катаные изделия толщиной от 0,3 до 10,5 мм; изделия толщиной более 10,5 мм называют плитами, а толщиной менее 0,2 мм - фольгой.

С целью повышения коррозионной стойкости катаные изделия из сплавов Д1, Д16, Д19, ВАД1, Д20, Д16ч, Д19ч, АК4-1 плакируют с обеих сторон алюминием марки АД1. Для плакировки изделий из сплавов В95, В95пч и других сплавов, содержащих цинк, используют алюминиевый сплав АМц. Применяют три вида плакировки листов: нормальную, утолщенную и технологическую. Листы и плиты из сплавов АМц, АМцС, АМг2, АМг3, АМг5, АВ не плакируют.

Горячая прокатка является основной операцией в технологическом цикле производства листового полуфабриката из алюминиевых сплавов. Горячей прокаткой изготавливают листы и плиты, сортамент которых представлен в табл. 3. Более подробно сортамент листов и плит представлен в ГОСТ 21631-76, ОСТ 190.0246-77, ОСТ 1 90070-72. Основная часть горячекатаной продукции толщиной 2,5-10 мм в виде рулонов поступает для дальнейшей холодной прокатки.

В табл. 4 и 5 приведены механические свойства образцов, вырезанных из горячекатаных листов и плит в направлении поперек прокатки.

Холодную прокатку применяют в тех случаях, когда невозможно методом горячей прокатки получить листы и ленты с заданными механическими свойствами и структурой и с высоким качеством поверхности.

Холодной прокаткой получают листы толщиной 0,5-4,5 мм, шириной 1000-2000 мм и длиной 2000-15000 мм. Механические свойства холоднокатаных листов из мягких и твердых алюминиевых сплавов приведены в табл. 6 и 7.

Т а б л и ц а 3

Сортамент листов и плит, получаемых горячей прокаткой

Марка сплава	Состояние листов	Толщина, мм	Длина (max), мм
АДОО, АДО, АД, АДІ, АВ, АМц, АМг2, АМг3, АМгб, АМгб, ДІ, Д2, ДІ9, Д20, В9Б, АК4-І	ГК (без ТО)	4-80	10000-30000
АДОС, АДО, АД, АДІ, АВ, АМц, АМг2, АМг3, АМгб, АМгб, ДІ, ДІ6, ДІ9, Д20, В9Б, АК4-І	М	4-10	7000
АДОО, АДО, АД, АДІ, АМц, АМг2, АМгб	Н	4-10	7000
АМц, АМГ2, АМГ3	Н2	4-10	7000
АВ, ДІ, ДІ6, В9Б, В92, АК4-І	Т	4-10 11-80	7000 10000-30000
ДІ6	ТН	5-10	7000

П р и м е ч а н и е. Ширина листов 1200-2000 мм.

Т а б л и ц а 4

Механические свойства листов и плит, получаемых горячей прокаткой из мягких алюминиевых сплавов

Марка сплава	Состояние	Толщина, мм	$\sigma_b$ , МПа не менее	$\delta$ , %
Алюминий всех марок	М	5-10	60	28
	Н	5-10	130	5
	ГК	5-10,5	70	15
		11-25	80	18
		26-80	165	15
АМц	М	5-10	90-150	20
	Н2	5-10	150	6
	Н	5-10	190	4

Марка сплава	Состояние	Толщина, мм	$\sigma_B$ , МПа не менее	$\delta$ , %	
АМц	ГК	5-10	100	10	
		11-25	120	15	
		26-80	110	12	
АВ	М	<5	<150	20	
		5,1-10	<150	15	
	Т	<5	100	18	
		5,1-10	180	16	
	Т1	<5	100	10	
		5,1-10	100	8	
АМГ	ГК	1-25	180/300	14/7	
		26-40	170/290	12/6	
		41-80	170/280	10/6	
	М	5-10	170/240	18	
		Н2	5-10	240	6
		Н	5-10	170	4
	ГК	5-10	80	7	
		11-25	80	7	
		26-80	60	6	

Примечание. В числителе приведены свойства листов и плит, термообработанных после горячей прокатки по режиму Т а в знаменателе - по режиму Т1.

Таблица 5

Механические свойства листов и плит, получаемых горячей прокаткой из твердых алюминиевых сплавов

Марка сплава	Состояние	Толщина, мм	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
АМГЗ	М	5-10	190	80	15
		Н2	5-10	220	180
	ГК	5-6	190	80	12
		6,1-10,5	190	80	15
		11-25	180	70	12
		26-50	170	60	11

Марка сплава	Состояние	Толщина, мм	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
АМг6	М ГК	5-10	280	130	15
		5-6	280	130	12
		6,1-10,5	280	130	15
		11-25	270	120	13
		26-50	260	110	12
АМг6	М Н ГК	5-10	320	160	15
		5-10	380	280	6
		5-10,5	320	160	15
		11-25	310	150	11
		26-50	300	140	6
		51-80	280	130	4
Д1А	М Т ГК	5-10	240	—	12
		5-10	380	200	15
		5-10,5	360	190	12
		11-25	380	220	11
		26-40	340	200	8
Д16А	М Т ТН ГК	5-10	240	—	10
		5-6	435	280	11
		6,1-10	435	280	10
		5-7,5	465	350	8
		5-10,5	420	260	10
		11-25	430	280	7
		26-40	400	260	5
41-70	380	250	4		
71-80	350	250	3		
Д16	М Т ТН	5-10	240	—	10
		5-6	450	290	11
		6,1-10	450	290	10
		5-7,5	485	365	8
Д19А	М Т	5-10	240	—	10
		5-6	415	270	11



Марка сплава	Состояние	Толщина, мм	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
Д19А	ГК	6, I-10	415	270	10
		5-10,5	410	250	10
		II-25	430	280	7
		26-40	400	260	5
		4I-70	380	250	4
		7I-80	350	250	3
Д20А	М	5-10	240	—	15
	Т	5-10	280	—	12
	TI	5-10	380	280	8
	ГК	5-10,5	280/370	-/250	12
		II-25	280/380	-/280	12/
		26-80	280/380	-/ 280	12/
В95А	М	5-10	250	—	10
	TI	5-10,5	500	420	6
	ГК	5-10,5	500	420	6
		II-25	500	420	4
		26-40	500	420	3
	TI	5-6	530	460	6
		6, I-10	530	460	5
	АК4-IA	М	5-10	250	—
TI		4-10	395	320	6
		II-80	400	330	6

П р и м е ч а н и е. Для сплавов АМг3, АМг5, АМг6 приведены максимальные механические свойства, а для всех остальных - минимальные:

механические свойства указаны для листов и плит, термообработанных после горячей прокатки по режиму Т;

в числителе приведены свойства листов и плит, термообработанных после горячей прокатки по режиму Т, а в знаменателе - по режиму TI.

Фольгу из алюминия и его сплавов изготавливают только в рулонах. Граница по толщине между фольгой и лентой весьма условна. Сортамент выпускаемой продукции определяется ГОСТ 618-73, ГОСТ 745-79, ГОСТ 25505-83, специальными техническими условиями.

Промышленная фольга выпускается толщиной от 0,2 до 230 мк и шириной до 1550 мм и имеет блестящую поверхность либо с двух сторон, либо с одной стороны (ГОСТ 21631-76).

Т а б л и ц а 6  
Механические свойства холоднокатанных листов  
из мягких алюминиевых сплавов

Марка сплава	Состояние	Толщина, мм	$\sigma_s$ , МПа не менее	$\delta, \%$
АДО, АДО	М	0,5	60	20
АД, АД1		0,6-0,9	60	25
А5		1,0-4,5	60	28
А6	Н	0,5-0,8	150	3,0
		0,8-4,0	150	4,0
		4,1-4,5	130	5,0
АМЦ	М	0,5-0,7	90-150	18
		0,8-3,0	90-150*	22
		3,1-4,5	90-150	20
	Н2	0,5-3,5	150	5
		3,6-4,5	150	6
	Н	0,5	190	1
		0,6-0,8	190	2
		0,9-1,2	190	3
		1,3-4,5	190	4
		0,5-1,0	170-240	16
АМг2	М	1,1-4,5	170-240	18
		0,5-1,0	240	4
	Н2	1,1-4,5	240	6
		0,8-1,0	270	3
АВ	М	1,1-4,5	270	4
		0,5-4	<150	20
	Т	0,5-4,5	200	18
		Т1, Т2, Т3	0,5-4,5	300

Механические свойства холоднокатанных листов  
из твердых алюминиевых сплавов

Марка	Состояние	Толщина, мм	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа не менее	$\delta$ , %
AMг3	M	0,5-4,5	200	100	15
	H2	0,5-4,5	240	200	7
AMг5	M	0,5-4,5	280	150	15
AMг6	M	0,5-4,5	320	160	15
	H	1,5-4,5	380	280	6
Д1	M	0,5-1,9	<230	—	12
		2,0-4,5	<240	—	12
	T	0,5-1,9	370	190	15
		2,0-4,5	280	200	15
Д16Б	M	0,5-4,5	240	—	10
		T	0,5-1,5	450	395
	TH	1,6-4,5	450	395	11
		3,1-7,5	485	365	10
Д16А	M	0,5-1,9	<230	—	10
		2,0-4,5	<240	—	10
	T	0,5-1,5	415	275	13
		2,0-4,5	435	280	11
	TH	1,5-1,9	435	340	10
		2,0-4,5	465	350	8
Д16У	M	0,5-1,9	<230	—	10
		2,0-4,0	<240	—	10
	T	0,5-1,9	370	235	13
		2,0-4,0	415	275	13
Д19А	M	0,5-1,9	<230	—	10
		2,0-4,5	<240	—	10
	T	0,5-1,9	400	255	13
		2,0-4,5	415	270	11
Д19У	M	0,5-1,9	<230	—	10
		2,0-4,0	<240	—	10
	T	0,5-1,9	360	225	13
		2,0-4,0	400	255	13

Марка сплава	Состояние	Толщина, мм	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа не менее	$\delta$ , %
Д20А	М	0,5-4,5	<240	—	15
	Т	0,5-4,5	280	—	12
	Т1, Т2, Т3	0,5-4,5	380	280	8
В95А	М	0,5-4,5	<250	—	10
	Т1, Т2, Т3	0,5-1,9	490	410	7
		2,0-4,5	500	420	7
АК4-1	Т1, Т2, Т3	1,2-4,5	530	460	6
	М	0,5-4,5	<250	—	12
	Т1, Т2, Т3	0,5-4,5	395	320	6

### 3.2. Профили, прутки

Прессованные полуфабрикаты производятся из различных сортов технического алюминия, а также из сплавов упрочняемых и неупрочняемых термообработкой (ГОСТ 4784-74).

В настоящее время сортамент прессованных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов насчитывает более 20000 наименований. Все изделия можно подразделить на две основные группы: профили и прутки.

Сортамент прессованных профилей насчитывает более 8000 типоразмеров. Основными техническими условиями на поставку профилей являются ГОСТ 8617-81 и ОСТ 1-90113-74, а прутков - ГОСТ 21488-76, согласно которым пресс-изделия могут быть изготовлены закаленными и естественно состаренными (Т), закаленными и искусственно состаренными (Т1), не полностью закаленными и искусственно состаренными (Т5), отожженными (М) и без термообработки.

Применительно к профилям всех состояний поставки имеет место небольшая холодная деформация (1-3%), которая возникает при операции правки профилей растяжением для придания им необходимой прямолинейности.

По геометрическим признакам профили подразделяются на следующие группы:

- а) сплошные постоянного сечения;
- б) полые постоянного сечения;

в) периодического сечения (с законцовкой);

г) панели.

Согласно техническим условиям и ГОСТу прутки выпускаются круглого, квадратного и шестиугольного сечения. Диаметр их колеблется от 5 до 400 мм. При этом диаметр прутков, поставленных в состоянии Т и Т1 не превышает 120 мм.

Калиброванные прутки из алюминия и его сплавов выпускают диаметром от 8 до 50 мм по ОСТ № I-92016-72. Прутки диаметром от 5 до 12 мм выпускают размерами каждые 0,5 мм, диаметром от 12 до 30 мм - через каждый 1 мм, диаметром от 30 до 50 мм - через каждые 2 мм.

Сортамент прутков и допуски при различных классах точности приведены в табл. 8.

Т а б л и ц а 8

Размеры круглых, квадратных и шестигранных прутков  
в зависимости от классов точности

Номинальные размеры диаметра вписанной окружности, мм	Допустимые отклонения по размеру, мм, при классе точности прутков			
	3	3а	4	5
5-6	-0,025	-0,048	-0,08	-0,16
6,5-10	-0,03	-0,058	-0,10	-0,20
10,5-18	-0,035	-0,07	-0,12	-0,20
19-30	-0,045	-0,084	-0,14	-0,28
32-50	-0,05	-0,10	-0,17	-0,34

В табл. 9 и 10 представлены характеристики профилей и панелей, выпускаемых отечественной промышленностью.

Т а б л и ц а 9

Характеристика профилей, выпускаемых  
отечественной промышленностью

Параметры	Тип профиля			
	сплошного постоянного сечения	полый, прес-суемый в комб. матрицу	полый, прес-суемый по трубному методу	периодического сечения с законцовкой
Площадь поперечного сечения, мм	30-50000	30-20000	до 600	100-6500

Параметры	Тип профиля			
	сплошного постоянного сечения	полый, прессуемый в комб. матрицу	полый, прессованный по трубному методу	периодического сечения с законцовкой
Диаметр описанной окружности, мм	до 600	до 300	20-550	до 25000
Длина, мм	>15	>15	до 15	до 15
Масса 1 шт., кг	>1500	>600	>800	>15

Примечание. Площадь поперечного сечения основной профильной части с законцовкой.

Таблица 10  
Размеры панелей, выпускаемых промышленностью

Панели, прессуемые в плоском варианте		Панели, изготовленные по трубному методу	
Ширина, мм	минимальная толщина полки, мм	ширина, мм	минимальная толщина, мм
350-520	3,5-4,0	от 750 до 960	3
520-780	4,0-5,0	1500-1650	5-5,5
780-1000	6,0-10,0		

### 3.3. Трубы

Трубы изготавливаются из алюминиевых сплавов, упрочняемых и неупрочняемых термосработкой. Сортамент труб очень разнообразен. Отечественная промышленность выпускает около 1200 видов труб, и более 2000 типоразмеров труб поставляется по ведомственным и специальным техническим условиям.

Механические свойства, точность размеров, состояние поверхности труб зависит от способа их производства. Трубы изготавливаются прессованием, прокаткой, волочением, сваркой. Отечественная промышленность выпускает трубы круглого, квадратного, прямоугольного, восьмиугольного и овального сечений.

прессованные трубы могут быть либо готовым полуфабрикатом, либо служить заготовкой для дальнейшего пластического деформирования: прессования, прокатки, волочения. Сортамент и геометрические размеры прессованных труб определяются ГОСТ 18482-79, согласно которому диаметр изменяется от 18 до 300 мм, а толщина стенки от 1,5 до 40 мм. По специальным техническим условиям выпускают трубы как больших, так и меньших размеров. Местная кривизна труб на 1 м длины не должна превышать 3 мм для труб диаметром до 125 мм и 5 мм для труб диаметром более 125 мм. Прессованные трубы дешевле волочильных, но имеют меньшую точность размеров.

Волочением, согласно ГОСТ 18475-82, ОСТ 1-90038-71, из алюминиевых сплавов изготавливают трубы диаметром от 6 до 120 мм, причем диаметр от 6 до 12 мм через каждый 1 мм, от 12 до 60 мм через каждые 2 мм, от 60 до 120 мм через каждые 5 мм. Толщина стенок труб составляет от 0,5 до 5 мм. Допуски на диаметр и толщину труб приведены в табл. II.

Т а б л и ц а II

Размеры труб, выпускаемых промышленностью

Наружный диаметр, мм	Допускаемое отклонение, мм	Толщина стенки, мм	Допускаемое отклонение, мм
6-20	-0,15	0,5	0,05
		0,75	0,08
22-30	-0,20	1,0	0,10
		1,5	0,14
32-50	-0,25	2,0	0,18
		2,5	0,20
52-80	-0,30	3,0	0,25
		3,5	0,25
85-120	-0,50	4,0	0,28
		5,0	0,40

Овальность труб должна укладываться в допуск на диаметр, а разностенность - в допуски на толщину стенки. Максимальная длина труб 6500 мм. Трубы, отличающиеся размерами от указанных, изготавливаются по СТУ.

Трубы из сплавов АД1, АД, АМц диаметром 8-25 мм могут поставляться в бухтах длиной до 100 м.

Сварные трубы производятся из рулонного листа методом сварки. Допуски на размеры этих труб приближаются к допускам на волочильные тру-

бы. В целях повышения точности размеров сварные трубы можно подвергать волочению после сварки.

Для изделий ширпотреба выпускают прямошовные трубы диаметром 10-220 мм и толщиной стенки 0,5-3,0 мм, изготовленные из сплавов АМг2, АМг3, АМг5, АК6, Д1 и Д16 методом радиочастотной сварки. Гарантируемые свойства сварных труб из термически упрочняемых сплавов Д1 и Д16 в закаленном состоянии из 20-40 МПа ниже, чем у тянутых. Сварные трубы из Д1 и Д16 поставляются с наружной и внутренней лакировкой.

Для различных отраслей промышленности по специальным ТУ и СТУ изготавливаются фасонные трубы различной конфигурации постоянного и переменного сечения с наружным и внутренним утолщениями по концам и в средней части. Разработаны методы получения труб из биметаллов.

#### 3.4. Поковки, штамповки и полуфабрикаты, получаемые штамповкой выдавливанием

Поковки и штамповки из алюминиевых сплавов производятся на обычных молотах, гидравлических и механических прессах, кольцепрокатных станах и горизонтально-ковочных прессах.

Штамповки в зависимости от объема последующей механической обработки делятся на три группы:

- а) грубые штамповки;
- б) обычные штамповки;
- в) точные штамповки.

Штамповки из алюминиевых сплавов достигают площади  $3,9 \text{ м}^2$ , массы 1,5 т и длины 6,5 м.

Поковки бывают массой 15-16 т, толщиной 170 мм, шириной примерно 3000 мм и длиной 11500 мм.

Раскатные кольца, получаемые на точных кольцепрокатных станах имеют большой разбег по диаметру до 3800 мм при любой толщине. Большие кольца могут быть также изготовлены ковкой на оправке.

Полуфабрикаты, получаемые штамповкой выдавливанием, классифицируют в зависимости от течения металла относительно хода пуансона.

Размеры выпускаемых промышленностью штамповок (табл. 12, 13) и гарантируемые в них свойства указаны в ОСТ1 90073-71, ОСТ1 90073-72.



Т а б л и ц а 12

Масса штамповок, выпускаемых промышленностью

Сплав и состояние	Масса, кг
Д1, закаленное и естественно состаренное	до 700
Д20, Д21, закаленное и искусственно состаренное	до 100
В95, закаленное и искусственно состаренное	до 30 30-1000
В93, закаленное и искусственно состаренное	до 2500
В96, закаленное и искусственно состаренное	до 50
АВ, закаленное искусственно состаренное	до 2500
АМг, АМг3, АМг5, отожженное	до 3000
АМг6, отожженное	до 30 30-60 60-2500
АК2, закаленное и искусственно состаренное	до 1500
АК4, АК4-1, закаленное и искусственно состаренное	до 700
АК6, закаленное и искусственно состаренное	до 1500
АК6, закаленное и естественно состаренное	до 200
АК8, закаленное и искусственно состаренное	до 300 300-2000
АК6-1, закаленное и искусственно состаренное	до 1500
АК8, закаленное и естественно состаренное	до 750 750-2000

Т а б л и ц а 13

Размеры штамповок, выпускаемых промышленностью

Наименование	Типовые детали	Размеры
Арматурные детали с отрезком	Крестовины, переходники, угольники, штуцера и т.д.	Длина до 300 мм, ширина до 300 мм, высота до 80 мм
Рёбристые детали с преимущественным расположением металла вдоль одной оси	Балки центропланов, переключатели, траверсы, опорные стойки, лонжероны, нервюры и т.д.	Длина до 8000 мм, ширина до 800 мм, высота до 200 мм

Наименование	Типовые детали	Размеры
Детали типа лопастей и лопаток с плавным переходом от одного сечения к другому по всему периметру	Лопасты самолетов, крупные лопатки двигателей и т.д.	Длина до 4800 мм, ширина до 800мм
Детали типа панелей	Панели, плоские детали вафельного типа с односторонним и двусторонним оребрением, закрывки и т.д.	Длина до 2500мм, ширина до 1500 мм
Ребристые детали с произвольным наружным контуром в плане с центральным открытым или закрытым отверстием	Подmotorные рамы, полурамы, дуги, детали коробчатого типа с двусторонним оребрением или высоким односторонним оребрением	Длина до 2000мм, ширина до 1500 мм, высота до 300 мм
Пустотелые детали, симметричные вдоль продольной оси, круглого или квадратного сечения, имеющие иногда в плане небольшие остrostки	Цилиндры, крупные стаканы с небольшими бобышками, пустотелые валы, ступки, поршни, кольца, полукольца и т.д.	Цилиндры: диаметр до 250 мм, высота до 2500 мм, толщина стенки 10-140 мм. Валы: диаметр фланца до 500мм, длина до 2000мм. Кольца: диаметр до 4200 мм, высота до 300 мм, толщина до 50мм
Детали типа дисков	Диски, диски с цапфами, диски типа чашек, крыльчатки, фланцевые крышки и т.д.	Наружный диаметр до 1100 мм, высота в ступице до 400 мм

Наименование	Типовые детали	Размеры
Детали произвольной формы в плане с направленным контуром, глубокими впадинами, высокими ребрами	Корпуса вентиляторов, опоры шасси, улитки, крестовины, картеры и т.д.	Условный диаметр до 1500 мм, высота (толщина) до 350 мм
Детали цилиндрической или другой формы с компактным размещением масс	Пустотелые вали двигателей	Длина до 1000 мм

#### 4. ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В ЛИТОМ СОСТОЯНИИ

В слитках, слыващих обычно исходной заготовкой для производства деформированных полуфабрикатов, часто встречаются характерные для литого материала дефекты: разнотекстурность; ликвационная неоднородность; осадочная и газовая пористость; окисные и шлаковые включения.

Качество алюминиевых полуфабрикатов во многом зависит от исходной структуры слитка, которая определяется формой и размером зерна. Зерно в слитке представляет собой дендрит, строение и размер которого определяются условиями кристаллизации. Между ветвями дендритов располагаются выделения интерметаллидных фаз, которые могут быть мелкими или крупными в зависимости от толщины ветвей. Чем тоньше ветви, тем мельче интерметаллиды. Размер зерна в слитке зависит от многих факторов. Чем больше температура перегрева расплава при литье и чем выше его чистота, тем крупнее зерно. Измельчению зерна способствует понижение температуры расплава и введение в сплав добавок тугоплавких металлов, образующих мелкокристаллические выделения. Влияние структуры слитка на свойства деформированных полуфабрикатов объясняется тем, что выделившиеся при кристаллизации интерметаллидные соединения при деформации дробятся, но их конечный размер, влияющий на механические свойства, зависит от размера этих соединений в литой структуре.

Реальные условия кристаллизации слитков в производстве ведут к образованию неравновесной литой структуры. Ее особенности заключаются в следующем:

1) легирующие элементы и примеси неравномерно распределены по объему дендритной структуры, периферийные зоны обогащены элементами, понижающими температуру плавления алюминия ( $Cu, Zn, Mg, Si, Mn$ ) и обеднены элементами, повышающими его точку плавления ( $Cr, Zr, Ti$ );

2) в литом металле могут присутствовать фазы, которых не должно быть при неравновесной кристаллизации, например фазы, входящие в состав неравновесной эвтектики;

3) фазы, образующиеся в результате эвтектической реакции, располагаются по границам дендритов, а взаимодействующие с алюминием по перитектической реакции - в центре зерна.

Химический состав литого металла также неодинаков как по сечению слитка, так и в пределах одного зерна. Это явление называется зональной и дендритной ликвацией и также является результатом неравновесной кристаллизации. На поверхности слитка обычно образуется тонкий слой с очень высоким содержанием легирующих элементов - результат обратной зональной ликвации, который устраняется фрезеровкой поверхности слитка. Междендритная (дендритная) ликвация может быть устранена гомогенизационным отжигом.

Усадочная и газовая пористость в незначительных размерах могут завариваться при горячей пластической деформации, однако крупные пузыри, а также окисные и шлаковые включения часто являются причиной внутренних расслоений в готовых полуфабрикатах. Размеры их могут изменяться от долей миллиметра до нескольких сантиметров и являются неисправимым браком.

## 5. ХОЛОДНАЯ И ГОРЯЧАЯ ОБРАБОТКА ДАВЛЕНИЕМ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

При производстве полуфабрикатов широко используются различные способы горячей и холодной обработки давлением.

Горячая деформация используется для изготовления различных деталей ковкой или штамповкой. Горячим прессованием изготавливают прутки, профили, панели, толстостенные трубы. При производстве листов горячая деформация предшествует холодной. Это обусловлено тем, что при высоких температурах возможно достижение больших степеней обжатия или использование высоких скоростей деформации.

Холодная деформация позволяет получать изделия с лучшим качеством поверхности, меньшими размерными допусками и более высокими механическими свойствами.

## 5.1. Влияние деформации на структуру полуфабрикатов

Исходной заготовкой для получения полуфабрикатов часто является слиток. Структура слитка оказывает большое влияние на структуру полуфабриката. Но чем выше температура и степень деформации, тем это влияние проявляется слабее. Дефекты, характерные для литого состояния частично сохраняются, а частично устраняются в полуфабрикатах. При пластической деформации, особенно горячей, завариваются усадочные поры и рыхлоты, а также части газовых пор. Часть же газовых пор сохраняется.

Сохраняются также шлаковые включения и окисные пленки. Пористость и окисные пленки могут являться причиной возникновения расслоений в металле при его деформации. Это один из наиболее распространенных дефектов в полуфабрикатах из алюминиевых сплавов. Чаще всего расслоения встречаются в ковках, штамповках, плитах. Повышение степени деформации при обработке давлением в большинстве случаев (за исключением прессования) способствует развитию деформационных расслоений. Повышение же равномерности деформаций и уменьшение его скорости уменьшают вероятность образования расслоений. Рекомендуется также понижать температуру деформации. На пластичность металла при горячей и холодной деформациях большое влияние оказывает ликвация и тип зеренной структуры в слитке. Их необходимо учитывать при выборе режимов пластической деформации. Укрупнение зерна в слитке уменьшает способность выдерживать высокие степени деформации при ковке и прокатке. Особенно сильно влияет на поведение слитка наличие в сплаве веерной структуры. Слитки из высоколегированных сплавов с наличием веерной структуры практически невозможно отковать. Они разрушаются, причем местам возникновения трещин являются плоскости двойникования веерных кристаллов. Конечные свойства полуфабрикатов существенно зависят от величин зерна в слитке, особенно тогда, когда в полуфабрикate деформируется нерекристаллизованная структура. В этом случае для получения полуфабрикатов необходимо использовать слитки с мелкозернистой равноосной структурой. При пластической деформации, особенно горячей, уменьшается дендритная ликвация (ее устраняют в основном гомогенизацией). Зональная же ликвация ни гомогенизацией, ни пластической деформацией не устраняется. Однако она может оказывать большое влияние на пластичность сплавов, что необходимо учитывать при выборе режимов пластической деформации.

В результате холодной и горячей деформаций исходная микроструктура слитков изменяется и деформированные полуфабрикаты приобретают сле-

дующие отличительные особенности микроструктуры.

Зерна (дендриты), присутствующие в слитке, в результате пластической деформации изменяют свою форму, вытягиваются в направлении главной деформации растяжения. В зависимости от степени деформации и вида напряженного состояния зерна могут приобретать различную форму. В прессованных полуфабрикатах и в проволоке они имеют форму волокон, в прокатанных листах - пластин и чешуек, а в штамповках форма зерен может быть более сложной. Однако микроструктура деформированного полуфабриката определяется не только вытягиванием зерен, но и образованием новых элементов микроструктуры деформационного происхождения, т.е. созданием новых границ зерен. Новые границы образуются в тех случаях, когда затруднительно преобразование начальной формы зерна в конечную. Например, при деформировании литых зерен или при продольной осадке прессованной заготовки. Форма зерна определяется локальной схемой деформации и может изменяться по сечению полуфабриката. Так, в центре круглого прутка волокна имеют круглое сечение, а вблизи периферии - вытянутое по окружности.

Температура деформации влияет на микроструктуру следующим образом. При понижении температуры возрастает вероятность дробления зерен новыми высокоугловыми границами, а при повышении - вероятность миграции исходных границ. Оба процесса уменьшают соответствие между начальной и конечной структурой.

Интерметаллидные включения, входящие в состав сплава, при пластической деформации выстраиваются в виде строчек в направлении главной деформации. Так как эти включения обладают высокой твердостью и низкой пластичностью, то они не претерпевают заметной пластической деформации, ни при холодной, ни при горячей обработке давлением. При холодной обработке давлением в крупных интерметаллидах могут появиться трещины и они дробятся на более мелкие.

Под влиянием пластической деформации беспорядочно ориентированные вначале зерна приобретают преимущественно кристаллографическую ориентировку; которая называется текстурой. Как при высоких, так и при низких температурах элементарным механизмом деформации алюминия и его сплавов является сдвиг по плоскости  $\{111\}$  в направлении  $\langle 110 \rangle$ . Начинается скольжение в наиболее благоприятно ориентированные по отношению к внешней силе зерна, а затем, по мере роста напряжения, распространяется на все остальные зерна. Сдвиговая деформация сопровождается закономерным поворотом кристаллической решетки зерен относительно внешних сил. Кроме того

го, каждое зерно испытывает воздействие соседних зерен, составляющих его изменять свою форму в соответствии со схемой деформации всего изделия и его части. В результате согласованных поворотов, при степени деформации 30-50%, зерна приобретают конечные ориентировки, которые при дальнейшей деформации не изменяются или изменяются слабо. Практически, однако, никогда не удается добиться того, чтобы все зерна в результате деформации оказались строго ориентированы в том направлении, к которому они стремились при поворотах. Всегда наблюдается та или иная степень отклонения ориентировки отдельных субзерен или зерен от идеальной, т. е. рассеяние текстуры. В сильно деформированных металлах возникает наиболее отчетливая текстура деформации, рассеяние которой может составлять несколько (5-10) градусов. Совершенство структуры зависит не только от степени деформации, но и от температуры. С увеличением температуры деформации степень совершенства текстуры возрастает.

Различают два главных вида текстуры: аксиальную и текстуру прокатки. Аксиальная текстура проявляется в том, что все зерна ориентируются определенным кристаллографическим направлением  $\langle xyz \rangle$  вдоль направления главной деформации, но вокруг направления  $\langle xz \rangle$  зерна занимают произвольное положение. Для характеристики аксиальной текстуры указывают индексы направлений, совпадающих с осями главной деформации. В прессованных прутках из алюминиевых сплавов обычно наблюдается аксиальная текстура (111) и (100). Текстуре прокатки отвечают одна или несколько предпочтительных ориентировок зерен, фиксированных относительно всех осей деформации. Для описания текстуры прокатки указывают индексы плоскости, совпадающей с плоскостью прокатки, и направления, совпадающего с направлением прокатки, для всех преимущественных ориентировок. Для алюминия и алюминиевых сплавов характерна текстура прокатки (110) и  $\langle 112 \rangle$ . Это означает, что кристаллографические плоскости (110) большинства зерен параллельны плоскости листа, а направление  $\langle 112 \rangle$  параллельно направлению прокатки.

В отожженном алюминии и его сплавах плотность дислокаций составляет  $10^5 - 10^7 \text{ см}^{-2}$  (это сумма длины дислокаций в единице объема). Пластическая деформация начинает осуществляться за счет имеющихся в металле дислокаций. Однако наряду с движением имеющихся дислокаций происходит непрерывное генерирование новых. Одновременно происходит торможение и закрепление ряда дислокаций при пластической деформации. Эти процессы приводят к росту плотности дислокаций. После холодной деформации она может увеличиться на несколько порядков и достигнуть значения  $10^{10} - 10^{11} \text{ см}^{-2}$ .

После холодной деформации, если степень деформации мала, дислокации распределяются в объеме металла равномерно. При степенях деформации более 10% начинает образовываться ячеистая структура. Границы ячеек, образованные сплетением дислокаций, тем толще, чем выше степень деформации. Внутри ячеек плотность дислокаций невелика. Ячейки разориентированы на углы порядка 1°С. Упрочняющая фаза, присутствующая в сплавах, оказывает существенное влияние на формирование ячеистой структуры. Крупные включения упрочняющих фаз способствуют неравномерному распределению дислокаций даже при больших степенях деформации. Дисперсные (мелкие) включения, наоборот, способствуют равномерному распределению дислокаций и тормозят образование ячеистой структуры.

При горячей деформации дислокации обладают большей подвижностью, чем при холодной. И они стремятся перераспределиться так, чтобы величина упругих искажений кристаллической решетки при данной плотности дислокаций была минимальной. Такому состоянию соответствует расположение дислокаций в виде стенок и сеток, т.е. при горячей деформации происходит полигонизация. Размер образующихся субзерен (полигонов) составляет 1-5 мкм, а углы их ориентации могут изменяться от десятков минут до нескольких градусов. В чистом алюминии внутри субзерен дислокации обычно отсутствуют. Структура алюминиевых сплавов после горячей деформации отличается от структуры чистого алюминия тем, что границы субзерен криволинейны из-за наличия включений упрочняющих фаз. А внутренние объемы субзерен содержат некоторое количество дислокаций, закрепленных на интерметаллидных частицах.

Из-за процесса полигонизации плотность дислокаций после горячей деформации ниже, чем после холодной и составляет  $10^9 - 10^{10} \text{ см}^{-2}$ .

## 5.2. Влияние деформации на свойства полуфабрикатов

Обработка давлением алюминиевых сплавов вызывает изменение механических, физических и химических свойств, что является следствием тех структурных превращений, которые описаны выше. При холодной пластической деформации прочностные свойства возрастают, т.е. повышаются предел прочности, предел текучести и твердость. При этом относительное удлинение и относительное сужение уменьшаются. Упрочнение зависит в первую очередь от температуры, степени деформации и химического состава сплава. Кроме того, большую роль играет структурное состояние перед деформацией, способ деформирования. Связь между напряжением и деформацией в



в условиях чисто холодной деформации можно приближенно описать эмпирической формулой

$$\sigma_T = C \epsilon^M, \quad (1)$$

где  $\sigma_T$  - истинное напряжение;  $C$  - напряжение, отвечающее деформации, равной единице;  $\epsilon$  - истинная или логарифмическая деформация;  $M$  - показатель степени деформационного упрочнения.

С достаточной точностью можно утверждать, что все сплавы в области деформаций, применяемые при наклепе, подчиняются уравнению (1). Термически неупрочняемые сплавы в холодно- и горячедеформированном состоянии имеют значительно более низкие скорости деформационного упрочнения, чем отожженные материалы. Уравнение (1) для предварительного нагартованного материала с деформацией  $\epsilon_0$  принимает вид

$$\sigma_T = C (\epsilon_0 + \epsilon)^M. \quad (2)$$

Подобная зависимость имеет место для горячедеформированного материала. Характеристики наклепа существенно меняются с температурой. Упрочнение уменьшается по мере повышения температуры и практически отсутствует при температуре 370°C. При горячей деформации упрочнение ограничивается начальной стадией. По мере роста напряжений в металле развиваются и усиливаются процессы разупрочнения, аналогичные тем, которые происходят при отлиге. Но в отличие от процессов, протекающих при отлиге, они называются динамическими (динамический возврат, динамическая рекристаллизация). При степенях деформации более 50% упрочнение прекращается и окончательная структура зависит только от температуры деформации и скорости деформации.

На рис. 20-30 показано влияние степени холодной деформации на механические свойства алюминиевых сплавов [17-19].

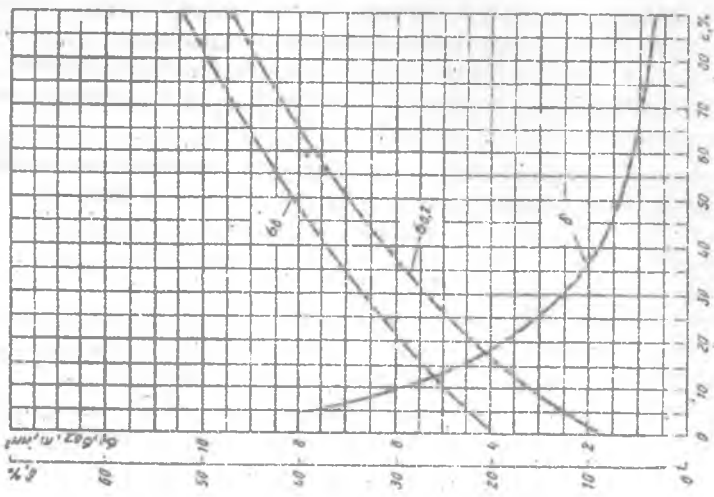
### 5.3. Выбор температурного интервала горячей деформации

Общепринято считать горячей деформацию, проходящую при температуре выше температуры рекристаллизации. Однако для многих сплавов, в том числе и алюминиевых, горячая деформация может осуществляться при температурах ниже порога рекристаллизации. Ее роль как процесса разупрочнения могут выполнять процессы возврата и, в частности, про-

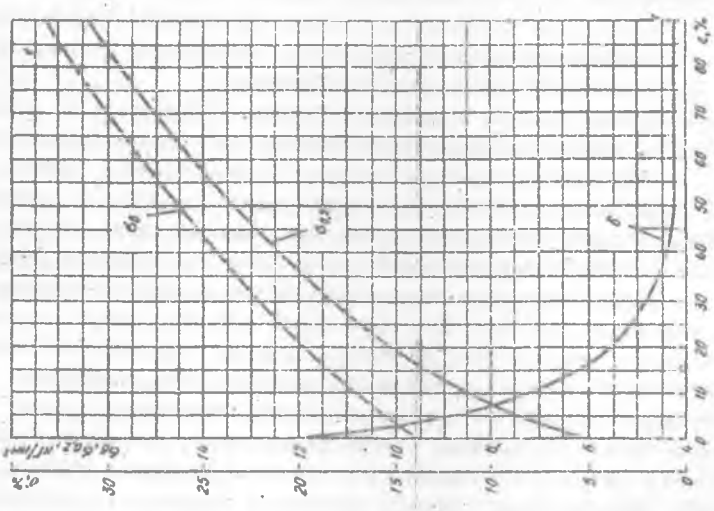
цесс полигонизации. Восстановительные процессы, идущие во время деформации, имеют свои особенности, поэтому их называют "динамический возврат" и "динамическая рекристаллизация" в отличие от статических, которые идут при отжиге после холодной деформации.

Температурный интервал горячей деформации определяют по диаграммам состояния. Обычно верхняя граница нагрева под горячую деформацию лежит на 20-50°C ниже температуры солидуса. Нижняя граница горячей деформации определяется при помощи диаграмм рекристаллизации и пластичности. Таким образом определяется температурный интервал максимальной пластичности сплава, обеспечивающий минимальное сопротивление деформации. По диаграммам рекристаллизации учитывается и величина критической степени деформации (12-15%), которой следует избегать, чтобы не допустить чрезмерного роста зерна. Допустимую степень деформации за основной ход машины определяют по диаграммам пластичности. При увеличении скорости деформации технологическая пластичность алюминиевых сплавов, за исключением высоколегированных, почти не снижается, поэтому их обрабатывают ковкой и штамповкой практически при любых скоростях деформации. Но соблюдение температурных условий деформации приводит к появлению дефектов и браку. Недогрев заготовки или окончание деформации при слишком низкой температуре ведет к появлению наклепа в результате замедления рекристаллизации, что может вызвать появление трещин и разрушение материала. Перегрев металла выше верхней границы температурного интервала деформации может привести к неустраняемому дефекту - перелому. Иногда перегрев может быть результатом теплового эффекта деформации, который нужно обязательно учитывать при назначении температурного интервала.

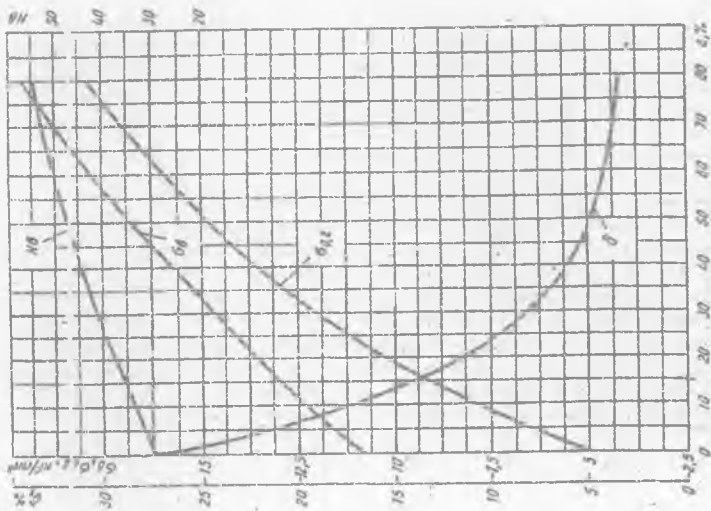
Диаграммы деформирования и рекомендуемые температуры горячей деформации основных сплавов приведены на рис. 31-47 и в табл. 14.



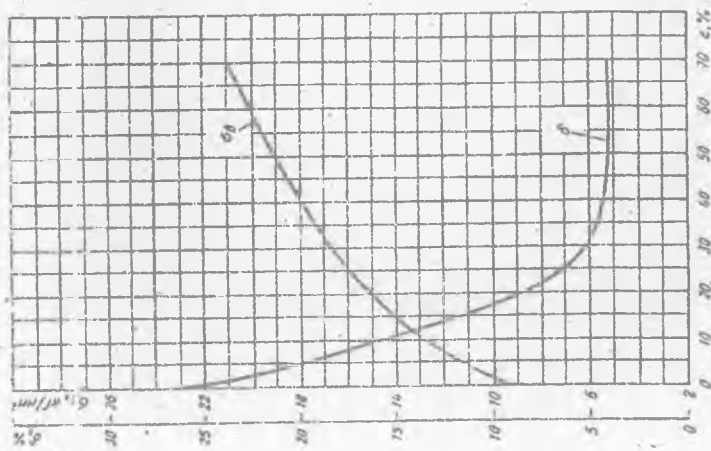
Р и с. 20. Влияние степени деформации на механические свойства сплава А00



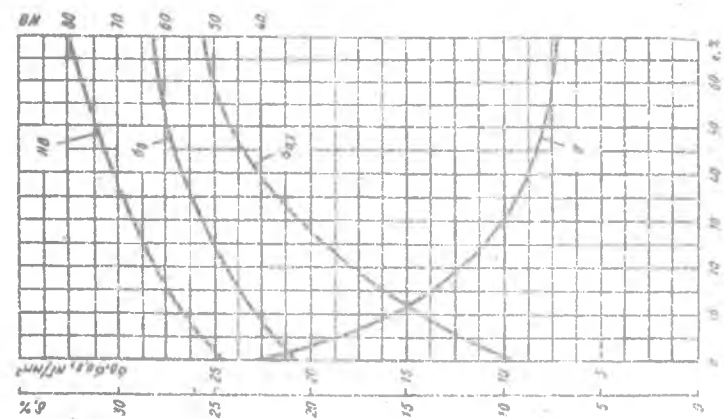
Р и с. 21. Влияние степени деформации на механические свойства сплава А1



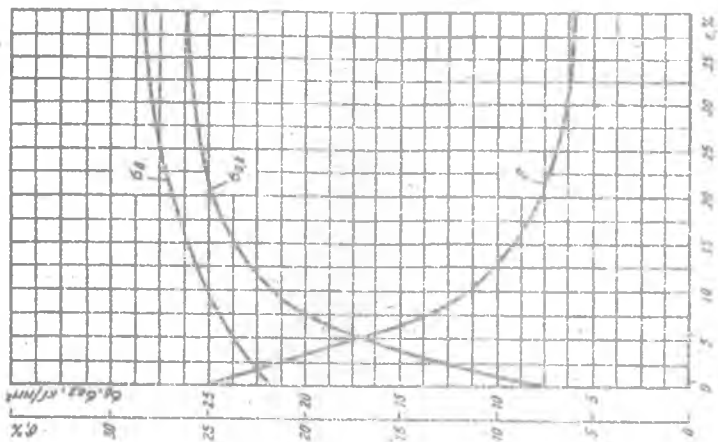
Р и с. 23. Влияние степени деформации на механические свойства сплава АМс



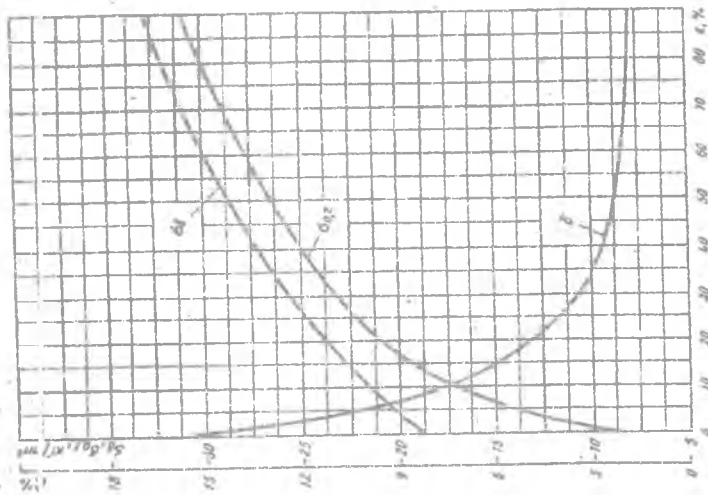
Р и с. 22. Влияние степени деформации на механические свойства сплава А2



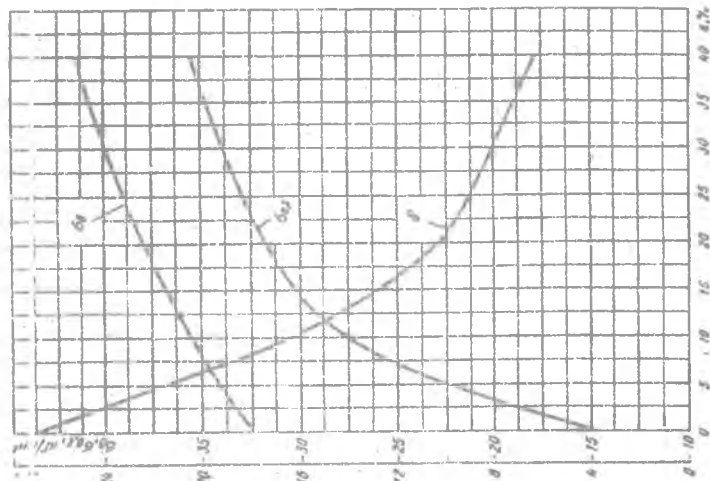
Р и с. 24. Влияние степени деформации на механические свойства сплава АМГ1



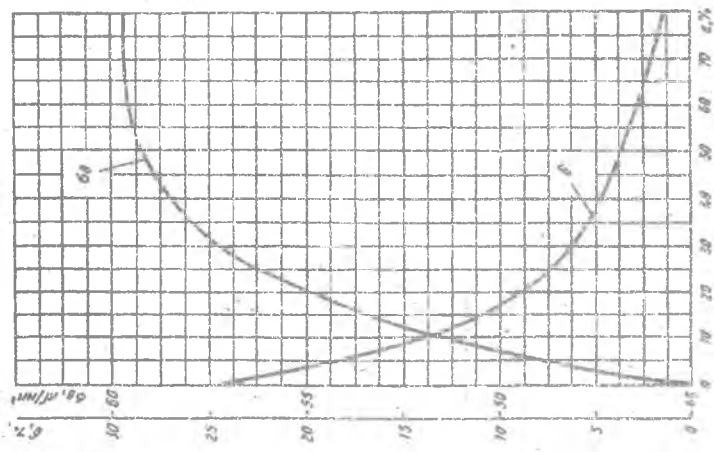
Р и с. 25. Влияние степени деформации на механические свойства сплава АМГ3



Р и с. 27. Влияние степени деформации на механические свойства сплава Д1



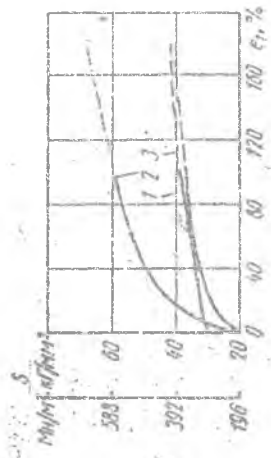
Р и с. 26. Влияние степени деформации на механические свойства сплава AI7BP



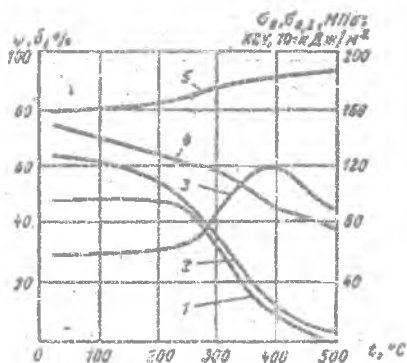
Р и с. 28. Влияние степени деформации на механические свойства сплава Al6



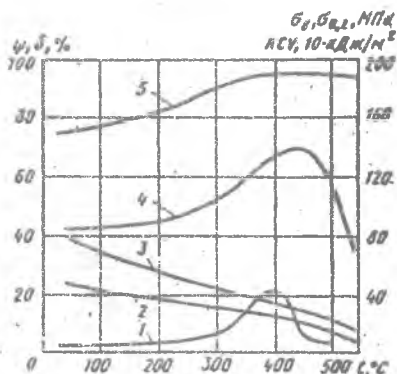
Р и с. 29. Влияние степени деформации на механические свойства сплава Al31.



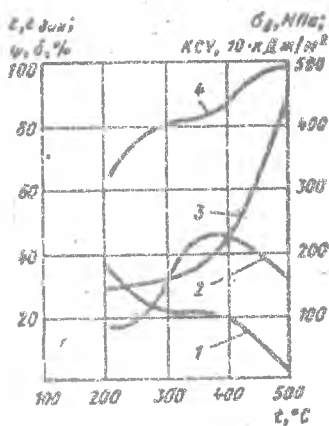
Р и с. 30. Влияние степени деформации на механические свойства сплава Al6b



Р и с. 31. Диаграмма деформирования сплава АД1 в литом гомогенизированном состоянии: 1 -  $\sigma_{0.2}$ ; 2 -  $\sigma_s$ ; 3 -  $\sigma_b$ ; 4 - KCV; 5 -  $\psi$

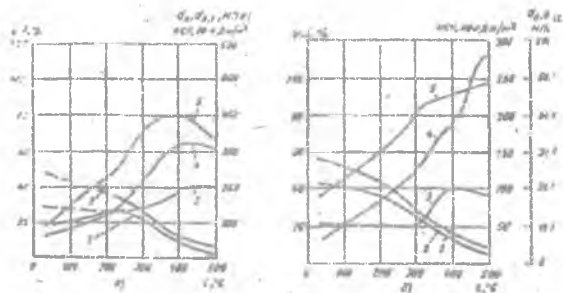


Р и с. 32. Диаграмма деформирования сплава АМс в литом гомогенизированном состоянии: 1 - KCV; 2 -  $\sigma_{0.2}$ ; 3 -  $\sigma_b$ ; 4 -  $\delta$ ; 5 -  $\psi$

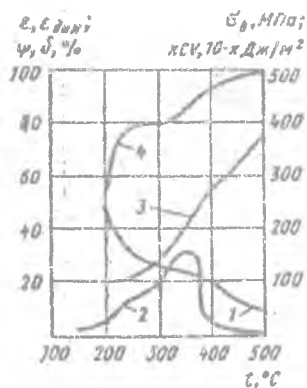


Р и с. 33. Диаграмма деформирования сплава АМГ2 в литом гомогенизированном состоянии: 1 -  $\sigma_b$ ; 2 - KCV; 3 -  $\delta$ ; 4 -  $\psi$

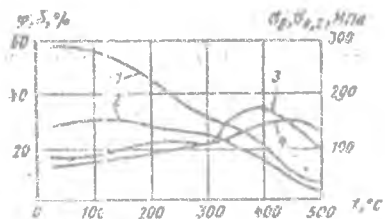




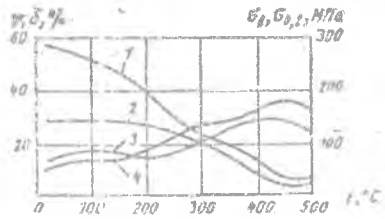
Р и с. 34. Диаграмма деформирования сплава Аур3 в литом (а), деформированном (б) состояниях: 1 -  $\psi$ ; 2 -  $\sigma_B$ ; 3 - KCV; 4 -  $\delta$



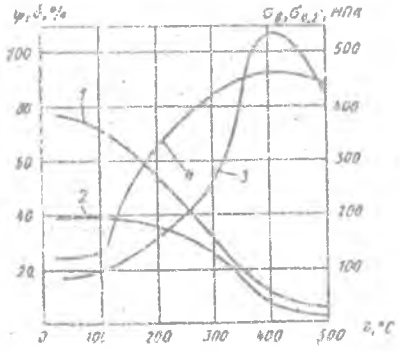
Р и с. 35. Диаграмма деформирования сплава В93 в деформированном состоянии: 1 -  $\psi$ ; 2 - KCV; 3 -  $\delta$ ; 4 -  $\sigma_B$



а)

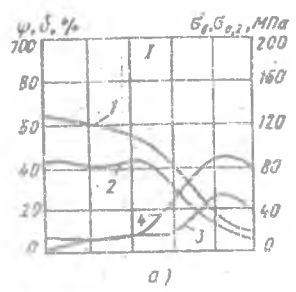


б)

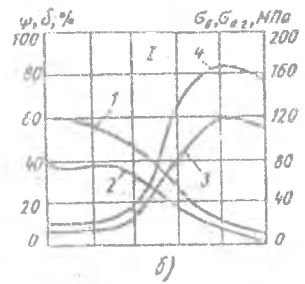


в)

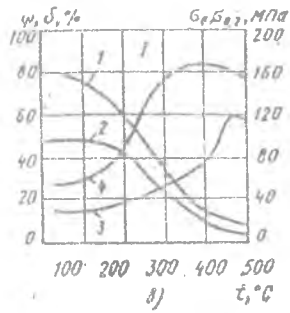
Р и с. 36. Диаграмма деформирования сплава АМг6 в литом негомогенизированном (а), литом гомогенизированном (б) и деформированном (в) состояниях: 1 -  $\sigma_{с2}$ ; 2 -  $\sigma_{в}$ ; 3 -  $\sigma$ ; 4 -  $\psi$



а)

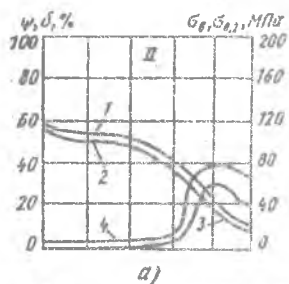


б)

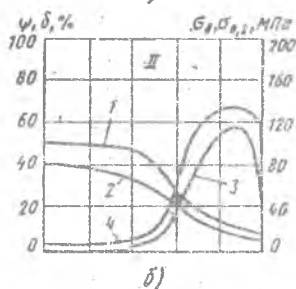


в)

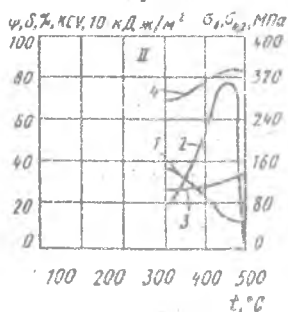
Р и с. 37. Диаграмма деформирования сплава Д1 в литом негомогенизированном (а), литом гомогенизированном (б) и деформированном (в) состояниях: 1 -  $\sigma_{с2}$ ; 2 -  $\sigma_{с2}$ ; 3 -  $\sigma$ ; 4 -  $\psi$ ; 5 - КСЧ



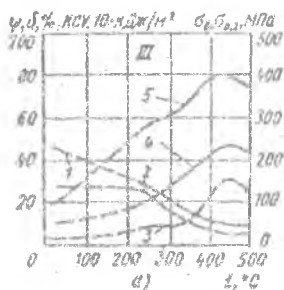
а)



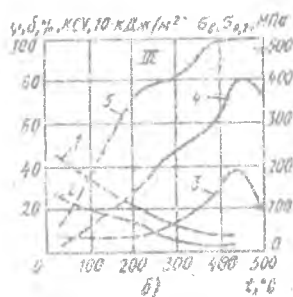
б)



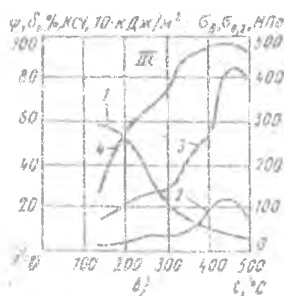
Р и с. 38. Диаграмма деформирования сплава Д16 в литом негомогенизированном (а), литом гомогенизированном (б) и деформированном (в) состояниях: 1 -  $\sigma_B$ ; 2 -  $\sigma_{0.2}$ ; 3 -  $\delta$ ; 4 -  $\psi$ ; 5 - КСВ



а)

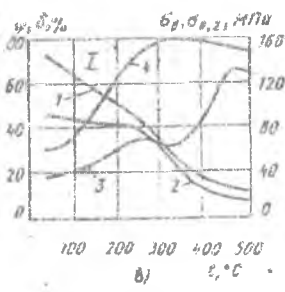
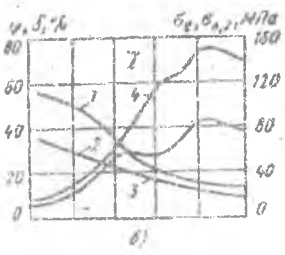
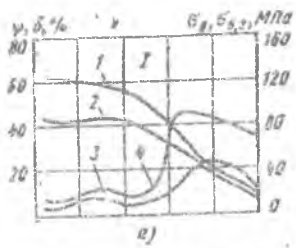


б)

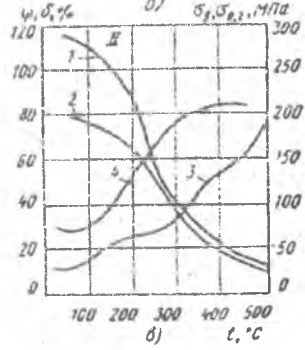
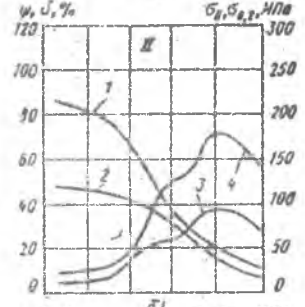
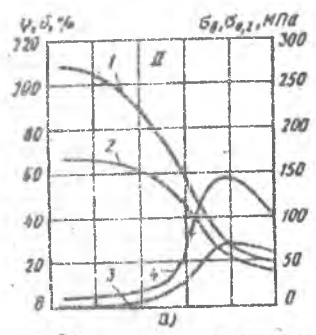


в)

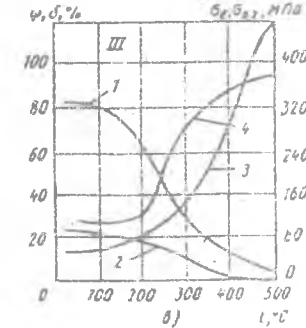
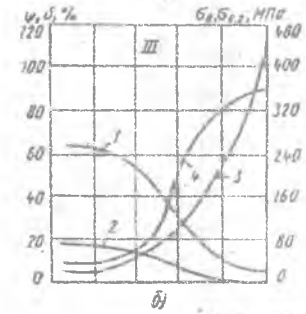
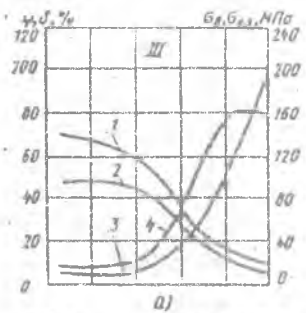
Р и с. 39. Диаграмма деформирования сплава Д20 в литом негомогенизированном (а), литом гомогенизированном (б) и деформированном (в) состояниях: 1 -  $\sigma_B$ ; 2 -  $\sigma_{0.2}$ ; 3 -  $\delta$ ; 4 -  $\psi$ ; 5 - КСВ



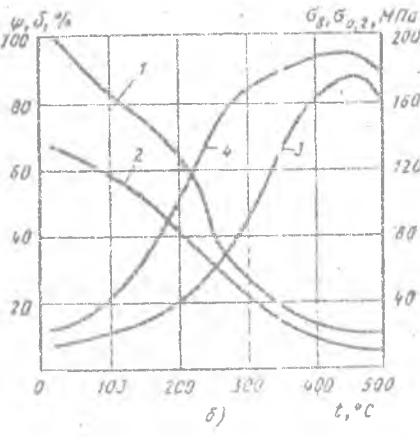
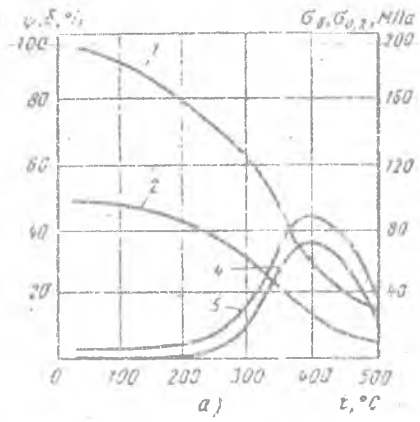
Р и с. 40. Диаграмма деформирования сплава АВ в литом негомогенизированном (а), литом гомогенизированном (б) и деформированном (в) состояниях: 1 -  $\sigma_a$ ; 2 -  $\sigma_{a2}$ ; 3 -  $\delta$ ; 4 -  $\psi$



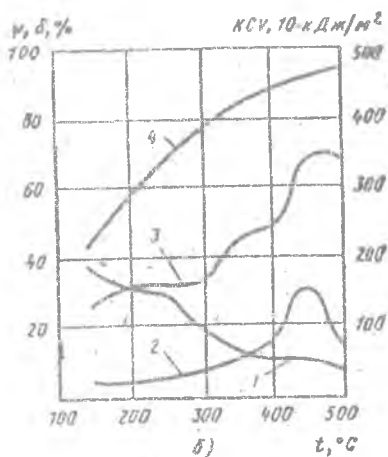
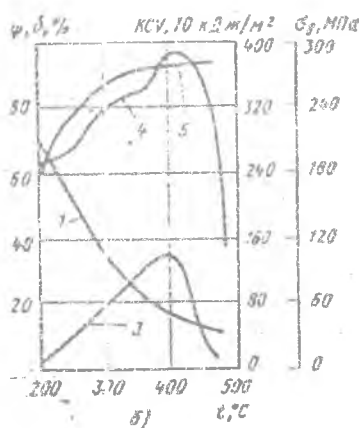
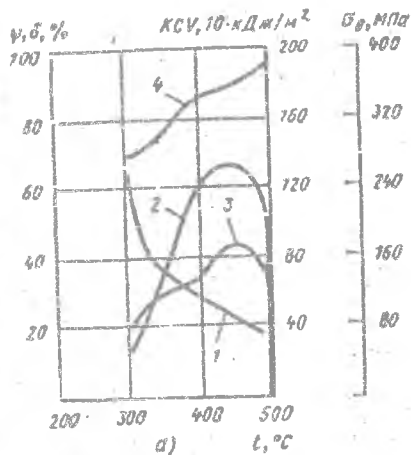
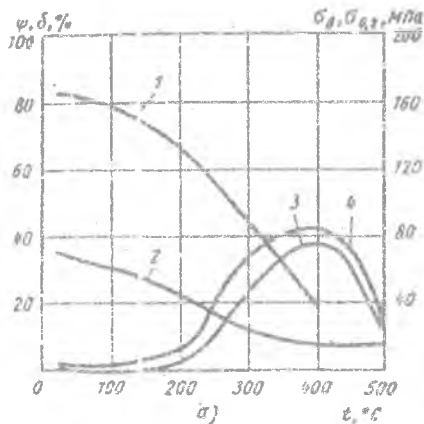
Р и с. 41. Диаграмма деформирования сплава АКВ в литом негомогенизированном (а), литом гомогенизированном (б) и деформированном (в) состояниях: 1 -  $\sigma_a$ ; 2 -  $\sigma_{a2}$ ; 3 -  $\delta$ ; 4 -  $\psi$



Р и с. 42. Диаграмма деформирования сплава АК4-1 в литом неомогенизированном (а), литом омогенизированном (б) и деформированном (в) состояниях: 1 -  $\sigma_B$ ; 2 -  $\sigma_{0.2}$ ; 3 -  $\delta$ ; 4 -  $\psi$

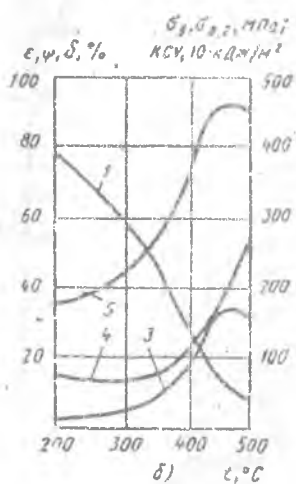
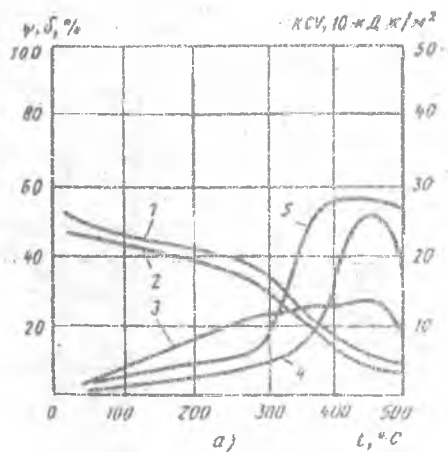


Р и с. 43. Диаграмма деформирования сплава В95 в литом омогенизированном (а) и деформированном (б) состояниях: 1 -  $\sigma_B$ ; 2 -  $\sigma_{0.2}$ ; 3 -  $\delta$ ; 4 -  $\psi$

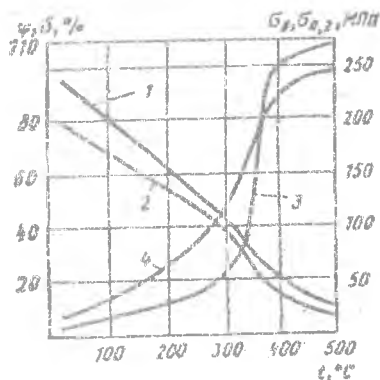


Р и с. 44. Диаграмма деформирования сплава В96 в литом неомогенизированном (а) и деформированном (б) состояниях: 1 -  $\sigma_B$ ; 2 -  $\sigma_{02}$ ; 3 - KCV; 4 -  $\delta$ ; 5 -  $\psi$

Р и с. 45. Диаграммы деформирования сплавов ВД19 (а) и Д19 (б) в деформированном состоянии: 1 -  $\sigma_B$ ; 2 - KCV; 3 -  $\delta$ ; 4 -  $\psi$



Р и с. 46. Диаграмма деформирования сплава Д21 в литом, гомогенизированном (а) и деформированном (б) состояниях: 1 -  $\sigma_{0.2}$ ; 2 -  $\sigma_{0.02}$ ; 3 - КСВ; 4 -  $\delta$ ; 5 -  $\psi$



Р и с. 47. Диаграмма деформирования сплава АК4 в литом гомогенизированном состоянии: 1 -  $\sigma_{0.2}$ ; 2 -  $\sigma_{0.2}$ ; 3 -  $\delta$ ; 4 -  $\psi$

Т а б л и ц а 14

Температурные интервалы горячей прокатки алюминиевых сплавов

Марка сплава	Температура металла, °C		
	перед прокаткой	перед непрерывной пятиклетевой группой	после прокатки
А1	>480	450-470	350-360
АМг2, АВ	450-500	450-470	350-360
АМг	450-480	450-470	350-360
АМг3	410-450	390-420	310-330
АМг5	410-450	400-430	360-370
АМг6	430-470	400-430	360-370
Д1, Д16	410-450	400-410	340-360

## 6. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПОЛУФАБРИКАТОВ

Термическая обработка одна из важнейших стадий технологического процесса производства полуфабрикатов. Ее применяют как промежуточную операцию для улучшения технологических свойств металла между операциями обработки давлением и как окончательную для придания металлу комплекса механических, физических и химических свойств.



Любой процесс термообработки можно описать графиком, показывающим изменение температуры во времени. Но вид термообработки определяется, главным образом, типом фазовых и структурных изменений в металле.

Для алюминиевых сплавов наибольшее применение имеют три вида термообработки: отжиг I-го рода, закалка и старение.

Отжиг I-го рода предназначен для приведения структуры металла в устойчивое равновесное состояние. Неравновесное состояние структуры может быть следствием литья или пластической деформации. Поэтому в зависимости от назначения отжиг I-го рода разделяют на гомогенизирующий, рекристаллизационный и отжиг для снятия внутренних напряжений.

Гомогенизирующий отжиг применяют для слитков алюминиевых сплавов перед обработкой давлением. Его цель - выравнивание химического состава, устранение ликвации, сфероидизации частиц вторых фаз. Подробно этот процесс рассмотрен в источниках [3, 12, 15, 16].

Рекристаллизационный отжиг предназначен для снятия наклепа. Его применяют как промежуточный между операциями холодной обработки давлением, а также как окончательную термообработку, когда в изделиях необходимо сочетание умеренной прочности с высокой пластичностью.

Закалка и старение применяются только для термически упрочненных алюминиевых сплавов. Закалка необходима для получения пересыщенного твердого раствора легирующих элементов в алюминии, что создает возможность дальнейшего повышения прочности при старении. После закалки сплавы, обладая повышенной прочностью по сравнению с отожженным состоянием, сохраняют высокую пластичность. Процесс старения заключается в выдержке закаленного сплава при температурах, при которых происходит распад пересыщенного твердого раствора и выделение из него избыточных фаз. Закаленный сплав, находящийся в метастабильном состоянии, переходит в более устойчивое, но далеко неравновесное состояние. Прочность и твердость сплава после старения достигает своих наибольших значений.

#### 6.1. Выбор операций термообработки в зависимости от технологической схемы изготовления полуфабрикатов

Рассматривая различные варианты технологии изготовления полуфабрикатов из алюминиевых сплавов, можно сделать вывод, что различие между ними заключается в основном в конкретных режимах термообработки, что зависит от химического состава сплава, сам же набор операций примерно одинаковый.

В начале технологической схемы производства обязательно применяется гомогенизационный отжиг. Его необходимость вызывается малой пластичностью слитка, полученного непрерывным или полунепрерывным способом литья. В результате неравновесной кристаллизации возникает дендритная ликвация, приводящая к образованию неравновесной эвтектики, хрупких интерметаллидных фаз по границам зерен и между ветвями дендритов. Дендритная ликвация в слитке ухудшает технологичность при горячей и холодной обработке давлением, снижает пластичность готового изделия. Гомогенизационный отжиг уменьшает количество трещин при горячей прокатке, позволяет увеличить степень обжатия при обработке давлением (табл. 15).

Т а б л и ц а 15  
Рекомендуемые режимы гомогенизации слитков

Марка сплава	$T, ^\circ\text{C}$	Выдержка, ч
Д1, Д16, Д19, Д17, АК6, АК8, АК4, АК4-1, АМГ6, АМГ5	480-500	6-36
АД33, АМГ, АМГ3	510-530	8-24
АВ, АД31	540-550	8-12
АМц, АД	610-630	6-10

Рекристаллизационный отжиг в технологическом процессе производства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов занимает место либо между операциями обработки давлением, либо в конце, как заключительная операция термообработки. Причем этот вид отжига может быть использован и как окончательный для полуфабрикатов после горячей деформации, если холодная деформация не требуется, а металл поставляется на машиностроительные заводы в соответствии с их требованиями.

Для полуфабрикатов из сплавов неупрочняемых термообработкой рекристаллизационный отжиг подразделяют на высокий и низкий. Высокий проводят при повышенных температурах и времени выдержки, достаточной для полного разупрочнения материала в результате рекристаллизации (табл. 16). Обычно такой отжиг применяют как промежуточный для снятия нагартовки и как окончательный при получении полуфабрикатов с высоким уровнем пластичности, т.е. состояние поставки М.

Низкий отжиг проводится при сравнительно низких температурах. В металле не успевает пройти рекристаллизация, а полигонизация устраняет наклеп только частично. В результате наблюдается только частичное разупрочнение и некоторое повышение пластичности. Такой отжиг применяют как окончательный при поставке полуфабрикатов в состояниях П или I/2П.

Для полуфабрикатов из термически упрочняемых сплавов применяют

Т а б л и ц а 10  
 Режимы высокого (числитель) и низкого (знаменатель)  
 отжига листов из неупрочняемых  
 термической обработкой сплавов

Сплав	Температура отжига, °С	Время выдержки, мин, при толщине, мм	
		<6	>6
АД00, АД0, АД1, АД	300-500	2-10	10-30
	150-300	60-180	60-180
АМц	300-500	2-10	10-30
	200-300	60-180	60-180
АМг1, АМг2	350-420	2-10	10-30
	150-180	60-180	60-180
АМг3	350-420	2-10	10-30
	250-300	60-180	60-180
АМг4, АМг5, АМг6	300-350	30-120	30-180
	310-335	30-120	30-180

полный или сокращенный отжиг. Полным называется отжиг, при котором обеспечивается полное протекание процессов распада твердого раствора, коагуляция упрочняющих фаз, а также рекристаллизация при наличии наклепа. После такого отжига металл способен выдержать холодную деформацию с высокими степенями обжатия. Этот вид отжига может быть использован как промежуточный и как окончательный вид обработки.

Для снятия технологического наклепа полуфабрикатов из таких сплавов можно применять также кратковременный нагрев (1-2 мин) с последующим быстрым охлаждением, например в воде. Этой термообработкой получают достаточную пластичность, обеспечивающую возможность продолжения холодной деформации.

Закалка и старение - это обычно заключительные термические операции в технологической схеме изготовления полуфабрикатов. Однако в некоторых случаях эти операции термообработки сочетают с операциями пластической деформации, которая может проходить как перед, так и после закалки, перед старением и после него. Такой вид обработки называется термомеханической обработкой, и пластическая деформация положительно влияет на процессы, проходящие при термообработке, обеспечивая более высокие свойства, чем одна термообработка.

## 6.2. Фазовые превращения при термообработке алюминиевых сплавов

Структура и свойства слитков в значительной степени определяют структуру и свойства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов. Причем это влияние тем больше, чем меньше степень пластической деформации. Степень деформации, при которой свойства полуфабрикатов перестают зависеть от свойств слитков, для разных сплавов различна. Чем более легирован сплав, тем она выше. Так, например, для сплава Д16 принято считать, что такая степень деформации равна 85-90%. Однако в действительности некоторые отклонения в свойствах слитков, связанные с их составом и структурой, проявляются при любой степени деформации. Поэтому качество слитка напрямую влияет на качество полуфабрикатов. К параметрам качества слитка относят неоднородность его химического состава, связанную, например, с ликвацией; пористость и неметаллические включения; величину и ориентировку зерен; размеры ветвей дендритов; неравновесность фазового состава. Влияние этих параметров на свойства слитков и полуфабрикатов, а также меры по улучшению качества слитков приведены в методике [5].

В алюминиевых промышленных сплавах наблюдается только один вид фазовых превращений. При нагреве интерметаллидные фазы растворяются в алюминии, образуя твердый раствор, при охлаждении из-за ограниченной растворимости они вновь выделяются из твердого раствора. Эти процессы в той или иной степени проходят при любых видах термообработки - отжиге, закалке, старении. Степень и полнота их прохождения зависят прежде всего от температуры нагрева, а также от скорости охлаждения и времени выдержки.

При гомогенизационном отжиге при высоких температурах нагрева происходит растворение грубых выделений интерметаллидных фаз и неравновесных эвтектик, постепенное устранение дендритной ликвации за счет процессов диффузии. В процессе постепенного охлаждения интерметаллидные фазы выделяются вновь, но уже более мелкие, округлой формы, равномерно распределенные по всему объему слитка. Происходит и изменение структуры. Крупные дендритные зерна сменяются более мелкими равноосными. Все это позволяет повысить технологическую пластичность сплавов.

Основное назначение закалки с точки зрения фазовых превращений - подготовка сплава к старению. Закалка состоит в фиксации при низкой температуре состояния, присущего сплаву при более высокой температуре, т.е. получении пересыщенного легирующими элементами твердого раствора.

С этой целью сплав нагревают до температуры ниже солидус во избежание пережога. Однако температура должна быть достаточной, чтобы обеспечить максимально возможное растворение избыточных фаз в твердом

растворе. Поэтому температура закалки должна находиться выше линии переменной растворимости. Скорость растворения избыточных фаз определяет время выдержки при температуре нагрева под закалку. Чем более сложнотемпературный сплав, чем больше избыточных фаз, тем больше время выдержки. После закалки все сплавы, обладая повышенной прочностью по сравнению с отожженным состоянием, сохраняют высокую пластичность.

В процессе старения происходит дальнейшее изменение фазового состава и структуры сплавов. Старение происходит при температурах, обеспечивающих распад пересыщенного твердого раствора и выделение из него избыточных фаз. Принято разбивать этот процесс на несколько стадий. Для сплавов системы  $Al-Cu$  можно выделить следующие стадии:

1. Начало распада твердого раствора с образованием субмикроскопических областей, обогащенных медью. Эти зоны принято называть зонами Гинье-Престона (ЗГП). В начале распада они очень малы и не имеют упорядоченной структуры. Постепенно они растут, приближаясь по химическому составу к соединению  $CuAl_2$ . Структура их становится более упорядоченной ( $\theta$ -фаза), оставаясь полностью когерентной с твердым раствором.

2. Выделение из твердого раствора частиц промежуточной фазы с химическим составом, соответствующим составу фазы  $CuAl_2$ , но с метастабильной кристаллической решеткой, отличной от решетки этой фазы и все еще когерентно связанной с решеткой твердого раствора.

3. Образование стабильной  $\theta$ -фазы ( $CuAl_2$ ) со своей кристаллической решеткой, отделенной от твердого раствора поверхностью раздела.

4. Рост и коагуляция  $\theta$ -фазы.

По подобной схеме (табл. 17) происходит распад твердых растворов и других промышленных термически упрочняемых сплавов. Отличие заключается в том, что в каждом сплаве образуются свои упрочняющие фазы.

Т а б л и ц а 17

Стадии распада пересыщенного твердого раствора  
в промышленных сплавах

Система	Марка сплава	Преобразования твердого раствора
$Al-Cu$	АЛ7	$ZП \rightarrow \theta'' \rightarrow \theta' \rightarrow \theta (CuAl_2)$
$Al-Mg$	АЛ8	$ZП \rightarrow \beta' \rightarrow \beta (Al_3Mg_2)$
$Al-Cu-Mg$	Д16	$ZП \rightarrow S' \rightarrow S (Al_2CuMg)$
$Al-Cu-Mg-$ $-Fe-Ni$	АК4-1	$ZП \rightarrow S' \rightarrow S (Al_2Cu-Mg)$
$Al-Mg-S$	АД31	$ZП \rightarrow (Mg_2Si)' \rightarrow Mg_2Si$
$Al-Zn-Mg$	1951	$ZП \rightarrow \eta' \rightarrow \eta (MgZn_2) \rightarrow \eta' (Al_2Mg_3Zn_3)$
$Al-Zn-Mg-Cu$	В95	$ZП \rightarrow \eta' \rightarrow \eta (MgZn_2)$

В результате распада твердого раствора происходит взаимодействие дислокаций с образующимися выделениями упрочняющих фаз. Процесс упрочнения обусловлен торможением дислокаций в поле упругих напряжений, возникающих из-за искажения кристаллической решетки вокруг выделений. Кроме того, выделения играют роль барьеров, которые вынуждены обходить дислокации при своем движении в процессе пластической деформации.

Повышение температуры и увеличение продолжительности процесса старения ускоряют процесс распада твердого раствора. В общем случае прочностные характеристики сплава постепенно увеличиваются, достигая максимума, а затем снижаются. Спад упрочнения называется перестариванием; на этой стадии обычно наблюдается рост и коагуляция выделений.

В табл. 18-20 приведены режимы закалки и старения основных деформируемых сплавов.

Т а б л и ц а 18  
Режимы закалки алюминиевых сплавов

Марка сплава	Температура начала отсчета выдержки, °С	Температура выдержки при закалке, °С
АДЗ1, АДЗЗ	510	515-530
АДЗ5, АВ*	510	515-530
АК6*, АК6-1	510	515-525
АК8*	490	495-505
АК4, АК4-1	520	525-535
Д1	490	495-510
Д16	480	485-503
Д16* (листы)	490	495-505
Д19	490	495-505
Д19 (листы)	495	500-508
ВД17	490	495-505
ЗАД1	500	503-508
Д20	525	530-540
Д21	515	520-530
ЗАД23	510	515-520
В92ц	445	450-470
В93	445	450-465
В95, В96, В95ц	460	465-475

\* - сплавы подвергают искусственному и естественному старению.

Продолжительность выдержки при нагреве под закалку  
алюминиевых сплавов в воздушных печах (числитель)  
и серитровых ванах (знаменатель)

Вид полуфабриката	Толщина, мм	Выдержка, мин
Листы плакированные	<1,4	10-15/5
	1,5-1,9	15-20/7
	2,0-4,0	20-25/10
	4,1-6,0	30-35/15
	6,1-10	35-40/20
Листы неплакированные, трубы холоднодеформированные, плиты горячекатаные, профили, прутки, полосы и втулки горячепрессованные	<1,2	10-20/5
	1,3-3,0	15-30/10
	3,1-5,0	20-45/15
	5,1-10	30-60/20
	11-20	35-75/25
	21-30	45-90/30
	31-50	60-120/40
	51-75	100-150/50
	76-100	120-180/70
	101-150	150-210/80
151-200	180-240/90	
Штамповки и поковки	<2,5	15-30/10
	2,6-5,0	20-45/15
	5,1-15	30-50/25
	16-30	40-60/40
	31-50	60-150/50
	51-75	150-210/60
	76-100	180-240/90-18
	101-150	210-360/120-240
151-200	240-440/180-300	

## Режимы старения алюминиевых сплавов

Марка сплава	Температура старения, °С	Выдержка при старении, ч
АДЗІ, АДЗЗ	20	240-260
АДЗБ, АВ	160-170	10-12
АКБ*, АКБ-І	150-165	6-12
АКВ*	160-165	4-12
АК4, АК4-І	190-200	7-24
ДІ	20	>96
ДІ6	20	>96
ДІ6 (листы)	185-195	7-13
ДІ9, ДІ9 (листы)	185-195	12-14
ВДІ7, ВВДІ	20	>96
Д20	200-220	8-12
Д2І	180-190	15-17
ВВД23	195-205	7-10
В92ц	20	>72
В95, В96, В96ц	135-145	15-17

\* - сплавы подвергают искусственному и естественному старению.

### 6.3. Изменение структуры при отжиге алюминиевых сплавов после холодной деформации

Наибольшей пластичностью среди алюминиевых сплавов отличаются термически неупрочняемые типа АД, АМц, АМг. Эти сплавы наиболее часто подвергают холодной пластической деформации, которая сопровождается упрочнением в результате наклепа. В зависимости от требований заказчика полуфабрикаты из этих сплавов поставляются в нагартованном, посленагартованном и отожженном состояниях. Регулирование механических свойств сплавов осуществляется при помощи рекристаллизационного отжига. В этом случае его используют как окончательный вид термообработки. Кроме того, рекристаллизационный отжиг часто проводится как промежуточная термообработка между технологическими операциями холодной обработки металлов давлением.

Снятие наклепа при отжиге происходит за счет рекристаллизации, т.е. образования и роста новых зерен взамен деформированных. В результате уменьшается плотность дислокаций на несколько порядков. Плотность и твердость при этом уменьшаются, пластичность - возрастает.



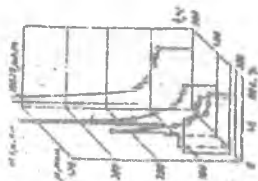
Температура отжига должна быть выше температуры окончания первичной рекристаллизации. Максимальная пластичность достигается при режиме, обеспечивающем полную рекристаллизацию и мелкозернистую структуру. Величина рекристаллизационного зерна зависит от степени деформации, температуры нагрева и времени выдержки при данной температуре. Для получения мелкозернистой структуры суммарная степень деформации перед отжигом должна быть больше 20%. Всегда следует избегать малых степеней деформации, близких к критическим (3-12%), во избежание получения крупно- и разноразмерности в полуфабрикатах, так как это ведет к ухудшению механических свойств.

Высокая температура отжига также стимулирует быстрый рост зерна за счет процессов собирательной рекристаллизации. Однако при этом следует иметь в виду, что тогда крупное зерно может образоваться и при первичной рекристаллизации, при неравномерном распределении в сплаве интерметаллидных фаз, которые тормозят рост зерна, блокируя перемещение их границ. Особенно характерно это для сплавов, содержащих  $Mg$ ,  $Cr$ ,  $Fe$ ,  $W$ . Избежать крупнозернистости можно, применяя быстрый нагрев до температур, превышающих температуру окончания первичной рекристаллизации на 50-150°C, но не допуская одновременного прохождения собирательной рекристаллизации, которая может наблюдаться при чрезмерно высоких температурах и длительных выдержках.

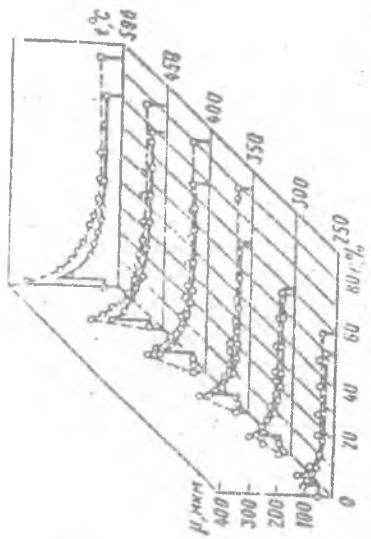
На практике температура рекристаллизационного отжига  $t$  на 50-150°C превышает температуру окончания рекристаллизации для промышленных сплавов и изменяется от 300 до 500°C. Выдержка при температуре отжига находится в пределах 0,5-2,0 ч. Конкретный размер зерна, образующийся при отжиге можно прогнозировать заранее, используя диаграммы рекристаллизации для конкретного сплава. Они показывают зависимость размера зерна от степени деформации и температуры отжига.

Подробно изменение структуры при рекристаллизационном отжиге для конкретных промышленных сплавов описано в литературе [3, 5, 6, 12].

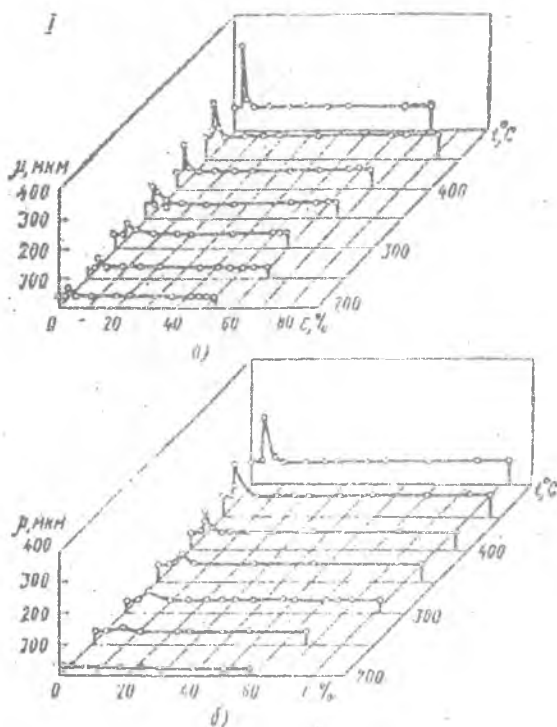
Диаграммы рекристаллизации некоторых сплавов приведены на рис. 48-52.



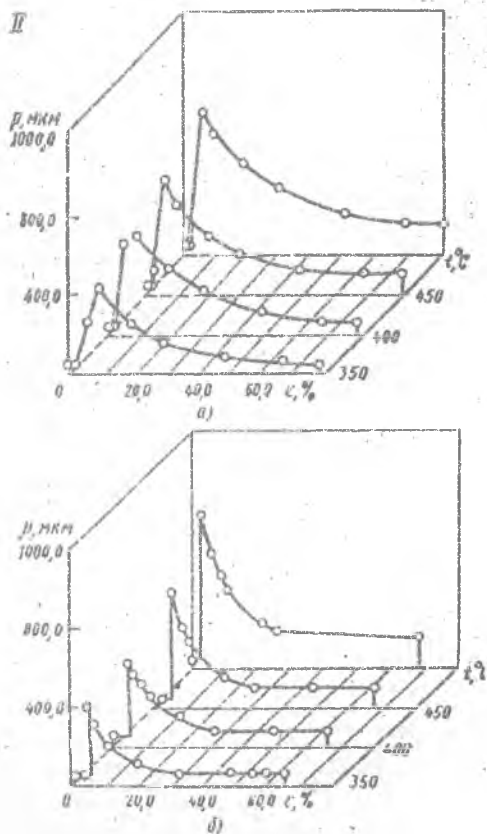
Р и с. 48. Диаграмма рекристаллизации сплава АД1. Прутки прессованные, горячая осадка, отжиг при температуре осадки в течение 20 мин в соляной ванне



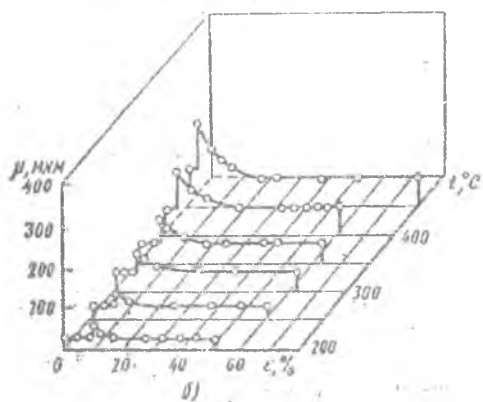
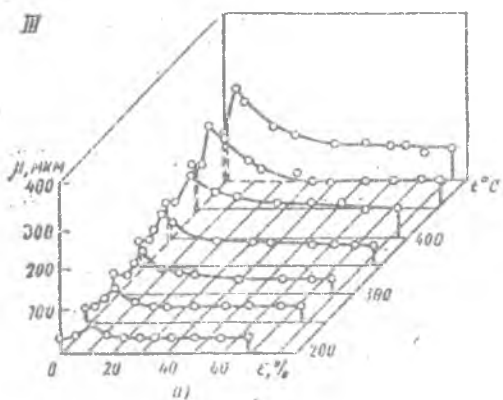
Р и с. 49. Диаграмма рекристаллизации сплава Д1. Отжиг при температуре 500°C в течение 3 ч: — осадка на копре; - - - осадка на прессе



Р и с. 50. Диаграмма рекристаллизации сплава ВД17:  
осадка на прессе (а); осадка на копке (б)



Р и с. 51. Диаграмма рекристаллизации сплава АК6: осадка на прессе (а); осадка на копре (б).



Р и с. 52. Диаграммы рекристаллизации сплава МК8:  
осадка на прессе (а); осадка на меди (б)

## 7. ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

### 7.1. Классификация и конструктивные особенности печей для термообработки алюминиевых полуфабрикатов

В промышленности для термообработки деталей и полуфабрикатов из алюминиевых сплавов применяются главным образом электрические печи и ванны. Эти агрегаты относятся к низкотемпературным, так как максимальная рабочая температура лежит ниже 600-700°C. В зависимости от требуемой производительности и места в технологическом процессе производства полуфабрикатов применяют как печи периодического, так и печи непрерывного действия (методические). Первые применяют при небольшой производительности и отсутствии постоянного потока однородных деталей, подлежащих термообработке. Вторые применяют при поточном производстве с большой производительностью.

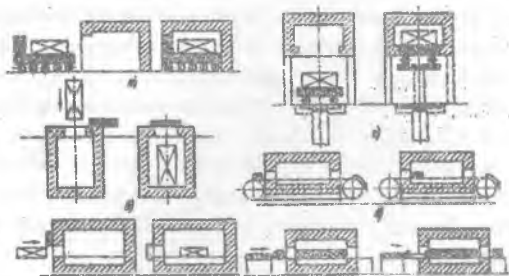
Большое значение при термической обработке цветных сплавов имеет точность регулирования температуры в рабочем пространстве печи. Для большинства алюминиевых сплавов допустимый перепад температуры перед закалкой составляет 10-15°C, так как температура нагрева находится очень близко от линии солидуса. Превышение температуры нагрева может вызвать частичное расплавление легкоплавких эвтектических составляющих сплава и, как результат, непоправимый дефект - пережог.

Поддержание необходимой температуры в печи обеспечивается ее соответствующей конструкцией и принятой схемой регулирования температуры. Как правило, печи для термообработки алюминиевых сплавов имеют рабочее пространство, экранированное от нагревателей, что позволяет избежать прямого нагрева садки и местных перегревов отдельных частей деталей. В таких печах предусматривается принудительная, за счет встроенных вентиляторов, циркуляция атмосферы, которая исключает возможность неравномерного нагрева по объему садки.

Для отжига, старения, а также нагрева под закалку используются в основном печи периодического действия: камерные, шахтные, колпаковые, с выдвижным подом. Печи непрерывного действия (толкательные или конвейерные) применяют при больших объемах производства. Для термообработки алюминиевых сплавов в процессе производства ленты или листов разработаны специальные агрегаты, работающие синхронно с прокатным станом.

Классификацию печей проводят по нескольким признакам. По виду ис-

пользуемой энергии (электрические, пламенные), по степени механизации (механизированные, немеханизированные), по назначению (закалочные, нормализационные и т.п.), по способу загрузки (камерные, шахтные, с выдвижным подом, конвейерные и т.д.). Схемы печей некоторых типов показаны на рис. 53.



Р и с. 53. Схемы термических печей: а - с выдвижным подом; б - шахтная; в - камерная; г - элеваторная; д - конвейерная; е - толкательная

Электрические печи принято разделять по способу нагрева (печи сопротивления и индукционные), по конструктивным признакам, по среде в рабочем пространстве печи и по размерам рабочего пространства. Эти признаки отражаются в буквенно-цифровом индексе.

Первая буква индекса для всех печей обозначает способ нагрева: С - сопротивлением, И - индукционный.

Вторая буква индекса нагревательных печей сопротивления характеризует основной конструктивный признак: А - карусельная; Б - барабанная; В - ванная; Г - колпаковая; Д - с выдвижным подом; Е - подвесной конвейер; Ж - жидкостная; И - с пульсирующим подом; К - конвейерная; Н - камерная; П - протяжная; Р - роликонвейерная; Т - толкательная; Ш - шахтная; Э - элеваторная; Ю - с шагающим подом; Я - ямная.

Третья буква характеризует среду в рабочем пространстве печи: А - для азотирования; В - вакуум; З - защитная атмосфера; И - водород; О - окислительная (воздух); С - соль, селитра; Ц - цементация; Ш - щелочь.

После букв через дефис указывают размеры рабочего пространства печи (в дециметрах); для прямоугольной - ширину, длину и высоту; для цилиндрической - диаметр и высоту (длину).

После соответствующих размеров через дробь указывают рабочую температуру в сотнях градусах Цельсия.

Пример: СГО-20.15/3 - электропечь сопротивления, колпаковая с воздушной атмосферой, диаметр рабочего пространства 2 м, высота 1,5 м, температура 300°C.

Тип печи для термической обработки выбирают с учетом ряда факторов. В первую очередь определяют необходимую рабочую температуру в зависимости от обрабатываемого материала. Затем рассматривают весь перечень деталей или полуфабрикатов, подвергаемых обработке. Окончательный выбор печи и степень ее механизации зависят от качества, типа полуфабрикатов и их габаритных размеров. Так, например, закалочные печи для деталей, листов и длинных труб по своей конструкции принципиально отличаются друг от друга.

Для нагрева слитков под гомогенизационный отжиг обычно используют ямные печи, а при совмещении гомогенизации с нагревом под прокатку можно использовать туннельные или конвейерные печи. Однако наиболее часто для гомогенизации слитков применяют электрические шахтные печи.

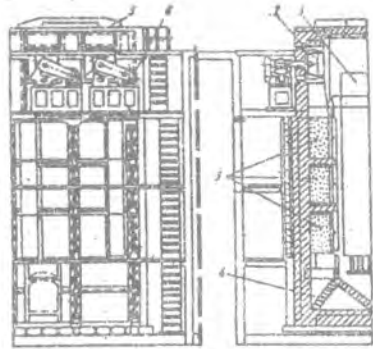
Термообработка листов также требует специализированного оборудования. Для закалки используют специальные печи с поточным охлаждением каждого листа или охлаждением целой стопы. Существуют также специальные агрегаты для непрерывной термообработки движущейся ленты. Отжиг ленты, свернутой в рулон, проводится в камерных или шахтных печах.

Термообработка длинномерных профилей и труб проводится в специальных печах. Закалка - в вертикальных закалочных печах, а старение может осуществляться в камерных печах или печах-ваннах. Старение штамповок из алюминиевых сплавов чаще всего проводят в камерных печах. Основные типы применяемых печей и особенности их конструкции (рис. 54-64) описаны в источниках [6, II, 13, 16].

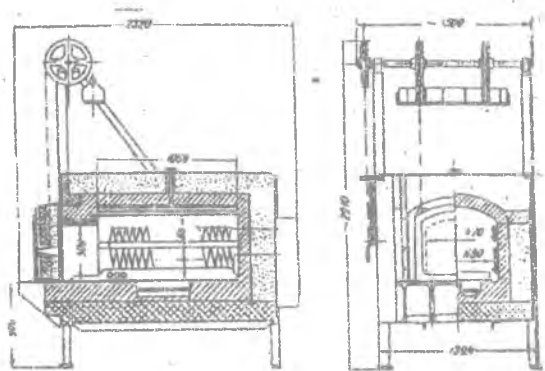
## 7.2. Комплектование садки и технологические особенности проведения термообработки алюминиевых сплавов

Для эффективного использования рабочего пространства печи детали и полуфабрикаты, подлежащие термообработке, следует группировать в одну садку, используя для этой цели специальные корзины и приспособления. Крупногабаритные и длинномерные полуфабрикаты подвешиваются внутри печи на специальных приспособлениях, которые в случае необходимости закалки используют для переноса их в закалочный бак. Детали, склонные к сильному короблению, нужно подавать в печь на специальных поддонах или приспособлениях.

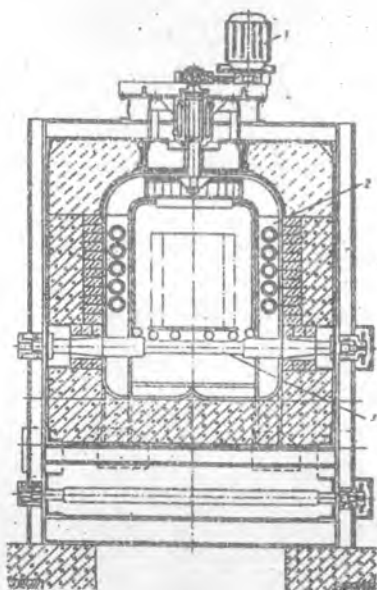




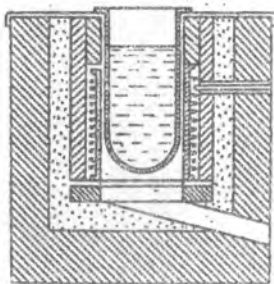
Р и с. 54. Вертикальные разрезы электрического колодца для гомогенизации: 1 - нагреваемый слиток; 2 - вентиляторы для циркуляции воздуха; 3 - нагревательные элементы; 4 - направляющие лопатки для воздуха; 5 - крыша колодца; 6 - привод вентиляторов.



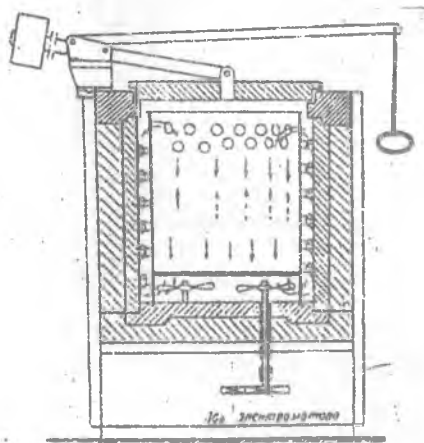
Р и с. 55. Камерная печь с неподвижным подом



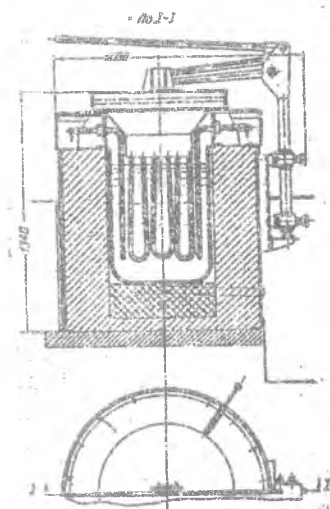
Р и с. 56. Поперечный разрез проходной электропечи отжига с роликовым подом: 1 - двигатель привода вентилятора для циркуляции воздуха; 2 - нагревательные элементы; 3 - роликовый под



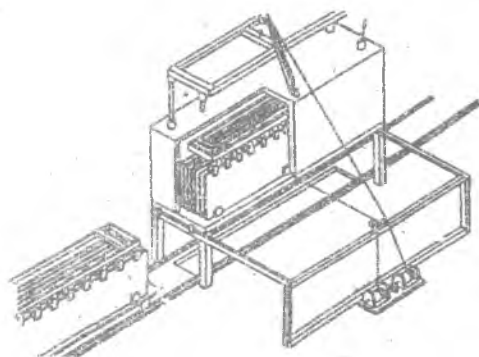
Р и с. 57. Электрическая солевая ванна с наружным обогревателем



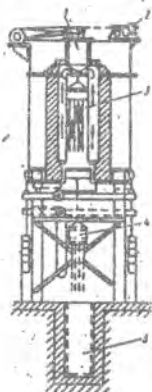
Р и с. 58. Шахтная электропечь с принудительной циркуляцией воздуха



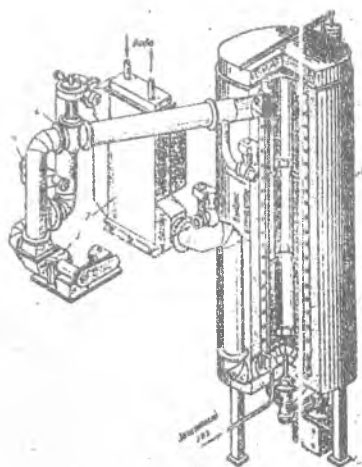
Р и с. 59. Электрическая соляная печь-  
ванна с трубчатыми электронагревателями



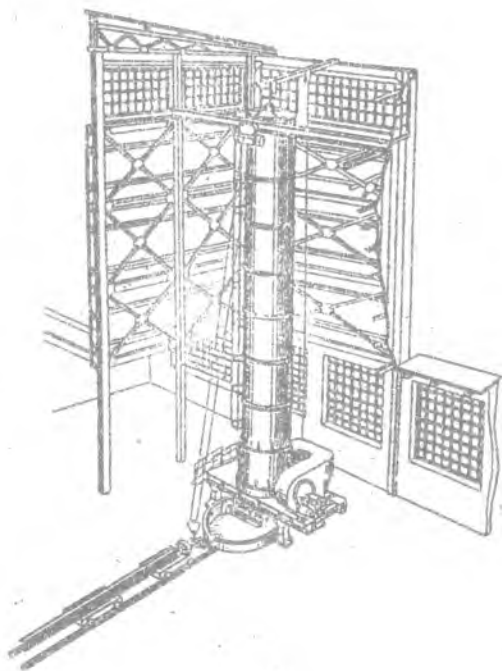
Р и с. 60. Установка для закалки больших  
листов



Р и с. 61. Поперечный разрез воздушной электропечи для закалки листов из алюминиевых сплавов: 1 - вентилятор для циркуляции воздуха; 2 - лебедка для подъема и опускания садки; 3 - садка листов в камере нагрева; 4 - опускание садки в закалочный бак; 5 - закалочный бак



Р и с. 62. Схема шахтной (колодезной) печи: 1 - шахтная электропечь; 2 - теплообменник; 3 - охлаждающий вентилятор; 4 - газопровод с запорной арматурой



Р и с. 63. Вертикальная электропечь для закалки профилей

Детали из сплавов, склонных к сильному окислению, необходимо подвергать термообработке в вакууме или защитной атмосфере. В производственных условиях для этой цели часто применяют термообработку деталей в ящиках с засыпкой окисью алюминия.

При комплектовании садки необходимо учитывать, что алюминиевые сплавы при температуре 500°C очень мягкие и могут легко деформироваться. Поэтому иногда применяют многостаянные поддерживающие приспособления, обеспечивающие необходимые зазоры между деталями.

Слитки при гомогенизации помещают в шахтные колодцы обычно вертикально по одному или несколько сразу. Нагрев слитков под прокатку или прессование ведется либо в камерных печах с поштучной загрузкой, либо в конвейерных или толкательных печах с непрерывным действием.

Профили или трубы под закалку подвешивают на специальные приспособления, а затем вводят в печь обычно снизу через закалочный бак.

Термообработка рулонов осуществляется либо в шахтных, либо в камерных печах с выдвижным подом. Особую конструкцию имеют печи для закалки листовых полуфабрикатов. Листы в таких печах подвешиваются поштучно в специальной корзине, загрузка которой осуществляется через подвижный под. Закалочный бак располагается под печью.

Загрузка полуфабрикатов в селитровые ванны производится наклонно, чтобы дать возможность выхода воздуха из них. Глубина погружения должна обеспечивать не менее 150 мм от зеркала расплавленной селитры. Детали, имеющие углубления и внутренние полости укладывают таким образом, чтобы обеспечить свободное стекание селитры при вынимании садки из ванны.

Для обеспечения наилучшего эффекта от закалки садку нужно комплектовать таким образом, чтобы обеспечить необходимые зазоры между изделиями. Зазор должен быть не менее 30 мм, а расположение деталей таким, чтобы не допустить образования паровой рубашки, ухудшающей охлаждение при закалке.

При подъеме садки из селитровой ванны необходимо дать выдержку 2-3 с для стекания селитры, а затем быстро перенести ее в закалочную ванну. Перенос садки в закалочную среду должен быть по возможности быстрым. Замедленный перенос приводит к уменьшению прочности, а также коррозионной стойкости. Поэтому время пребывания деталей на воздухе не должно превышать 10-15 с для тонких деталей и 25-30 с для массивных полуфабрикатов.

При нагреве садки в воздушной среде температура садки, как правило, отстает от температуры нагревающего воздуха. Поэтому температуру садки необходимо контролировать по термометру, заложенной в садку вблизи выхода нагревающего воздуха из рабочего пространства печи. Во избежание пе-

режега температура нагревающего воздуха не должна превышать верхнего предела температуры нагрева под закалку. Нижний предел температуры нагрева под закалку определяется необходимостью получения требуемых механических и коррозионных свойств сплава.

Для массивных деталей и профилей рекомендуется выбирать температуру закалки на уровне ее нижнего предела, а для тонких, наоборот, на уровне верхнего. При этом выдержка при температуре закалки должна соответствовать толщине изделий. Следует учитывать, что недостаточное время выдержки деталей при температуре закалки может быть причиной снижения механических свойств сплавов. С другой стороны, чрезмерное увеличение времени выдержки под закалку также нежелательно. Для прессованных полуфабрикатов длительное воздействие высоких температур может привести к рекристаллизации, снижению пресс-эффекта и уменьшению прочности материала, особенно в продольном направлении.

Особенно вредно длительное время выдержки при температуре закалки для плакированных полуфабрикатов, так как диффузия меди и магния из сердцевинных деталей в плакирующий слой ухудшает коррозионную стойкость.

Для получения однородных свойств закаленных изделий по сечению и достижения минимального коробления рекомендуется погружать их в закалочный бак следующим образом:

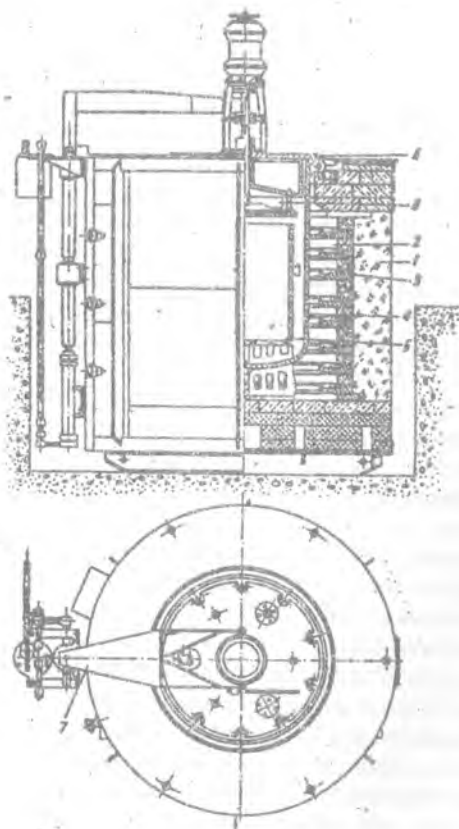
- 1) листы - на ребро с достаточным зазором между ними;
- 2) трубы, прутки, профили - в строго вертикальном положении;
- 3) выгнутые профили и обтекатели - в наклонном положении;
- 4) заклепочный материал высыпать на сетку на определенном уровне в закалочном баке.

Охлаждение проводится обычно в закалочном баке в проточной воде с температурой не выше 40°C. Энергетичное перемешивание воды достигается при помощи насосов или сжатым воздухом.

В отдельных случаях при закалке массивных деталей во избежание коробления и образования трещин для закалки применяют подогретую до 60-80°C или кипящую воду. Еще медленнее происходит охлаждение водяными брызгами; в масле или на воздухе. Однако при этом обычно происходит снижение как уровня прочности, так и коррозионной стойкости.

Более энергичного охлаждения можно добиться, используя ледяную воду или смесь ледяной воды, сухого льда и ацетона.





Р и с. 64. Шахтная электрическая печь: 1 - металличе-  
 ский каркас; 2 - нагревательная камера; 3 - нагре-  
 ватели; 4 - реторта; 5 - корзина; 6 - крышка; 7 - ме-  
 ханизм подъема крышки; 8 - вентилятор

### 7.3. Контроль качества термической обработки алюминиевых полуфабрикатов

Контроль термической обработки полуфабрикатов и деталей из алюминиевых сплавов включает в себя:

- 1) контроль состояния измерительной аппаратуры;
- 2) контроль состояния термических печей;
- 3) контроль качества полуфабрикатов после термообработки.

Контроль за состоянием печного и измерительного оборудования возложен на соответствующие службы цеха, металлургическое качество контролирует специальная лаборатория.

Контроль качества термически обработанных полуфабрикатов обычно производится по четырем направлениям:

- 1) наблюдение за температурным режимом;
- 2) наблюдение за состоянием поверхности изделий;
- 3) выявление трещин, образовавшихся при термообработке;
- 4) определение механических свойств изделий или специальных сопутствующих образцов, термообработанных в составе садки.

Контроль осуществляется визуальным способом, а также методами люминисцентного, ультразвукового, рентгеноскопического анализов [13].

При термообработке алюминиевых полуфабрикатов наиболее часто встречаются следующие дефекты:

- 1) неудовлетворительные механические свойства;
- 2) неравномерная закалка;
- 3) коробление;
- 4) трещины;
- 5) пузыри;
- 6) перелом;
- 7) коррозия;
- 8) диффузный излом;
- 9) крупнозернистая структура.

Все эти виды дефектов могут возникать при неудовлетворительной работе оборудования, а также при нарушении технологии.

Неудовлетворительные механические свойства обычно возникают при нарушении технологических параметров термообработки - температуры, времени выдержки, скорости охлаждения. Эти дефекты обычно устраняют повторной термообработкой.

Неравномерная закалка характерна для изделий со сложной конфигурацией и различной толщиной. Она проявляется в неодинаковых механических

своиствах изделия в его различных сечениях. Для предотвращения или устранения этого дефекта необходимо применить термообработку, обеспечивающую равномерное и достаточно быстрое охлаждение всего изделия.

Под короблением понимается изменение формы изделий при термообработке в результате внутренних напряжений. Чем резже нагрев или охлаждение, чем больше разница в толщине стенок деталей, тем больше возникают внутренние напряжения и тем больше коробление. Усиливать внутренние напряжения могут и фазовые превращения, проходящие при термообработке. Остаточные напряжения меньше предела упругости и сравнительно легко устраняются кратковременным нагревом. Если остаточные напряжения по величине превышают предел текучести, то они вызывают пластическую деформацию в виде коробления, а при превышении предела прочности ведут к появлению трещин. Остаточные напряжения могут быть устранены медленным нагревом и охлаждением деталей.

Уменьшить коробление деталей при термообработке можно за счет применения специальных фиксирующих приспособлений и изменения способа охлаждения. Для правки деталей можно применять рихтовку или ручной пресс.

Во избежание коробления листовых материалов их закалку необходимо производить закрепленным в рамочных приспособлениях, опуская в бак в вертикальном положении.

Трещины при термообработке являются неисправимым браком. Их основная причина - неравномерное резкое охлаждение сложных разностенных деталей. Для предотвращения образования трещин обычно применяют изотермическую термообработку с медленным и равномерным нагревом до рабочих температур. При большой разнице в толщине стенок деталей места переходов обычно обмазывают асбестом, чтобы обеспечить равномерный прогрев всех частей детали.

Пузыри обычно образуются на листовых материалах при отставании лакировочного слоя от сердцевины. При некачественной лакировке воздух и пары воды, находящиеся под лакировочным слоем, в процессе нагрева расширяются и вызывают образование пузырей. Для предотвращения этого дефекта необходимо улучшить технологию лакировки.

Пережог - это частичное оплавление и окисление легкоплавких эвтектических составляющих по границам зерен. Он проявляется в виде бугорков на поверхности с пониженной пластичности полуфабрикатов. Его причиной является завышенная температура термообработки в результате несоблюдения технологии или неисправности оборудования. Устранить этот дефект повторной термообработкой невозможно.

Коррозия алюминиевых полуфабрикатов при термообработке в нитратных ваннах вызывается примесями хлоридов, поэтому их количество не

должно превышать 0,5%. Развитию коррозии способствуют также остатки серы, и для ее предотвращения необходима тщательная промывка полуфабрикатов в проточной воде.

Некоторые сплавы в искусственно состаренном состоянии склонны к межкристаллитной коррозии. Она начинается с поверхности и развивается вглубь металла по границам зерен. Для ее предотвращения рекомендуется повышать скорость охлаждения деталей при закалке.

Шиферная структура излома, состоящая из пластичных и грубокристаллитных слоев, является наиболее типичным дефектом прессованных или штампованных изделий, особенно из сплавов типа АВ, содержащих 0,2-0,4% *Mn*. Наиболее сильно на образование шиферного излома влияет исходная структура. Чем больше дендритная ликвация, тем больше химическая неоднородность сплава, при которой чередуются участки пересыщенного твердого раствора и марганцовистых составляющих. Чем больше разница в свойствах между пластичной основой и хрупкими прослойками, тем резче расслоение. Этот дефект способствует снижению механических свойств сплава и особенно пластичности.

Уменьшение доли шиферного излома возможно за счет регулирования присадки марганца, понижения температуры и увеличения скорости охлаждения при закалке.

Крупнокристаллическая структура образуется чаще всего при производстве листов из чистого алюминия и малолегированных сплавов типа АМц. Полуфабрикаты с такой структурой обладают пониженной пластичностью и склонностью к образованию трещин при глубокой вытяжке.

Причинами крупнозернистости являются повышенная чистота исходного металла, присутствие марганца и свободного кремния. Увеличивает зерно повышенная скорость кристаллизации слитков, а также чрезмерная выдержка при отжиге.

Для измельчения зерна рекомендуется вводить в сплавы добавки железа и титана, а также увеличивать скорость нагрева сплавов при отжиге.

## 8. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА ПРОЦЕССА ТЕРМООБРАБОТКИ

Разработка технологического процесса термообработки является комплексной задачей, для решения которой необходимо найти оптимальный вариант. Она начинается с изучения технических условий на изделие, после изучения которых выбираются основные операции термической обработки, тип оборудования, приспособлений средств контроля и т.д.

Технологический процесс термической обработки включает в себя подготовительные, основные, отделочные и контрольные операции. Подготовитель-

льные операции включают в себя комплекс мероприятий, предшествующих термообработке. Это такие операции как фрезеровка поверхности слитка, резка его на заготовки и т.д.

Основные операции включают в себя отжиг, закалку, старение.

Отделочные операции состоят из очистки поверхности, травления, правки после коробления и т.д.

Контрольные операции являются заключительными. В них входят контроль механических свойств, качества поверхности, структуры, геометрии и т.д.

Отражением технологического процесса является технологическая карта, в которой приводится вся последовательность технологических операций. В начале ее приводится эскиз изделия и его основные свойства, оговоренные в технических условиях.

Против названия технологических операций указывается тип и марка оборудования, параметры режима, наименование необходимых приспособлений и средств контроля.

Пример заполнения технологической карты приведен ниже.

Карта технологического процесса термической обработки

Эскиз и основные размеры				Материал			Д16	
				Твердость поверхности			Сквозное упр.	
				Механические свойства			$\sigma_A = 430$ МПа	
Лист толщина 2 мм								
№	Наименование операций	Оборудование	Садка	Режим			Наименование приспособл.	Контроль
				T, °C	Время, ч	Среда		
1	Гомогенизация	Печь шахтная	Вертикаль	480-500	8	Воздуш.		Контроль температуры
2								

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Авиационные материалы: Справочник. В 9-ти т.: Т. 4. Алюминиевые и бериллиевые сплавы / Под общей ред. Р.Е.Ш а л и н а. Ч: I. М.: ОНТИ, 1982. 627 с.

2. Деформируемые алюминиевые сплавы: Метод. разработка / Куйбышев. авиац. ин-т: сост. Б у н о в а Г.З. Куйбышев, 1990. 64 с.

3. К о л а ч е в Б.А., Л и в а н о в В.А., Е л а г и н В.И. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1980. 280 с.

4. М а л ь ц е в М.В. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1970. 364 с.

5. Структура и свойства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов: Справочник: / Под ред. Л и в а н о в а В.А. М.: Металлургия, 1974. 408 с.

6. К о л п а ш н и к о в А.И. Прокатка листов из легких сплавов. М.: Металлургия, 1979. 264 с.

7. М а с т е р о в В.А., Б е р к о в с к и й В.С. Теория пластической деформации. М.: Металлургия, 1989. 400 с.

8. П о л у х и н П.И., Х е н з е л ь А., П о л у х и н В.П. и т.д. Технология процессов обработки металлов давлением / Под ред. П о л у х и н а П.И. М.: Металлургия, 1988. 408 с.

9. Ж о л о б о в В.В., З в е р е в Г.И. Прессование металлов. М.: Металлургия, 1971. 456 с.

10. Б р м а н о к М.З., К о г а н Л.С., Г о л о в и н о в М.Ф. Прессование труб из алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1976. 321 с.

11. Козка и штамповка: Справочник. В 4-х т.: Т. I. Материалы и нагрев, обсуловование, ковка / Под ред. Семенова Е.И. М.: Машиностроение, 1985. 368 с.

12. К о л а ч е в Б.А., Г а б и д у л и н Р.М., П и г у з о в Ю.М. Технология термической обработки цветных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1980. 280 с.

13. Д о л с т о в Г.П., К о н д а к о в Е.А. Оборудование термических цехов и лабораторий испытания металлов. М.: Машиностроение, 1988. 336 с.

14. С о к о л о в К.Н., К о р о т и ч И.К. Технология термической обработки термических цехов. М.: Металлургия, 1988. 384 с.

15. К о л о б н е в И.Ф. Термическая обработка алюминиевых сплавов. М.: ГИТИ, 1961. 416 с.

16. Ф и р г е р И.в. Термическая обработка сплавов: Справочник. М.: Машиностроение, 1967. 304 с.

17. Т р е т ь я к о в А.в., З ю з и н В.И. Механические свойства металлов и сплавов. 2-е изд. М.: Металлургия, 1973. 224 с.

18. К р о х а В.А. Кривые упрочнения металлов при холодной деформации. М.: Машиностроение, 1968. 131 с.

19. Механические свойства и показатели деформируемости некоторых промышленных металлов и сплавов: Учеб. пособие /А.В.Ю ш к о в; Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1974. 224 с.

Учебное издание

М е л ь н и к о в Алексей Александрович,  
Б у н о в а Галина Захаровна

ТЕХНОЛОГИЯ ТЕРМООБРАБОТКИ  
АЛЮМИНИЕВЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ

Учебное пособие к курсовой работе.

Редактор Л.Я.Ч е г о д а е в а  
Техн.редактор Г.А.У с а ч е в а  
Корректор Т.И.Щ е л о к о в а

Лицензия ЛР № 020301 от 28.11.91 г.

Подписано в печать 15.01.97. Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Бумага газетная. Печать офсетная.

Усл.печ.л. 5,1. Усл.кр.-отт. 5,22. Уч.-изд.л. 5,5.

Тираж 300 экз. Заказ 66. Арт. С-16/96.

Самарский государственный аэрокосмический  
университет имени академика С.П.Королева.  
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

---

ИПО Самарского государственного аэрокосмического  
университета имени академика С.П.Королева.  
443001 Самара, ул. Молодогвардейская, 151.