

Государственный комитет по высшему образованию
Российской Федерации
Самарский ордена Трудового Красного Знамени государственный
аэрокосмический университет им. ак. С.П.Королева

Мельников А.А., Бунова Г.З.

ТЕХНОЛОГИЯ ТЕРМООБРАБОТКИ АЛЮМИНИЕВЫХ
ПОЛУФАБРИКАТОВ

Учебное пособие к
Курсовой работе

г. Самара
2006г.

УДК 669.017:

Мельников А.А., Бунова Г.З. Технология термообработки алюминиевых полуфабрикатов: Учебное пособие к курсовой работе. Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет. 2005г., с.
JSBN 5-7883-0010-X

Излагается содержание, объем и последовательность разработки комплекса вопросов, рассматриваемых при выполнении курсовой работы по дисциплинам "Материаловедение" и "Термическая обработка металлов и сплавов". Описывается фазовый состав и структура сплавов, приводятся основные технологические схемы изготовления различных полуфабрикатов их сортамент и свойства. Анализируется изменение структуры алюминиевых полуфабрикатов в литом состоянии, а также после холодной и горячей пластической деформации. Главное внимание уделено разработке вопросов, связанных с выбором и обоснованием технологических режимов операций предварительной и окончательной термообработки, с выбором необходимого термического оборудования. Приводятся также основные виды брака при термообработке, его причины и виды контроля качества.

Предназначено в качестве учебного пособия для студентов специальности 11.06.

Табл. 23, Ил.64. Библиогр.: 19 назв.

Пособие подготовлено кафедрой "Технология металлов и авиаматериаловедение" Самарского государственного аэрокосмического университета.

Рецензенты: И. П. Попов, В. М. Зайцев

JSBN 5-7883-0010-X

©

Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2005г

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
1.КЛАССИФИКАЦИЯ, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И СТРУКТУРА СПЛАВОВ АЛЮМИНИЯ	7
1.1.Технологическая классификация и маркировка сплавов алюминия	7
1.2.Фазовый состав и структура сплавов	9
2.ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛУФАБРИКАТОВ РАЗЛИЧНОГО ВИДА	22
2.1.Технологическая схема изготовления листов	22
2.2.Технологическая схема изготовления прутков, профилей и труб прессованием	23
2.3.Технологическая схема изготовления полуфабрикатов типа прутков, труб и проволоки с использованием волочения	24
2.4.Технологическая схема изготовления полуфабрикатов штамповкой	26
3.СОРТАМЕНТ ПОЛУФАБРИКАТОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ ИЗ ДЕФОРМИРУЕМЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ	28
3.1.Листы, ленты, плиты, фольга	28
3.2 Профили, прутки	35
3.3.Трубы	38
3.4.Поковки, штамповки и полуфабрикаты, получаемые штамповкой, выдавливанием	41
4.ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В ЛИТОМ СОСТОЯНИИ	42
5.ХОЛОДНАЯ И ГОРЯЧАЯ ОБРАБОТКА ДАВЛЕНИЕМ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ	44
5.1.Влияние деформации на структуру полуфабрикатов	44
5.2.Влияние деформации на свойства полуфабрикатов	48
5.3.Выбор температурного интервала горячей деформации	60
6. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПОЛУФАБРИКАТОВ	75
6.1.Выбор операций термообработки в зависимости от технологической схемы изготовления полуфабрикатов	76
6.2.Фазовые превращения при термообработке алюминиевых сплавов	100
6.3.Изменение структуры при отжиге алюминиевых сплавов после холодной деформации	102
7.ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ	108
7.1.Классификация и конструктивные особенности печей для термообработки алюминиевых сплавов	108
7.2.Комплектование садки и технологические особенности проведения термообработки алюминиевых сплавов	120
7.3.Контроль качества термической обработки алюминиевых полуфабрикатов	122
8.ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА ПРОЦЕССА ТЕРМООБРАБОТКИ	126
Список литературных источников	127

Введение

Выполнение курсовой работы по технологии термообработки является заключительным этапом обучения по курсам "Материаловедение" и "Термическая обработка". Одновременно с этим она является подготовкой к выполнению дипломного проекта.

В настоящее время не существует учебного пособия, в котором бы были собраны все необходимые сведения для выполнения данной курсовой работы. Табличные данные и экспериментальные зависимости приведены в разных справочных пособиях, количество которых явно недостаточно, и поэтому их поиск представляет немалые трудности. В данном пособии сделана попытка собрать справочные данные для выполнения курсовой работы, а также указать дополнительные литературные источники, в которых материал описан достаточно полно.

Последовательность изложения материала в пособии соответствует порядку выполнения курсовой работы.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И СТРУКТУРА СПЛАВОВ АЛЮМИНИЯ

1.1. 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. Одновременно с этим алюминиевые сплавы отличаются высокими литейными свойствами и широко используются в технике для изготовления 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. 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, причём магний, медь и кремний 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 таблице 1, сравнение в маркировке в различных системах в таблице 2.

Химический состав промышленных алюминиевых сплавов приведён в ГОСТ 4784-97, ОСТ 1 90026-80, ОСТ 1 90048-77, а также в справочниках [1,2].

Таблица 1

Классификация промышленных алюминиевых деформируемых
сплавов по основным легирующим элементам

Группа	Система	Марка сплава	Способность к упрочнению термообработкой
1	Al-Mn	АМц	Термообработкой не упрочняется
2	Al-Mg	АМг1	-“-
		АМг2	-“-
		АМг3	-“-
		АМг4	-“-
		АМг5	-“-
		АМг6	-“-
3	Al-Cu-Mn	Д20	Термообработкой упрочняется
		1201	-“-
4	Al-Cu-Mg	Д1	-“-
		Д16	-“-
		Д18	-“-
		Д19	-“-
		В65	-“-
		ВД17	-“-
		АК4-1	-“-
		ВАД1	-“-
5	Al-Mg-Si	АВ	-“-
		АД31	-“-
		АД33	-“-
		АД35	-“-
6	Al-Cu-Mn-Mg-Si	АК4	-“-
		АК6	-“-
		Ак8	-“-
7	Al-Zn-Mg	1915	-“-
		1925	-“-
8	Al-Zn-Mg-Cu	В93	-“-
		В95	-“-
		В96ц	-“-
9	Al-Mg-Li	01420	-“-

Таблица 2

**Маркировка алюминия и алюминиевых сплавов
в различных системах**

Серия	Основные компоненты	Маркировка сплавов				
		ASTM B-209 и ANSI H35288	DIN	1725	Россия	
1	Al	1100	Al	99,0	Cu	АО
		1200	Al	99,0		АО
		1050	Al	99,5		A5
		1060	Al	99,6		A6
		1070	Al	99,7		A7
		1080	Al	99,8		A8
2	Al Cu (Al Cu Mg)	2014	AlCuSiMn		AK8	
		2017	AlCuMg1		Д1	
		2024	AlCuMg2		Д16	
		2618			AK4-1	
3	Al Mn (Al Mg, Al Mn Si)	3003	AlMnCu		АМц	
		3004	AlMn1Mg1		Д12	
		3005	AlMn1Mg0,5		ММ	
		3105	AlMn0,5Mg0,5		ММ	

4	Al Mg (Al Mg Mn)	5005A	AlMg1	AMr1
		5050B	AlMg1,5	AMr1
		5052	AlMg2,5	AMr2
		5252	AlMg2,5	AMr2
		5454	AlMg2,7Mn	AMr2
				AMr3C
		5754	AlMg3	AMr3
		5854	AlMg3	AMr3
		5013	AlMg3	AMr3
		5049	AlMg2Mn0,8	AMr2
		5086	AlMg4Mn	AMr4
		5182	AlMg5Mn	AMr4,5
		5082	AlMg4	AMr4
		5083	AlMg4,5Mn	AMr4,5
		5456	AlMg5	AMr5
		5056	AlMg5	AMr5
5	Al Mg Si (Al Si Mg)	6004	AlMgSi	Ад31*
		6063	AlMgSi	Ад31*
		6101B	EAlMgSiO 5	Ад31
		6061	AlMg1SiCu	Ад33
		6062		
		6082	AlMgSi1	Ад35
		6003		Ад35*
		6066		Ад35*
6	Al Zn	6151		AB
		7019		1915
		7072	AlZn1	Ац*
		7075	AlMgCu1,5	B95

*- имеются незначительные отличия по содержанию примесей.

1.2. Фазовый состав и структура сплавов

В равновесном состоянии алюминиевые сплавы представляют собой низколегированный твёрдый раствор с включениями интерметаллидных фаз. К числу основных интерметаллидных фаз относятся CuAl_2 (θ -фаза), Mg_2Si , Al_2CuMg (S-фаза), Al_6CuMg_4 , Al_3Mg_2 (β -фаза), $\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3$ (T-фаза), $\text{Al}_x\text{Mg}_5\text{Cu}_4\text{Si}_4$ (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.1-14, а их описание в источниках [3-5].

К системе Al-Cu-Mg-Si относится до 80% 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 $S - Al_2Cu - W - Mg_2Si$, а после закалки и искусственного старения соответственно $W - S - Al_2Cu - Mg_2Si$. Фазы T , Al_3Mg_2 и Si можно считать не дающими эффекта упрочнения.

Основные упрочняющие фазы в системах $Al-Cu$ и $Al-Cu-Mg$ S -фаза и Al_2Cu (θ -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 $MgZn_2$ (η -фаза) и $Al_2Mg_3Zn_3$ (T -фаза), значительно меньшую роль играет соединение Al_2CuMg (S -фаза).

Структура алюминиевых сплавов представляет собой светлые зёрна α -твёрдого раствора с выделениями интерметаллидных фаз, как в центре зёрен, так и по их границам, причём иногда в виде эвтектики. Конфигурация и ориентировка зёрен, а также размер выделений упрочняющих фаз зависит от технологии переработки того или иного вида полуфабриката и его термической обработки.

Диаграмма состояния системы Al-Si

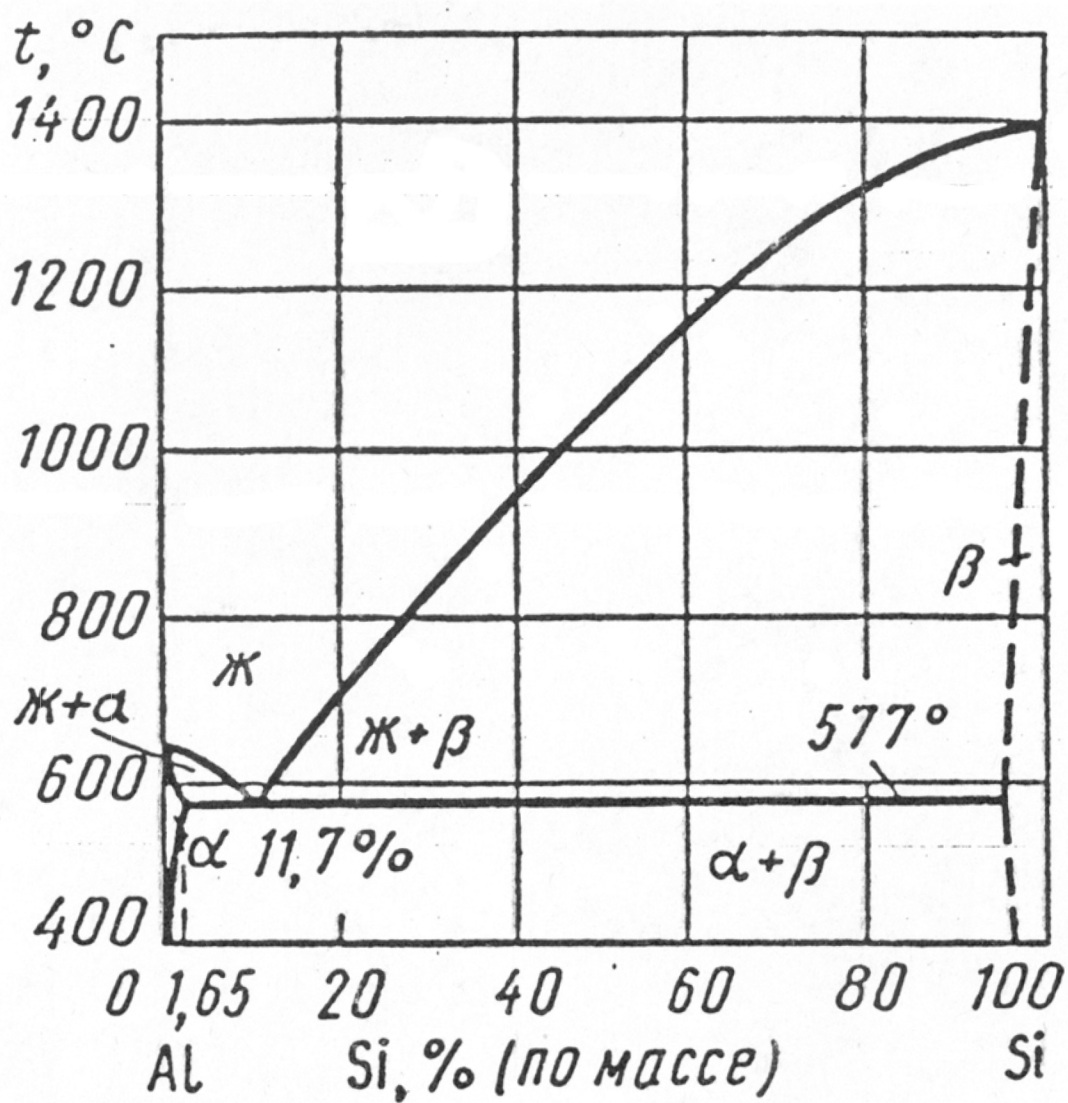


Рис.1

Диаграмма состояния системы Al-Mn

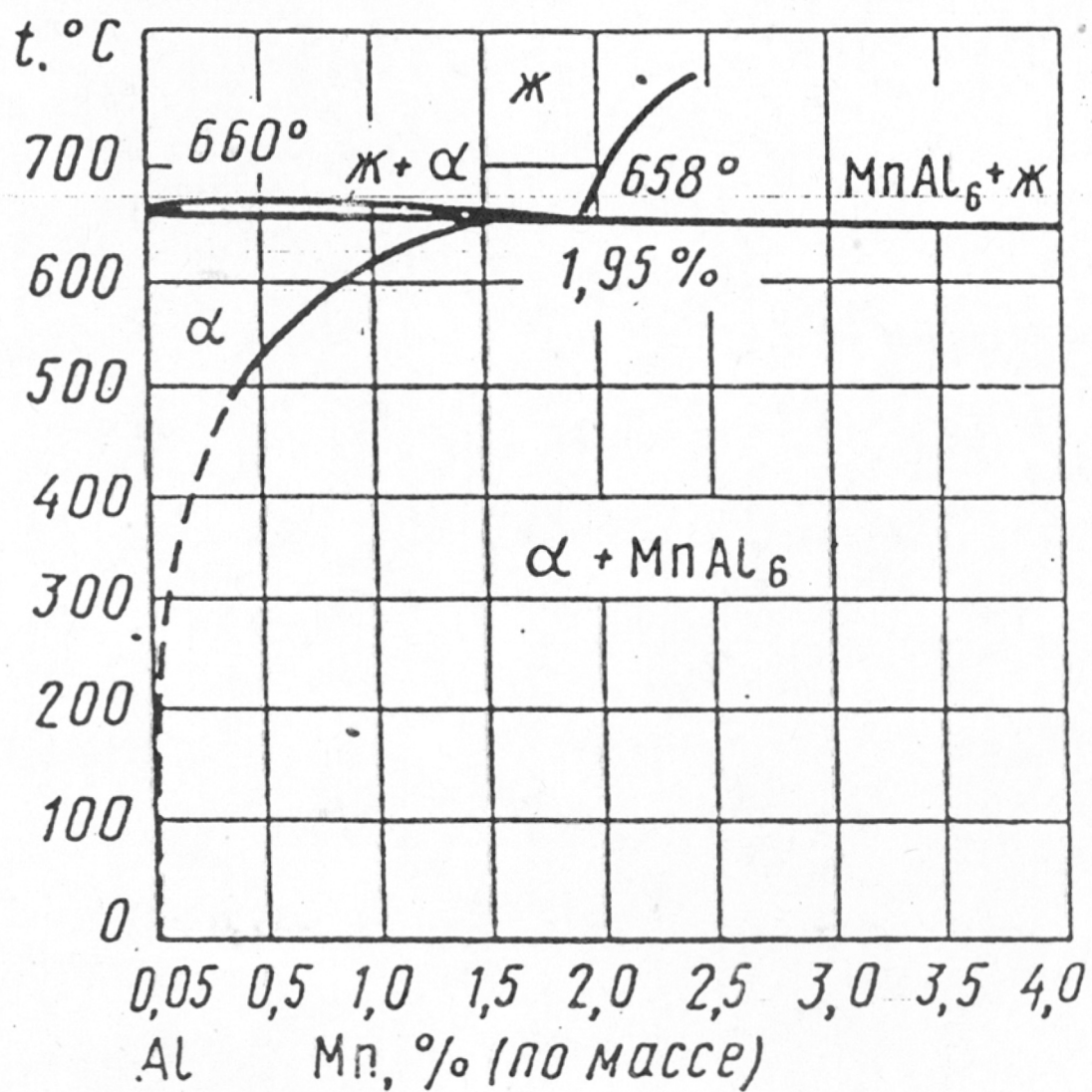


Рис.2

Диаграмма состояния системы Al-Mg

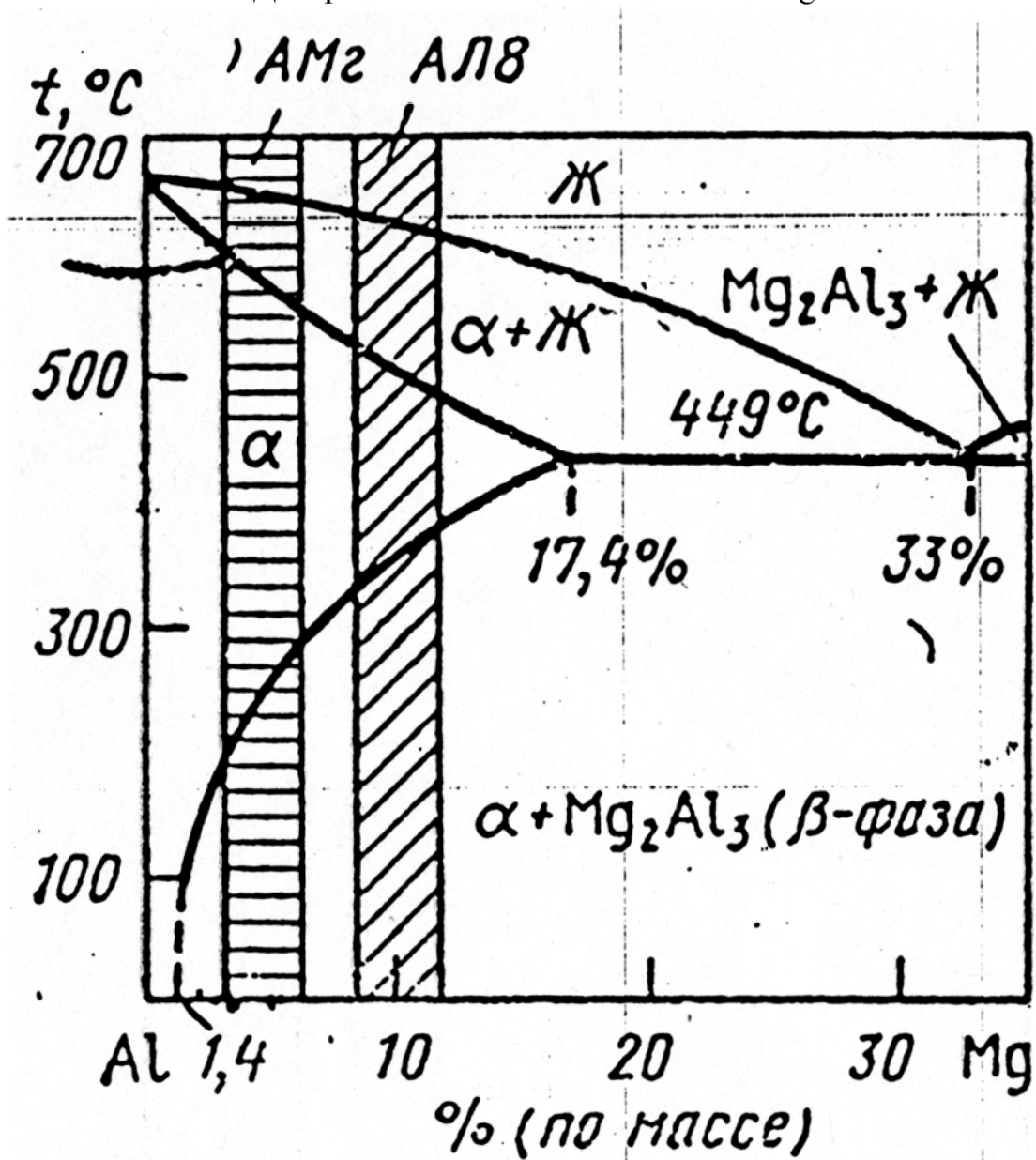


Рис.3

Диаграмма состояния системы Al-Cu

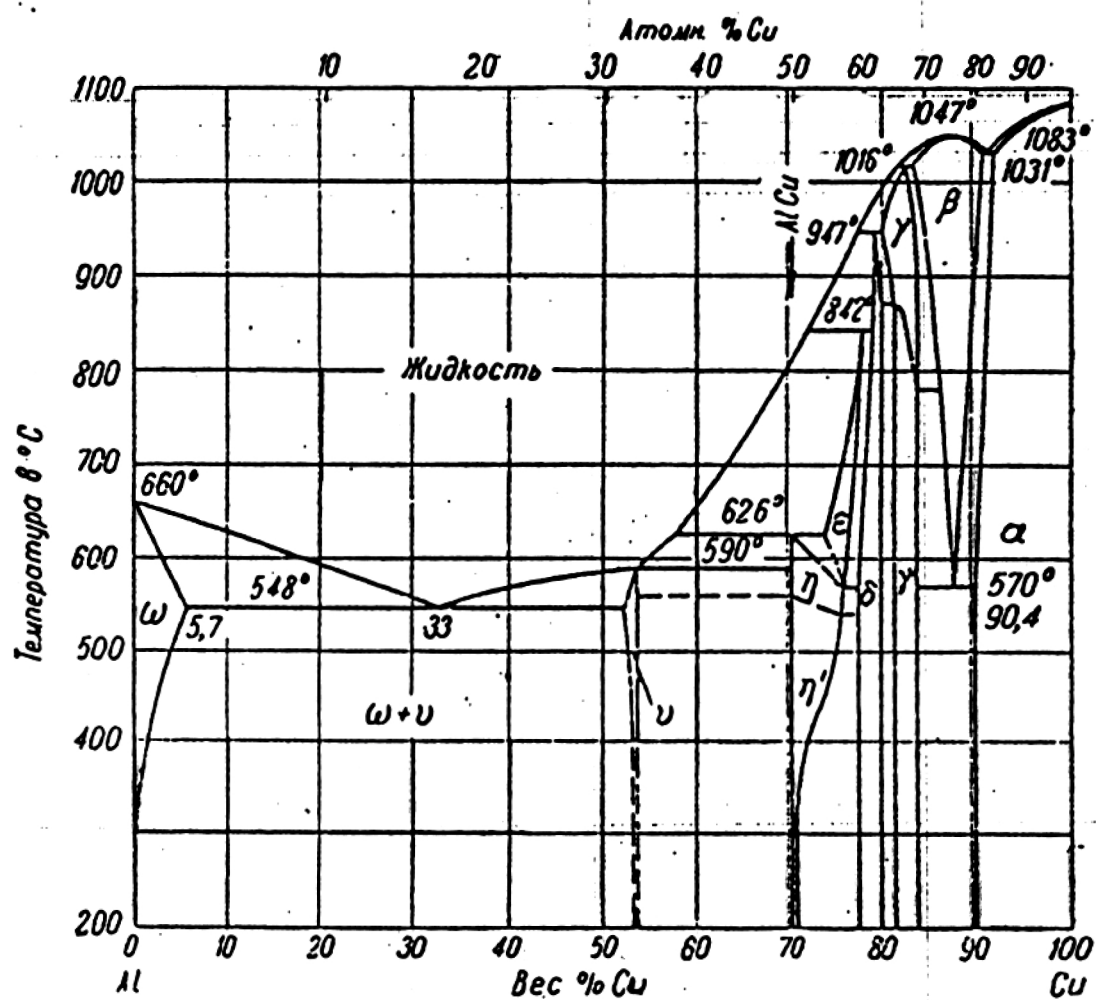


Рис.4

Диаграмма состояния системы Al-Zn

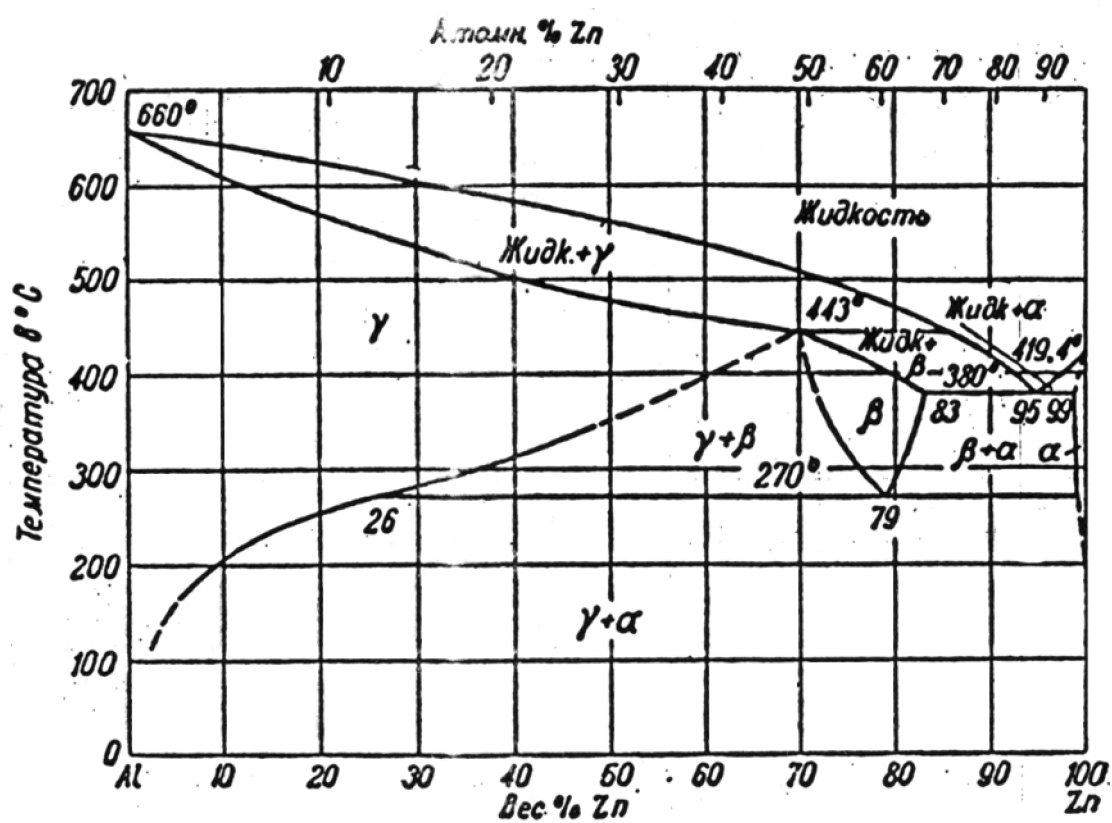


Рис.5

Диаграмма состояния системы Al-Fe

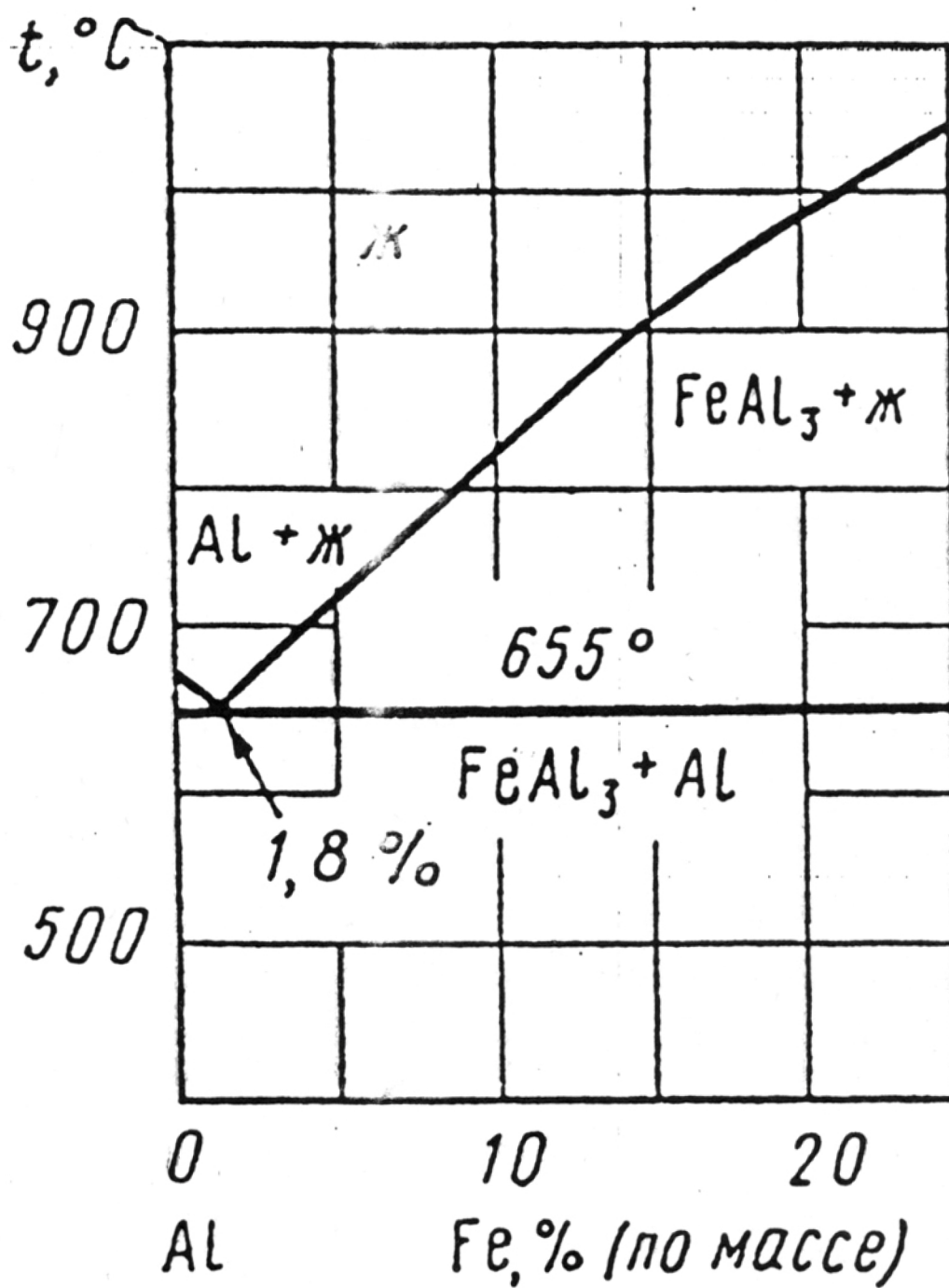


Рис.6

Диаграмма состояния системы Al-Li

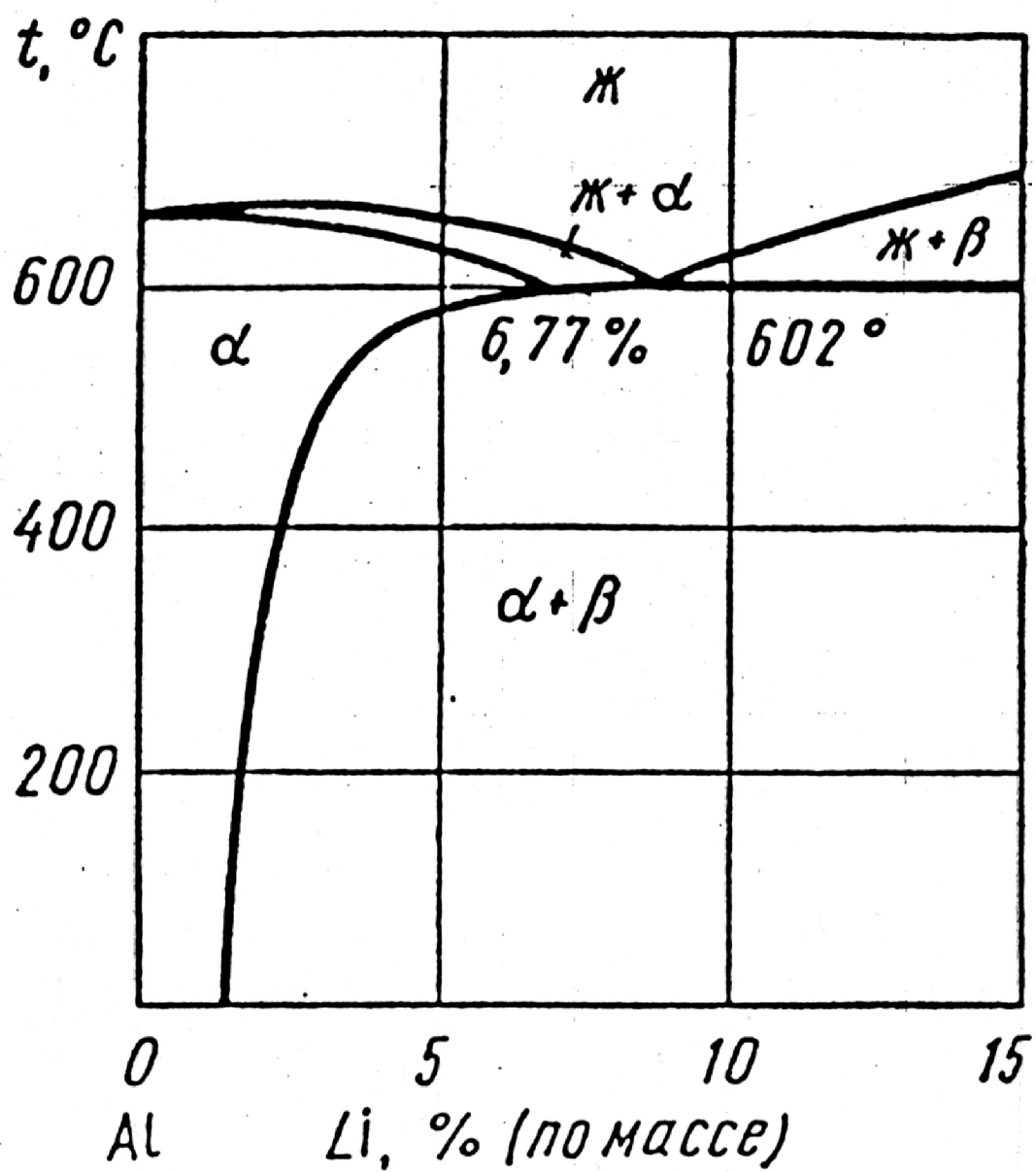
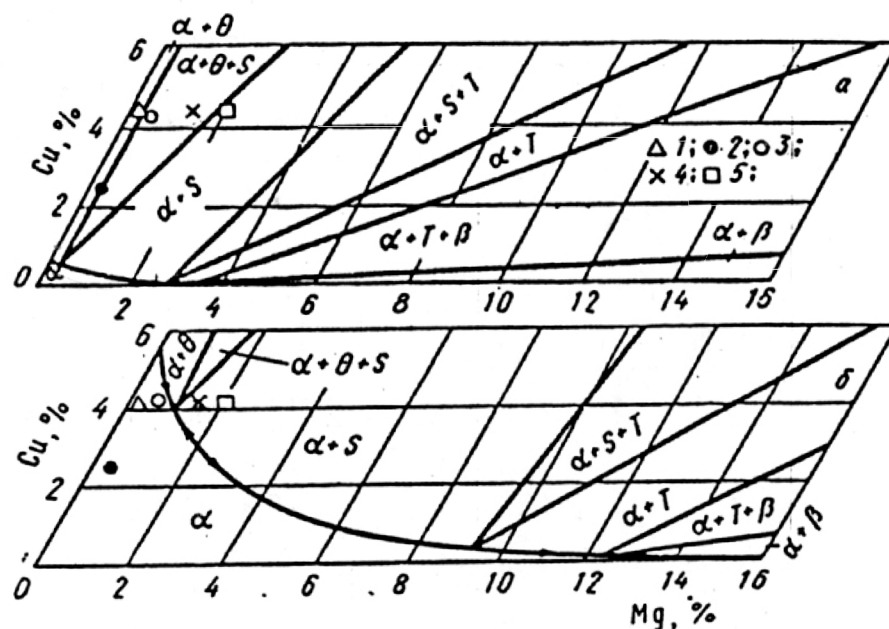


Рис.7

Диаграмма состояния системы Al-Cu-Mg

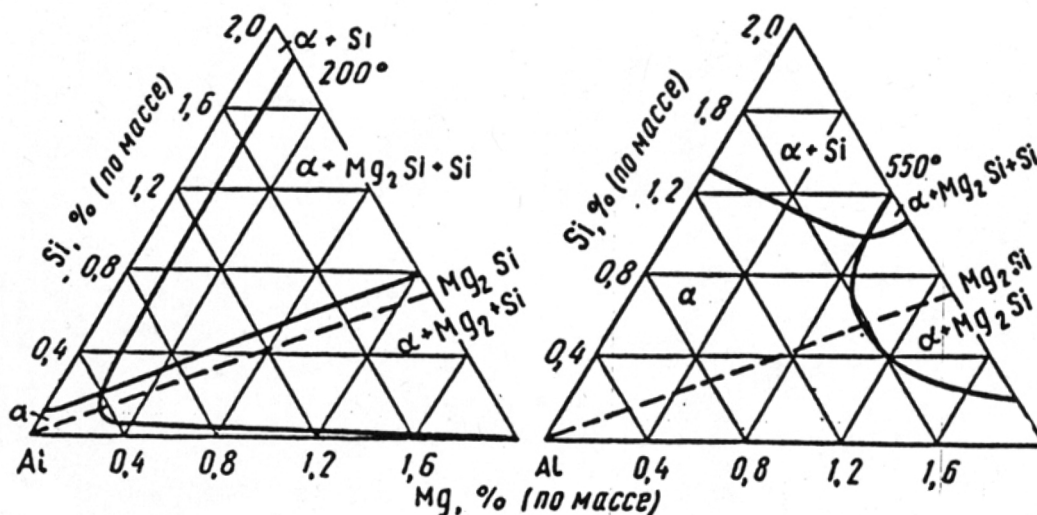


Δ -1 $\bullet$ -2 $\circ$ -3 $\times$ -4 $\square$ -5

а - изотермическое сечение при 200⁰С;
 б - политермическая кривая максимальной растворимости компонентов в алюминии;
 1 - В65; 2 - Д18; 3 - Д1; 4 - Д16; 5 - Д19.

Рис.8

Диаграмма состояния системы Al-Mg-Si



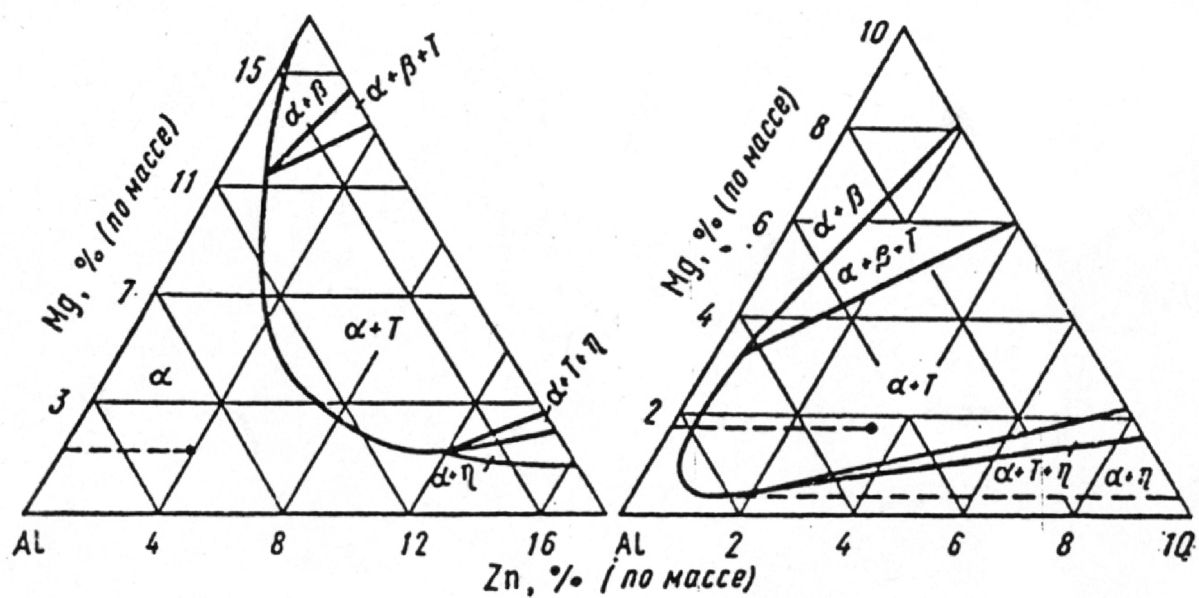
а

б

а - изотермическое сечение при 200⁰С;
 б - изотермическое сечение при 550⁰С.

Рис.9

Диаграмма состояния системы Al-Zn-Mg



а - изотермическое сечение при 400°C;
 б - изотермическое сечение при 200°C.

Рис.10

Диаграмма состояния системы Al-Mn-Cu

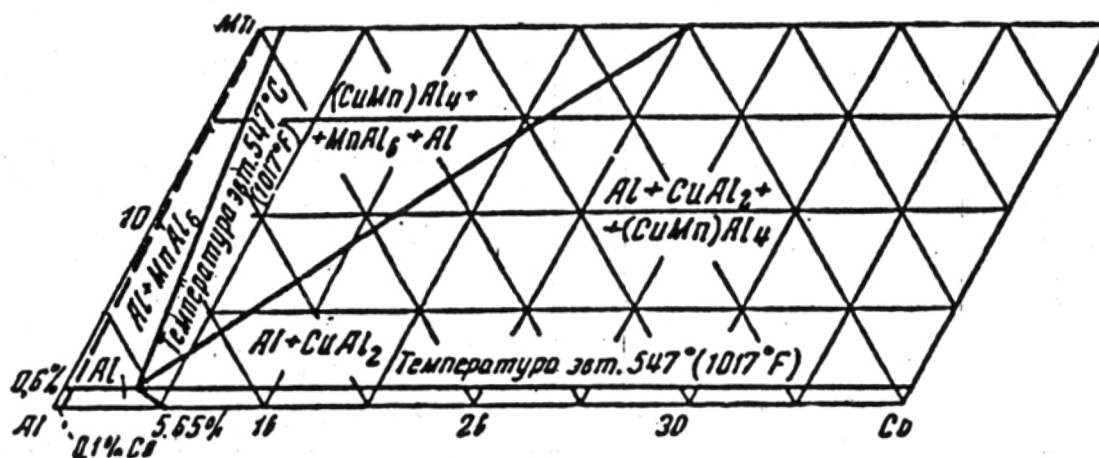
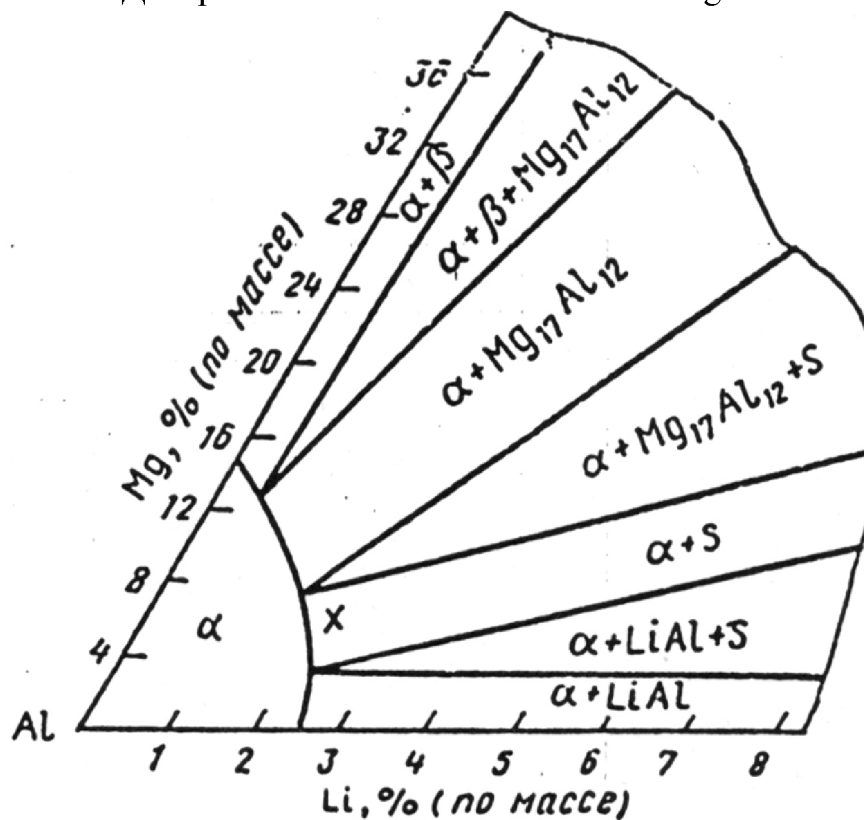


Рис.11

Диаграмма состояния системы Al-Mg-Li

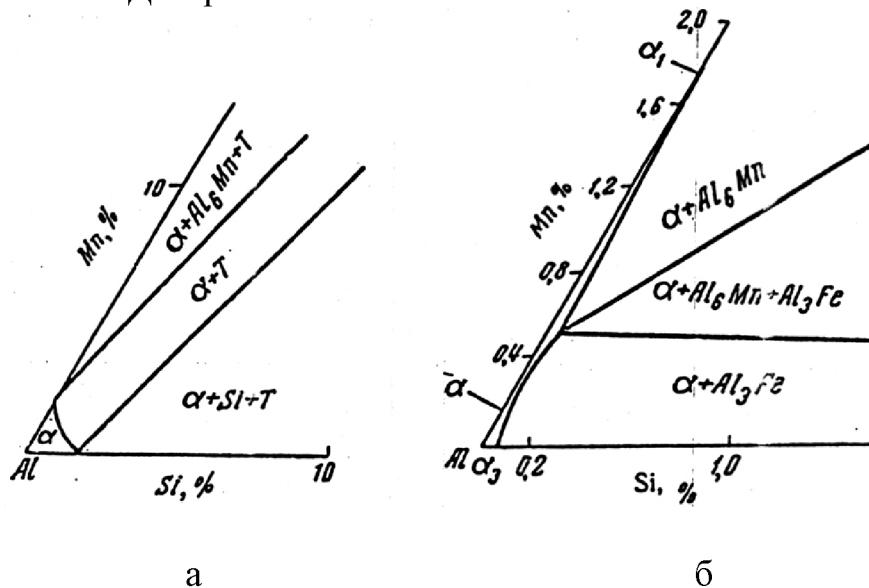


изотермическое сечение при 430°C;

X - сплав 01420

Рис.12

Диаграмма состояния системы Al-Mn-Si



а

б

а - после затвердевания;

б - при температуре плавления тройной эвтектики.

Рис.13

Треугольник соотношения концентраций и фазового состава системы Al-Cu-Mg-Si

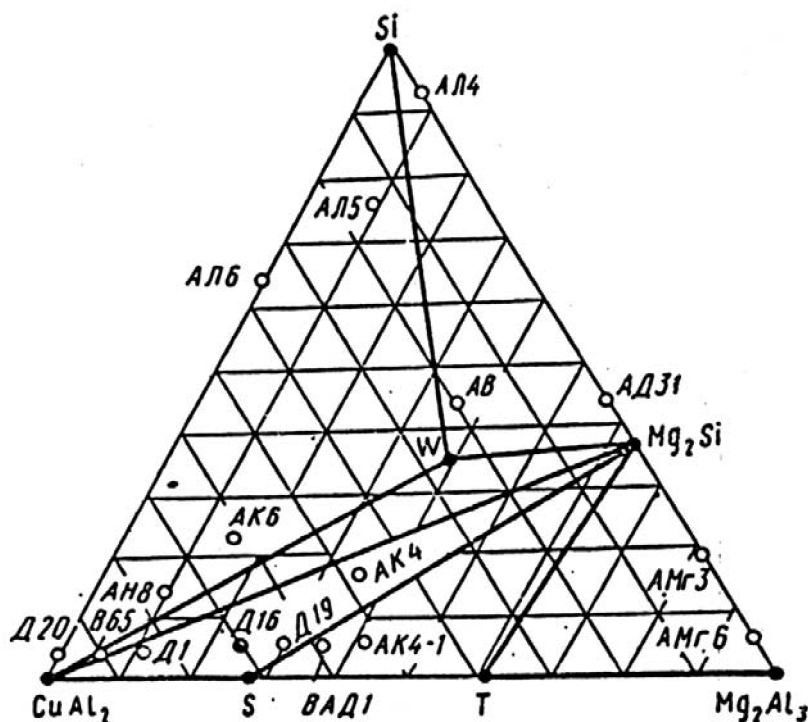


Рис.14

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.

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

Технологическая схема процесса прокатки

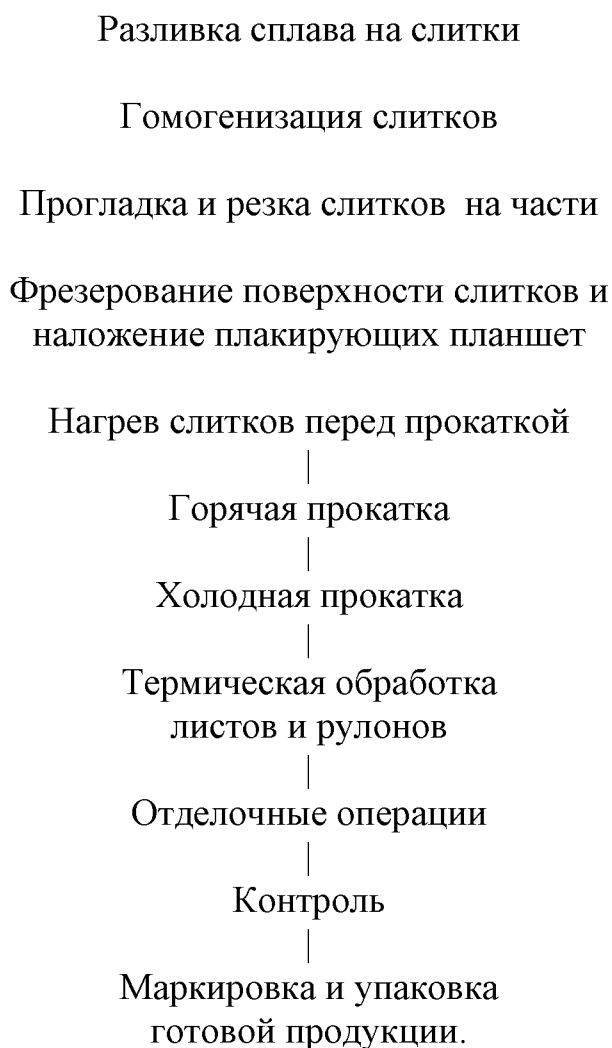


Рис.15

К подготовительным операциям перед горячей прокаткой относят прогладку и правку слитков, резку на заготовки с обрезкой концов, фрезерование поверхности, наложение плакирующих планшет при необходимости получения плакированных 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 их поперечных сечений.

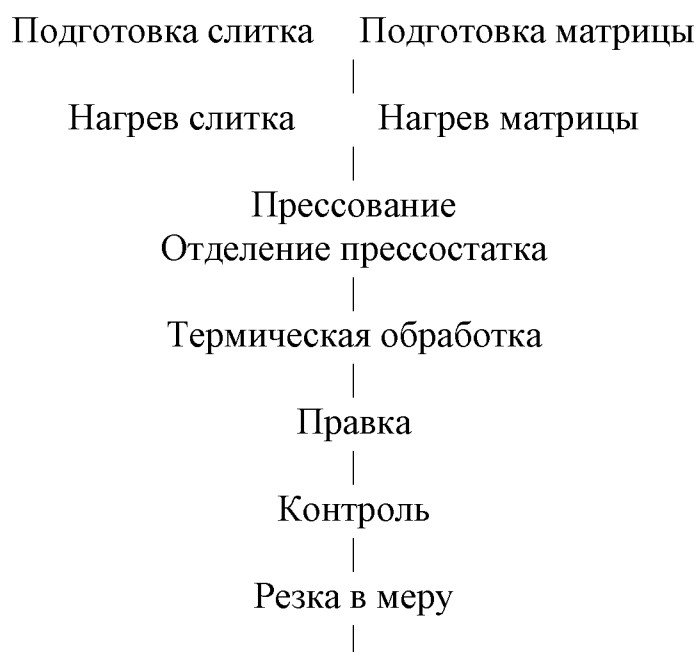
Сущность процесса заключается в выдавливании металла из замкнутой полости (контейнера) через отверстие рабочего инструмента (матрицы). Заготовкой в процессе прессования также является слиток, полученный способом полунепрерывного литья, причем для труб он должен быть полым. Прессование производится на вертикальных или чаще горизонтальных гидравлических прессах с предварительным нагревом заготовки в печи.

Общая технологическая схема процесса прессования представлена на рис.16.

В зависимости от способа прессования, вида прессизделия 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].

Типовая технологическая схема производства полуфабрикатов прессованием



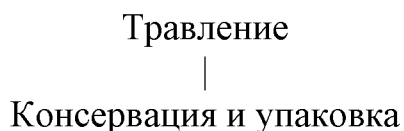
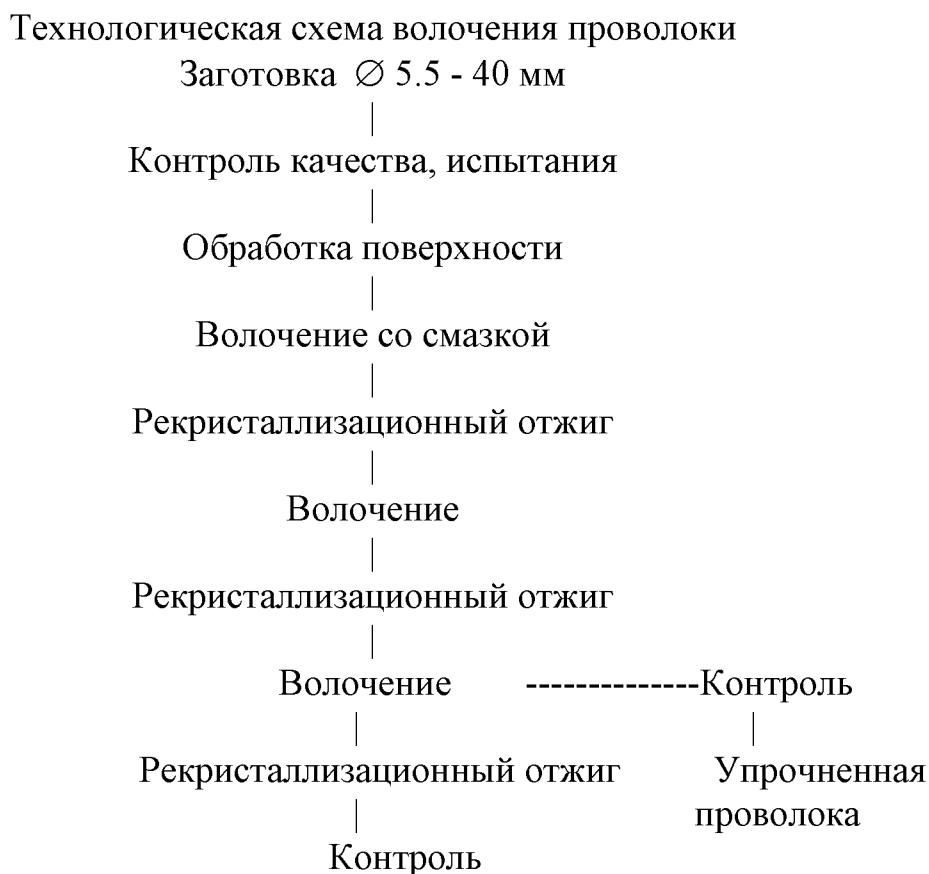


Рис.16

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 прутки диаметром от 4.0 до 5.5мм, полученный прессованием или прокаткой. Технологическая схема производства проволоки волочением приведена на рис.17.



Отожженная проволока

Рис.17

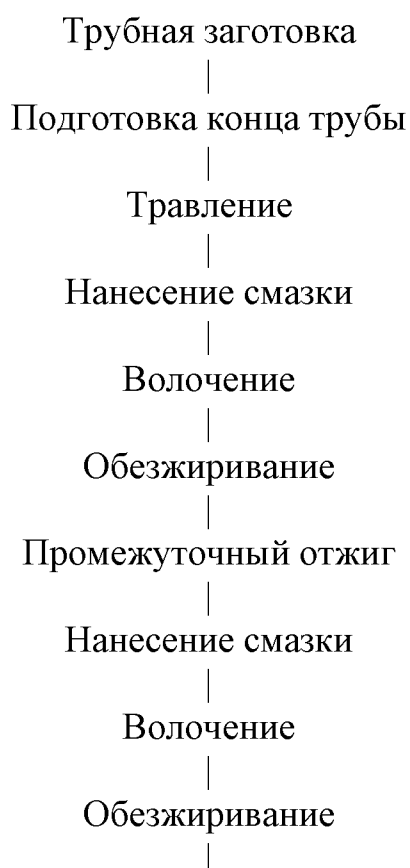
Волочение труб применяется при необходимости получения высокоточной продукции. В качестве заготовок применяют бесшовные трубы, полученные прессованием, а также сварные трубы. Перед волочением конец трубы длиной 100-200 мм обжимается, уменьшается в диаметре, чтобы его можно было провести через волоку. 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

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

Подробно процесс волочения рассмотрен в источниках [8,10]

Технологическая схема волочения труб



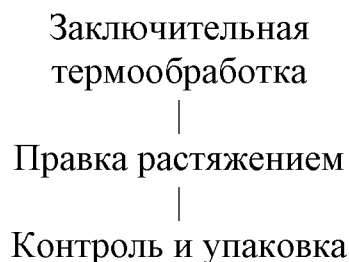


Рис.18

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, малоотходность.

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

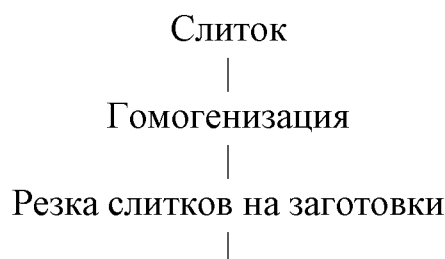
Заготовкой для штамповки алюминиевых деформируемых сплавов является обычно литой круглый слиток или промежуточная прессованная заготовка преимущественно круглого сечения. В некоторых случаях используют катаную заготовку, либо фасонную заготовку, полученную профилированием в вальцах.

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 [5,7,11].

Технологическая схема штамповки



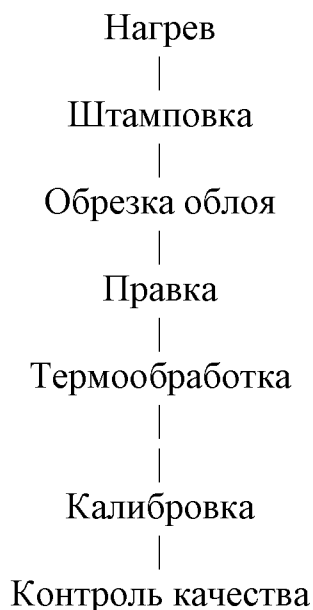


Рис.19

3. СОРТАМЕНТ ПОЛУФАБРИКАТОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ ИЗ ДЕФОРМИРУЕМЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Под полуфабрикатами из цветных сплавов понимают заготовки, полученные при деформации, имеющие заданное состояние и определённые 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 (горячекатанные), либо после холодной прокатки (холоднокатанные), фольгу - после холодной прокатки. Листами называют катанные 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 катанные 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 3 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 таблице 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 таблицах 4 и 5 приведены механические свойства образцов, вырезанных из горячекатаных листов и плит в направлении поперёк прокатки.

Таблица 3

Сортамент листов и плит, получаемых горячей прокаткой

Марка сплавов	Состояние листов	Толщина, мм	Длина (мах), мм
АД00, АД0, АД, АД1, АВ, АМц, АМг2, АМг3, АМг5, АМг6, Д1, Д2, Д19, Д20, В95, АК4-1	ГК (без ТО)	4 – 80	10000- 30000
АД00, АД0, АД, АД1, АВ, АМц, АМг2, АМг3, АМг5, АМг6, Д1, Д16, Д19, Д20, В95, АК4-1	М	4 – 10	7000
АД00, АД0, АД, АД1, АМц, АМг2, АМг6	Н	4 – 10	7000
АМц, АМг2, АМг3	Н2	4 – 10	7000
АВ, Д1, Д16, В92, В95, АК4-1	Т	4 – 10 11- 80	7000 10000- 30000
Д16	ТН	5 – 10	7000

Примечание. Ширина листов 1200-2000 мм.

Таблица 4

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

Марка сплава	Состояние	Толщина, мм	σ_B , МПа не менее	δ , %
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
	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	200	18
		5,1 – 10	180	16
	Т1	<5	300	10
		5,1 – 10	300	8
АМг	ГК	1 – 25	180/300	14/ 7
		26 – 40	170/290	12/ 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 твёрдых алюминиевых сплавов

Марка Сплава	Состоя- ние	Толщина, мм	σ_B , МПа	σ_{02} , МПа	δ , %
Амг3	М	5 – 10	190	80	15
	Н2	5 – 10	220	180	6
	ГК	5 – 6	190	80	12
		6,1 – 10,5	190	80	15
		11 – 25	180	70	12
		26 – 50	170	60	11
Амг5	М	5 – 10	280	130	15
	ГК	5 – 6	280	130	12
		6,1 – 10,5	280	130	15
		11 – 25	270	120	13
		26 – 50	260	110	12
Амг6	М	5 – 10	320	160	15
	Н	5 – 10	380	280	6
	ГК	5 – 10,5	320	160	15
		11 – 25	310	150	11
		26 – 50	300	140	6
		51 – 80	280	130	4
Д1А	М	5 – 10	240	-	12
	Т	5 – 10	380	200	15
	ГК	5 – 10,5	360	190	12
		11 – 25	380	220	11
		26 – 40	340	200	8
		41 – 70	320	200	6
		71 – 80	290	200	4
Д16А	М	5 – 10	240	--	10
	Т	5 – 6	435	280	11
		6,1 – 10	435	280	10
		5 – 7,5	465	350	8
	ГК	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	5 – 10	240	--	10

Продолжение таблицы 5

Марка Сплава	Состоя- ние	Толщина, мм	σ_B , МПа	σ_{02} , МПа	δ , %
Д16	Т	5 – 6	450	290	11
		6,1 – 10	450	290	10
	ТН	5 – 7,5	485	365	8
Д19А	М	5 – 10	240	-	10
	Т	5 – 6	415	270	11
		6,1 – 10	415	270	10
		5 – 10,5	410	250	10
	ГК	11 – 25	430	280	7
		26 – 40	400	260	5
		41 – 70	380	250	4
		71 – 80	350	250	3
Д20А	М	5 – 10	240	-	15
	Т	5 – 10	280	-	12
	Т1	5 – 10	380	280	8
	ГК	5 – 10,5	280/370	-/260	12
		11 – 25	280/380	-/280	12/
		26 – 80	280/380	-/280	12/
В95А	М	5 – 10	250	-	10
	Т1	5 – 10,5	500	420	6
		5 – 10,5	500	420	6
		11 – 25	500	420	4
		26 – 40	500	420	3
		5 – 6	530	460	6
	Т1	6,1 – 10	530	460	5
АК4 – 1А	М	5 – 10	250	-	15
	Т1	4 – 10	395	320	6
		11 – 80	400	330	6

Примечание. 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 Т1.

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 холоднокатанных листов из мягких и твёрдых алюминиевых сплавов приведены в таблицах 6 и 7.

Таблица 6

Механические свойства холоднокатанных листов
из мягких алюминиевых сплавов

Марка сплава	Состояние	Толщина, мм	σ_b , МПа не менее	δ , %
АД00, АД0	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
Амг2	М	0,5 – 1,0	170 – 240	16
		1,1 – 4,5	170 – 240	18
	Н2	0,5 – 1,0	240	4
		1,1 – 4,5	240	6
	Н	0,5 – 1,0	270	3
		1,1 – 4,5	270	4
АВ	М	0,5 – 4	< 150	20
	Т	0,5 – 4,5	200	18
	Т1, Т2, Т3	0,5 – 4,5	300	10

Таблица 7

Механические свойства холоднокатанных листов
из твёрдых алюминиевых сплавов

Марка	Состояние	Толщина, мм	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	σ_{02} , МПа не менее	δ , %
АМг3	М	0,5 – 4,5	200	100	15
	Н2	0,5 – 4,5	240	200	7
АМг5	М	0,5 – 4,5	280	150	15
АМг6	М	0,5 – 4,5	320	160	15
	Н	1,5 – 4,5	380	180	6
Д1	М	0,5 – 1,9	<230	-	12
		2,0 – 4,5	<240	-	12
	Т	0,5 – 1,9	370	190	15
Д16Б		2,0 – 4,5	280	100	15
		0,5 – 4,5	240	-	10
	Т	0,5 – 1,5	450	295	13
		1,6 – 4,5	450	295	11
	ТН	1,5 – 3,0	485	365	10
Д16А		3,1 – 7,5	485	365	8
		0,5 – 1,9	<230	-	10
	Т	2,0 – 4,5	<240	-	10
		0,5 – 1,5	415	375	13
	ТН	2,0 – 4,5	435	280	11
Д16У		1,5 – 1,9	435	340	10
		2,0 – 4,5	465	350	8
	М	0,5 – 1,9	<230	-	10
		2,0 – 4,0	<240	-	10
	Т	0,5 – 1,9	370	235	13
Д19А		2,0 – 4,0	415	275	13
		0,5 – 1,9	<230	-	10
	Т	2,0 – 4,5	<240	-	10
		0,5 – 1,9	400	255	13
Д19У		2,0 – 4,5	415	270	11
		0,5 – 1,9	<230	-	10
	Т	2,0 – 4,0	<240	-	10
		0,5 – 1,9	360	225	13
Д20А	М	2,0 – 4,0	400	255	13
		0,5 – 4,5	<240	-	15
	Т	0,5 – 4,5	280	-	12
В95А	Т1, Т2, Т3	0,5 – 4,5	380	280	8
	М	0,5 - 4,5	<250	-	10

АК4 - 1	Т1, Т2, Т3	0,5 – 1,9	490	410	7
		2,0 – 4,5	500	420	7
		1,2 – 4,5	530	460	6
	М	0,5 – 4,5	<250	-	12
	Т1, Т2, Т3	0,5 – 4,5	395	320	6

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).

3.2 Профили, прутки

Прессованные полуфабрикаты производятся из различных сортов технического алюминия, а также из сплавов упрочняемых и неупрочняемых термообработкой (ГОСТ 4784-97).

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 21488-97, согласно которым пресс-изделия могут быть изготовлены закалёнными и естественно состаренными (Т), закалёнными и искусственно состаренными (Т1), не полностью закалёнными и искусственно состаренными (Т5), отожжёнными (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 ГОСТ 1-92016-72. Прутки диаметром от 5 до 12 мм выпускают размерами через 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 таблице 8.

Таблица 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 таблицах 8 и 9 представлены характеристики профилей и панелей, выпускаемых отечественной промышленностью.

Таблица 9

Характеристика профилей, выпускаемых отечественной промышленностью

Параметры	Тип профиля			
	Сплошно-го постоянного сечения	Полый прессуемый в комб. матрицу	Полый прессуемый по трубному методу	Периодического сечения с законцовкой*
Площадь поперечного сечения, мм	30 – 50000	30 – 20000	До 600	100-6500
Диаметр описанной окружности	до 600	до 300	20 – 550	до 25000
Длина, мм	>15	>15	до 15	до 15
Масса 1 шт, кг	>1500	>600	>800	>15

* Площадь поперечного сечения основной профильной части с законцовкой.

Таблица 10

Размеры панелей, выпускаемых промышленностью

Панели, прессуемые в плоском варианте		Панели, прессуемые по трубному методу	
Ширина, мм	Минимальная толщина полки, мм	Ширина, мм	Минимальная толщина, мм
350 – 520	3,5 – 4,0	От 750 до 950 1500 - 1650	3
520 – 780	4,0 – 5,0		5 – 5,5
780 – 1000	6,0 – 10		

3.3. Трубы

Трубы изготавливаются из алюминиевых сплавов, упрочняемых и неупрочняемых термообработкой.

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 зависят 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, ОСТ1-90038-71, из алюминиевых сплавов изготавливают трубы диаметром от 6 до 120 мм, причём диаметром 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 таблице 11.

Таблица 11

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 размерами отличающиеся 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 трубы. 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 закалённом состоянии на 20-40 МПа ниже, чем у тянутых. Сварные трубы из Д1 и Д16 поставляются с наружной и внутренней плакировкой.

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 объёма последующей механической обработки делятся на 3 группы:

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

Штамповки из алюминиевых сплавов достигает площади 3,9м², массы 1,5т и длины 6,5м.

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

Раскатные кольца, получаемые на точных кольцепрокатных станах имеют большой разбег по диаметру до 3800мм при любой толщине. Большие кольца могут быть так же 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.

Таблица 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 и 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

Таблица 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
Ребристые детали с преимущественным расположением металла вдоль одной оси	Балки центропланов, перекладены, траверсы, опорные стойки, лонжероны, нервюры и т.д.	Длина до 8000мм, ширина до 800 мм, высота до 200 мм
Детали типа лопастей и лопаток с плавным переходом от одного сечения к другому по всему периметру	Лопастей самолетов, крупные лопатки двигателей и т. д.	Длина до 4800 мм, ширина до 800 мм
Детали типа панелей	Панели, плоские детали вафельного типа с односторонним и двусторонним оребрением, закрывки и т. д.	Длина до 2500 мм, ширина до 1500 мм
Ребристые детали с произвольным наружным контуром в плане с центральным открытым или закрытым отверстием	Подмоторные рамы, полурамы, дуги, детали коробчатого типа с двусторонним оребрением или односторонним оребрением	Длина до 2000 мм, ширина до 1500 мм, высота до 300 мм
Пустотелые детали, симметричные вдоль продольной оси, круглого или квадратного сечения, имеющие иногда в плане небольшие отрезки	Цилиндры, крупные стаканы с небольшими бобышками, пустотелые валы, втулки, поршни, кольца, полукольца и Т.д.	Цилиндры: диаметр до 250мм, высота до 2500мм, толщина стенки 10-140 мм. Валы: диаметр фланца до 500мм, длина до 2000мм. Кольца: диаметр
Наименование	Типовые детали	Размеры

Детали типа дисков	Диски, диски с цапфами, диски типа чашек, крыльчатки, фланцевые крышки и т. д.	до 4200 мм, высота до 300 мм, толщина до 50 мм Наружный диаметр до 1100 мм, высота в ступице до 400 мм
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 Длина до 1000мм
Детали цилиндрической или другой формы с компактным размещением масс	Пустотелые валы двигателей	

4.ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В ЛИТОМ СОСТОЯНИИ

В слитках, служащих обычно исходной заготовкой для производства деформированных полуфабрикатов, часто встречаются характерные для литого материала дефекты:

- 1) разнотекучность;
- 2) ликвационная неоднородность;
- 3) усадочная и газовая пористость;
- 4) 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, которого и размер определяется условиями кристаллизации. Между ветвями дендритов располагаются выделения интерметаллидных фаз, которые могут быть мелкими или крупными в зависимости от толщины ветвей дендритов. 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. Её особенности заключаются в следующем:

1) легирующие элементы и примеси неравномерно распределены по объёму 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 равновесной 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, что является результатом обратной зональной ликвации. Он устраняется фрезеровкой поверхности слитка. Дендритная ликвация может быть устранена гомогенизационным отжигом.

Усадочная и газовая пористость в незначительных размерах может 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 часть газовых пор. Сохраняются 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 поковках, штамповках и плитах. Повышение степени деформации при обработке давлением в большинстве случаев (за исключением прессования) способствует развитию деформационных расслоений. Повышение же равномерности деформации и уменьшение ее скорости уменьшают вероятность образования расслоений. Рекомендуется также понижать температуру деформации. На пластичность металла при горячей и холодной деформации большое влияние оказывает ликвация и тип зёрненной 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 местом возникновения трещин являются плоскости двойникования веерных кристаллов. Конечные свойства полуфабрикатов существенно зависят от величин зерна в слитке, особенно тогда, когда в полуфабрикате деформируются не рекристаллизованная 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 деформации исходная микроструктура слитков изменяется, и деформированные полуфабрикаты приобретают следующие 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 появляется 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 [110]. Начинается скольжение в наиболее благоприятно ориентированные по отношению к внешней силе зерна, а затем, по мере роста напряжения, оно распространяется на все остальные зерна. Сдвиговая деформация сопровождается закономерным поворотом кристаллической решетки зерен относительно внешних сил. Кроме того, каждое зерно испытывает воздействие соседних зерен, заставляющих 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 текстуры 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 $[xyz]$ вдоль направления главной деформации, но вокруг направления $[xyz]$ зерна занимают произвольное положение. Для характеристики аксиальной текстуры указывают индексы направлений, совпадающих с осью 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) [112]. Это означает, что

кристаллографические плоскости (110) большинства зерен параллельны плоскости листа, а направление [112] 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 начинается 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°C . 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 проходит полигонизация. Размер образующихся субзерен (полигонов) составляет 1-5 мкм, а углы их разориентации 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 криволинейные из-за наличия включений упрочняющих фаз. А внутренние объемы субзерен содержат некоторое количество дислокаций, закрепленных на интерметаллидных частицах.

Из-за процесса полигонизации плотность дислокации 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. повышается 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 условиях чисто холодной деформации можно приближенно описать эмпирической формулой:

$$\sigma_T = C\varepsilon^m \quad (1)$$

где σ_T - истинное напряжение;

C - напряжение, отвечающее деформации, равной единице;

ε - истинная или логарифмическая деформация;

m - показатель степени деформационного упрочнения.

С достаточной точностью можно утверждать, что все сплавы в области деформаций, применяемых 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 предварительно нагартованного материала с деформацией ε_0 принимает вид:

$$\sigma_T = C(\varepsilon_0 + \varepsilon)^m \quad (2)$$

Подобная зависимость имеет место для горячедеформированного материала. Характеристики наклепа существенно меняются с температурой. Упрочнение уменьшается по мере повышения температуры и практически отсутствует при температуре 370⁰С. При горячей деформации упрочнение ограничивается начальной стадией. По мере роста напряжений в металле развиваются и усиливаются процессы разупрочнения, аналогичные тем, которые происходят при отжиге. Но в отличие от процессов, протекающих при отжиге, 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 деформации на механические свойства алюминиевых сплавов [17-19].

Влияние степени деформации на механические свойства
сплава А00

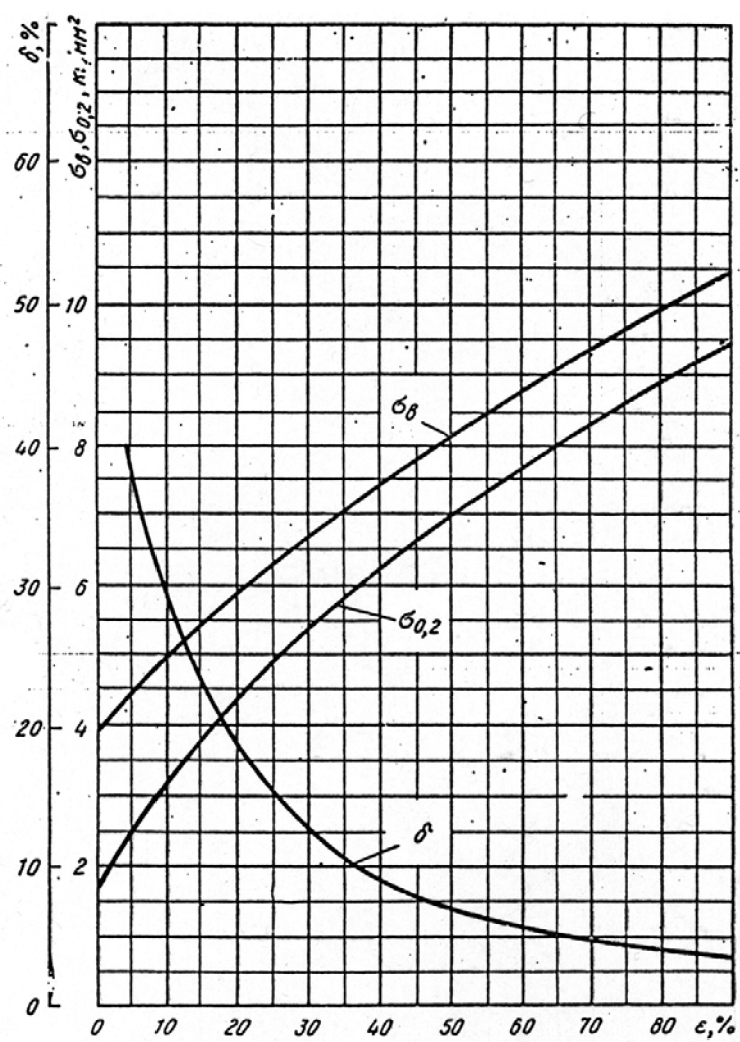


Рис.20

Влияние степени деформации на механические свойства
сплава А1

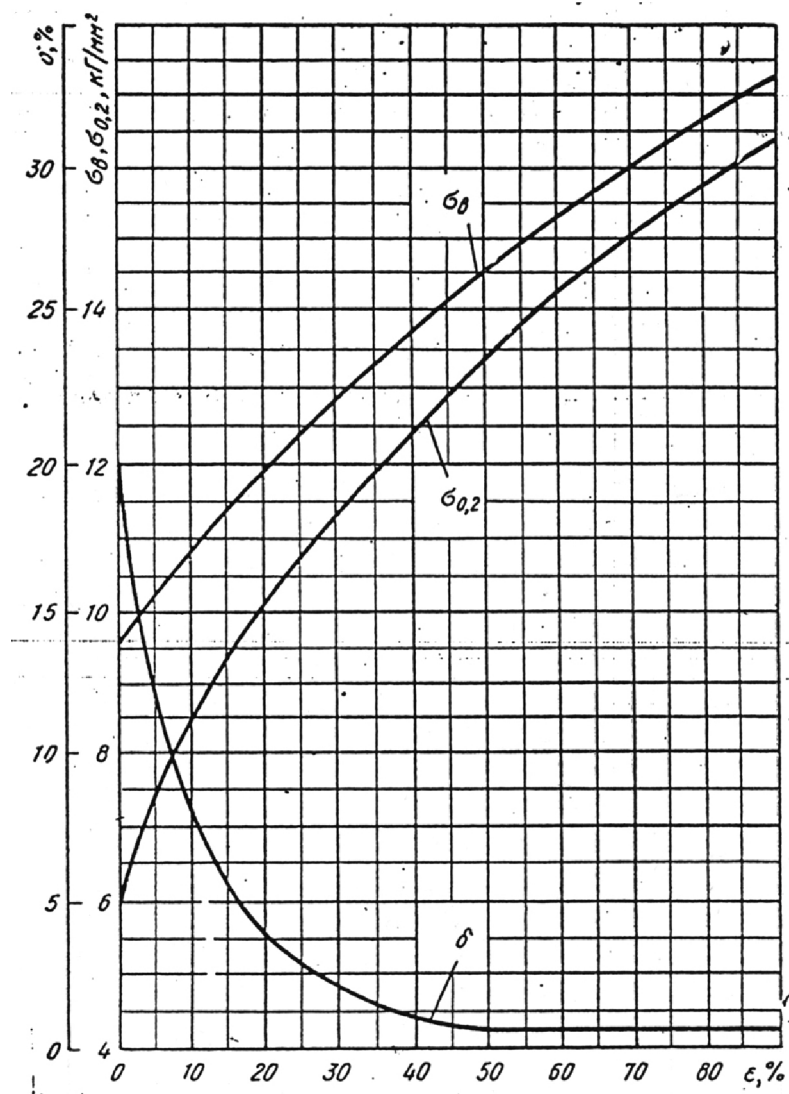


Рис.21

Влияние степени деформации на механические свойства
сплава А2

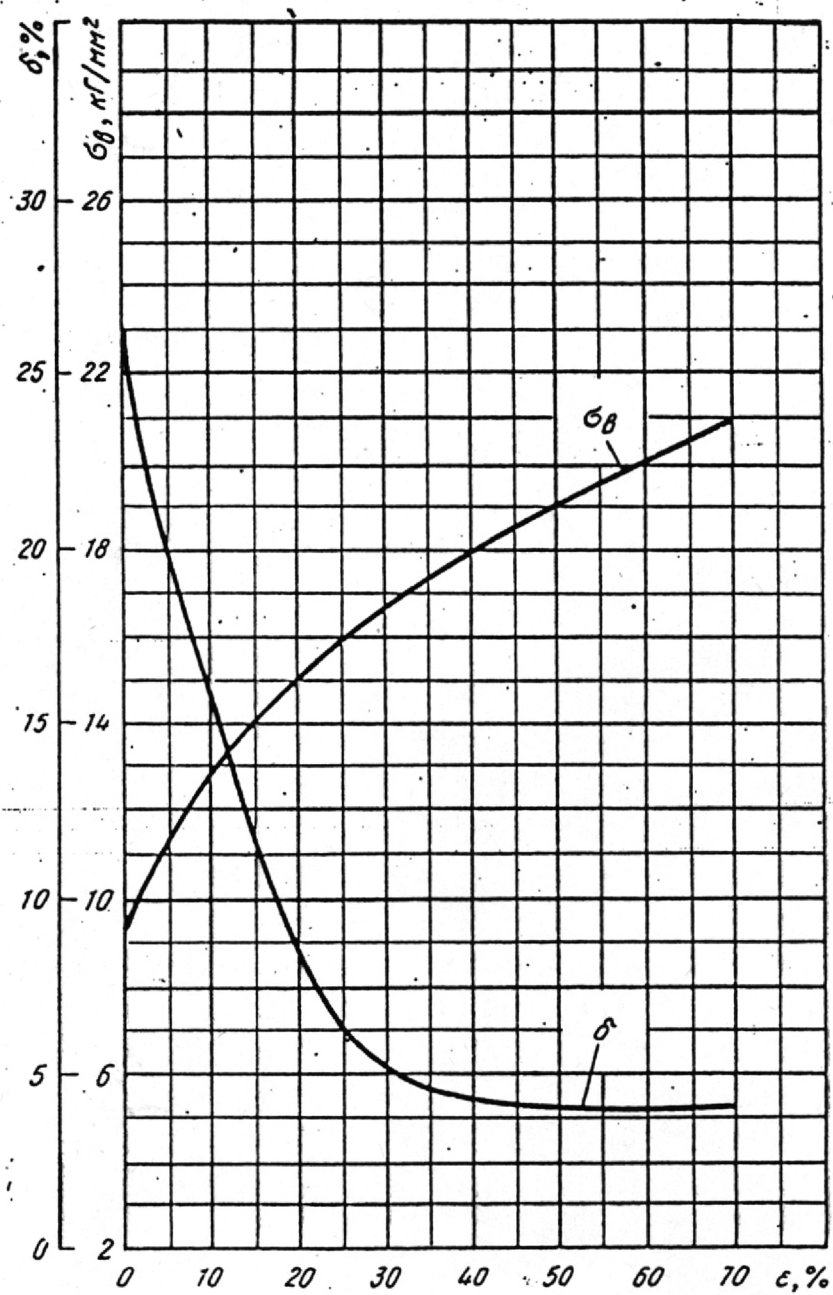


Рис.22

Влияние степени деформации на механические свойства
сплава АМц

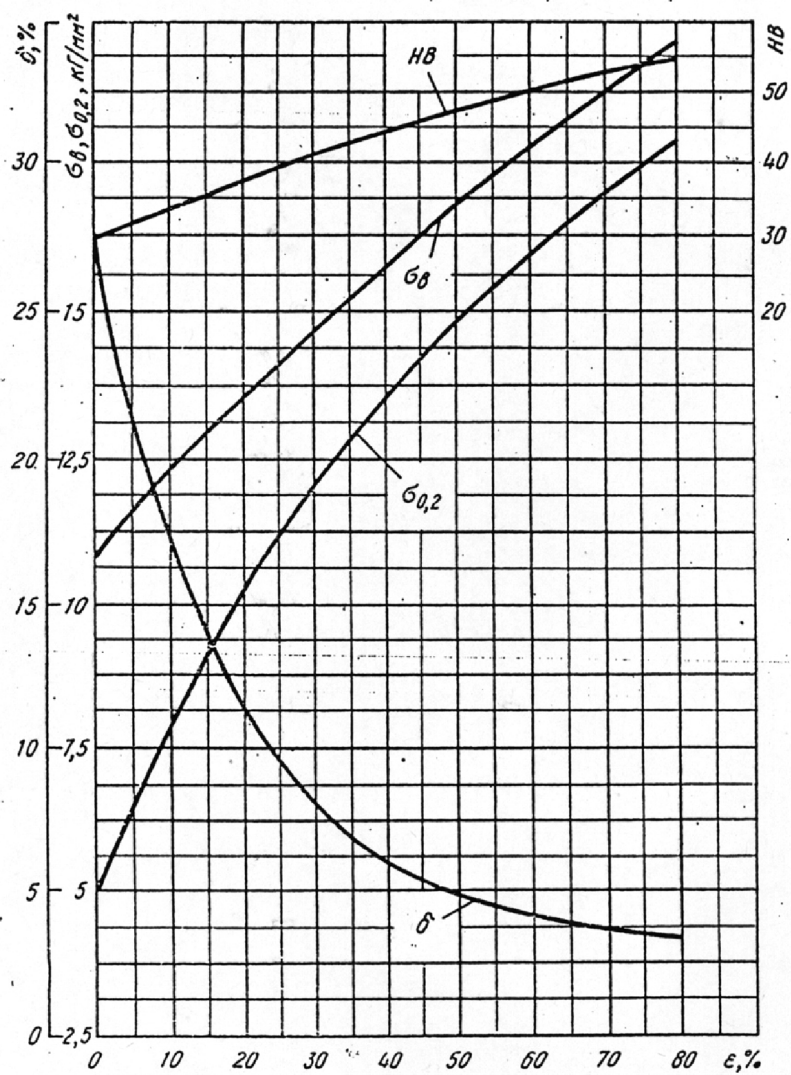


Рис.23

Влияние степени деформации на механические свойства
сплава АМГ1

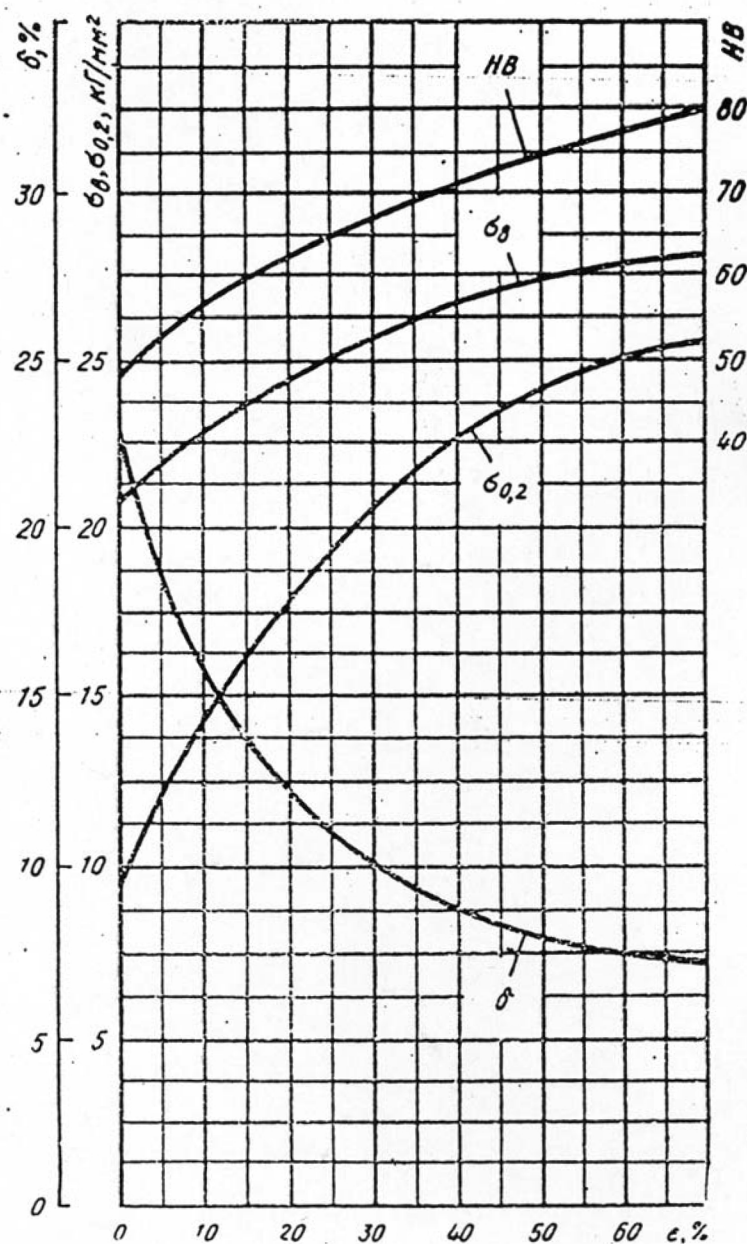


Рис.24

Влияние степени деформации на механические свойства
сплава АМгЗ

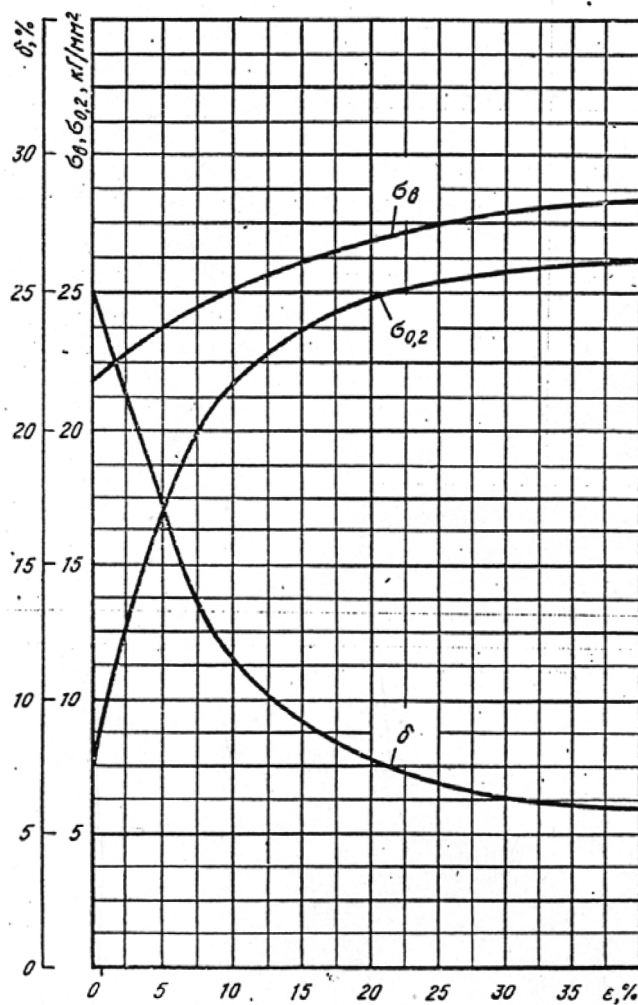


Рис.25

Влияние степени деформации на механические свойства
сплава АМг5П

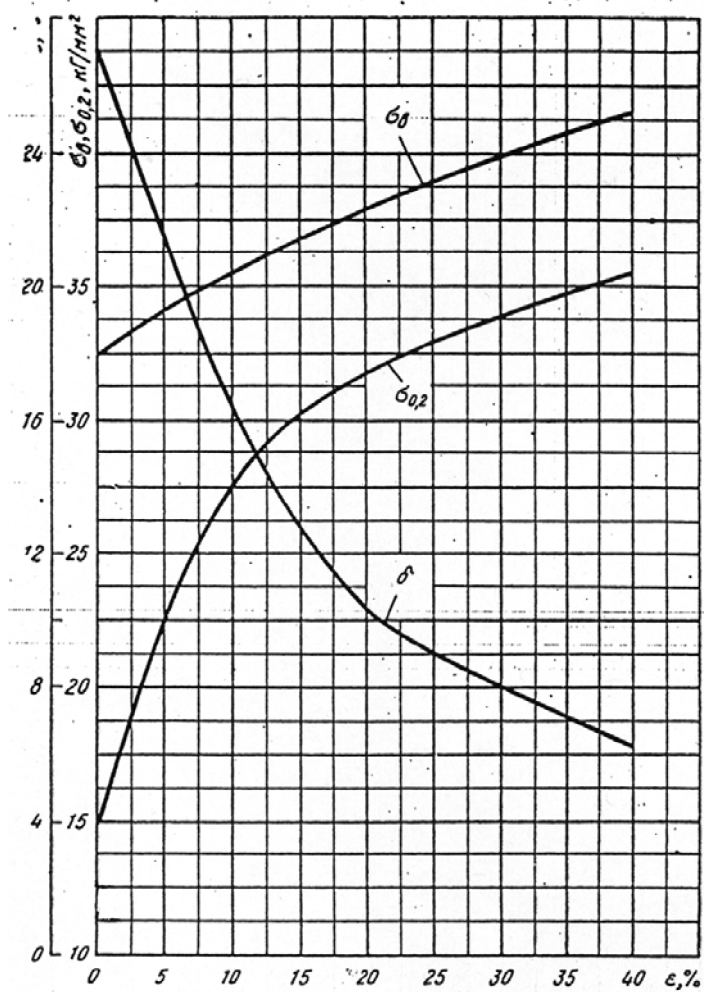


Рис.26

Влияние степени деформации на механические свойства
сплава Д1

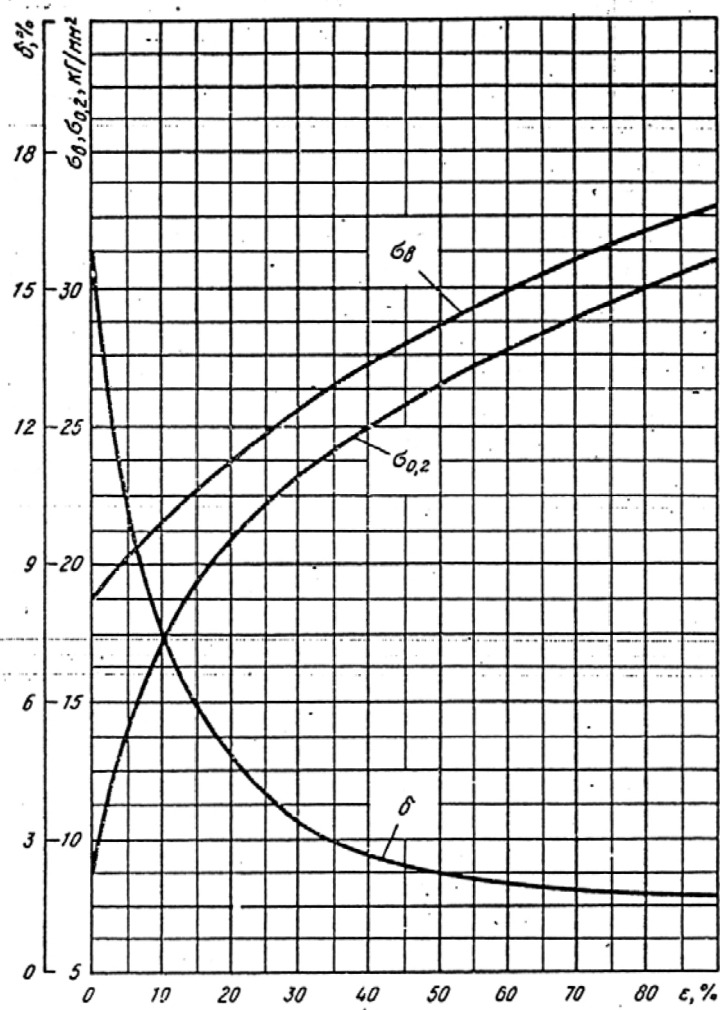


Рис.27

Влияние степени деформации на механические свойства
сплава Д16

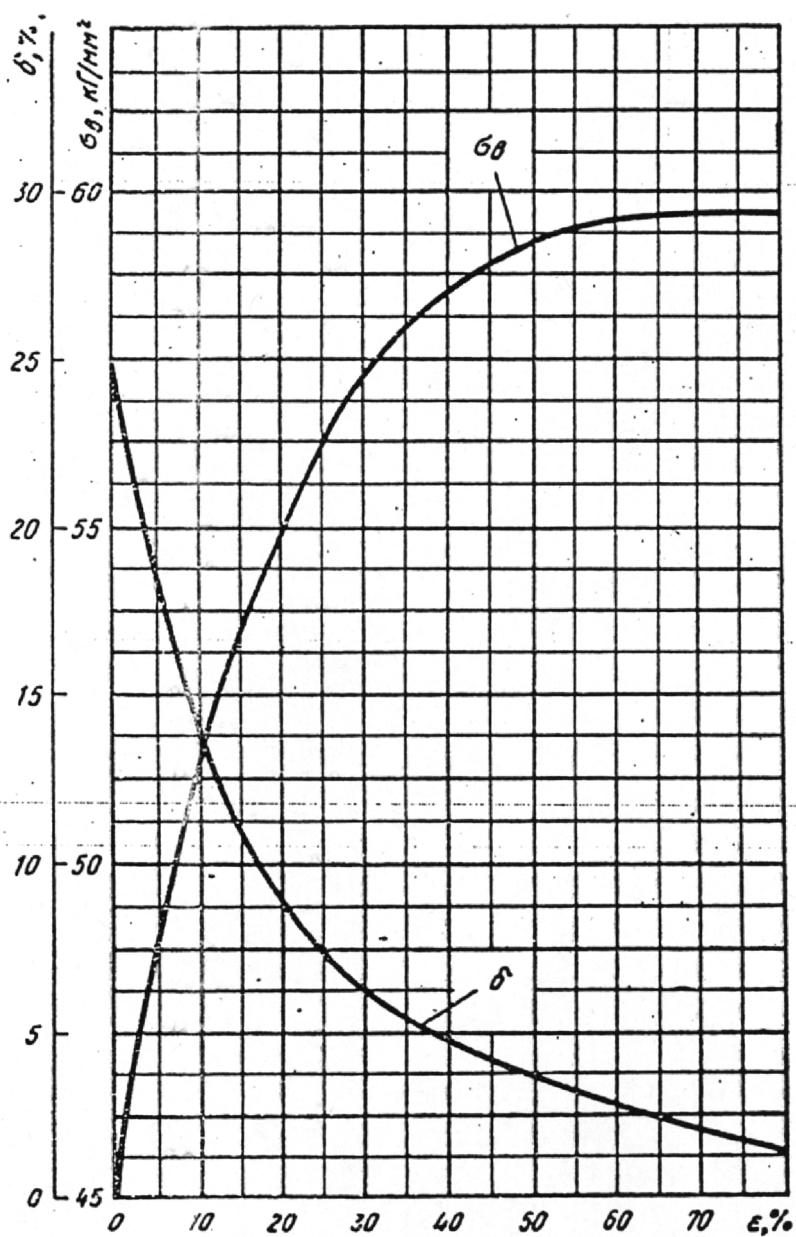


Рис.28

Влияние степени деформации на механические свойства
сплава АД31

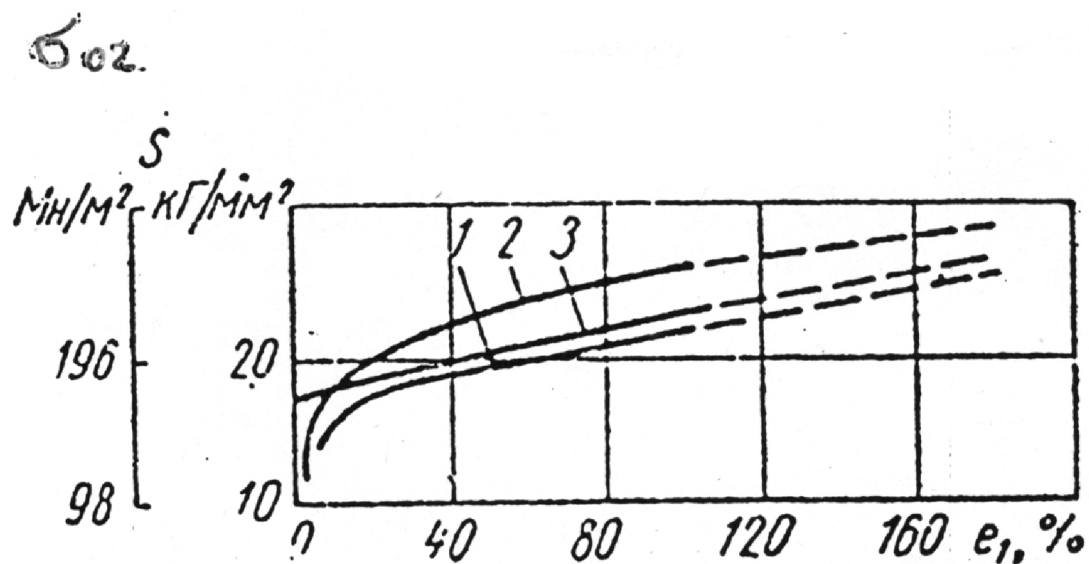


Рис.29

Влияние степени деформации на механические свойства сплава АМгб

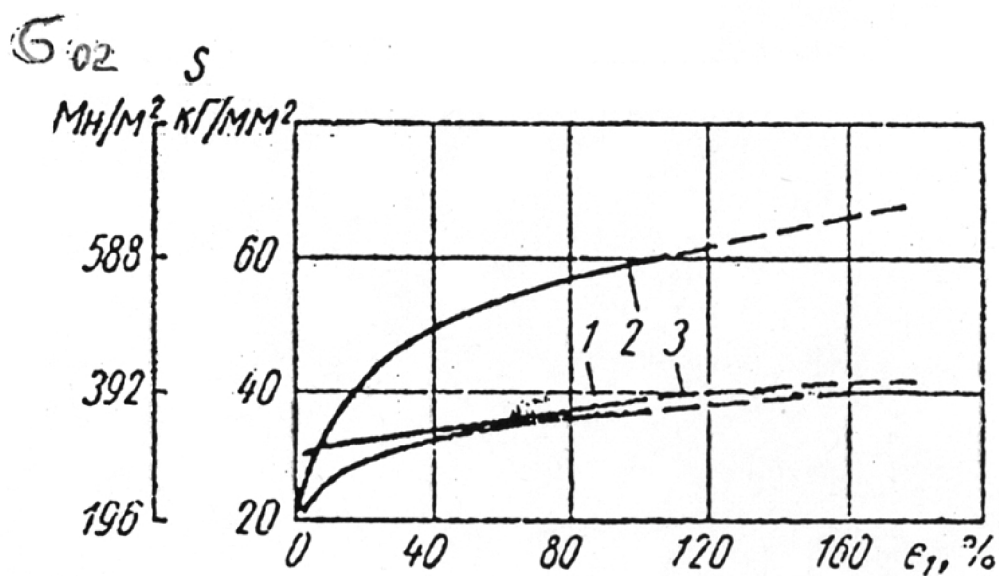


Рис.30

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. Её роль как процесса разупрочнения могут выполнять процессы возврата и, в частности, процесс 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 20-50⁰С 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. Несоблюдение температурных условий деформации приводит к появлению дефектов и браку. Недогрев заготовки или окончание деформации при слишком низкой температуре ведёт к появлению наклёпа в результате замедления рекристаллизации, что может вызвать появление трещин и разрушение материала. Перегрев металла выше верхней границы температурного интервала деформации может привести к неустранимому дефекту - пережогу. 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.

Диаграмма деформирования сплава АД1 в литом
гомогенизированном состоянии.

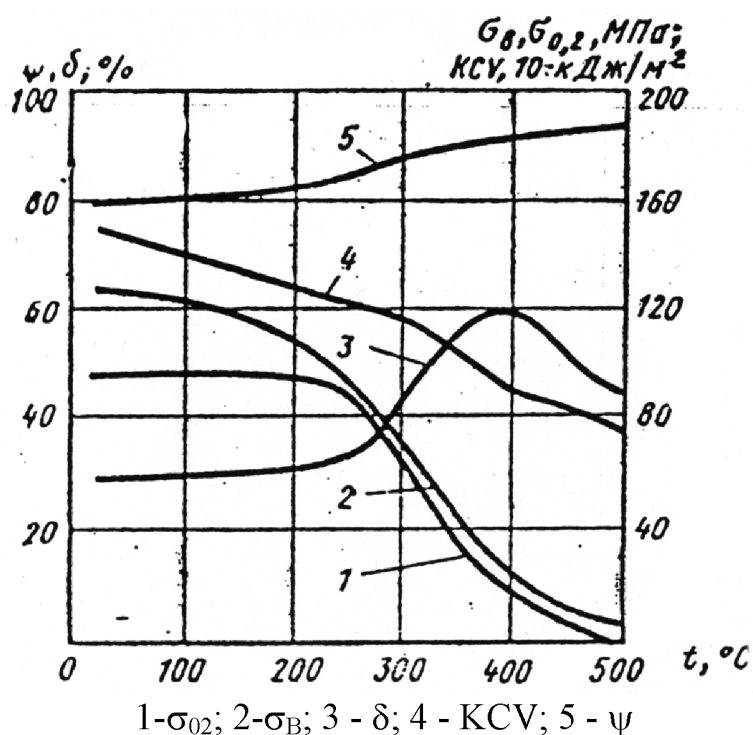


Рис.31

Диаграмма деформирования сплава АМц в литом
гомогенизированном состоянии:

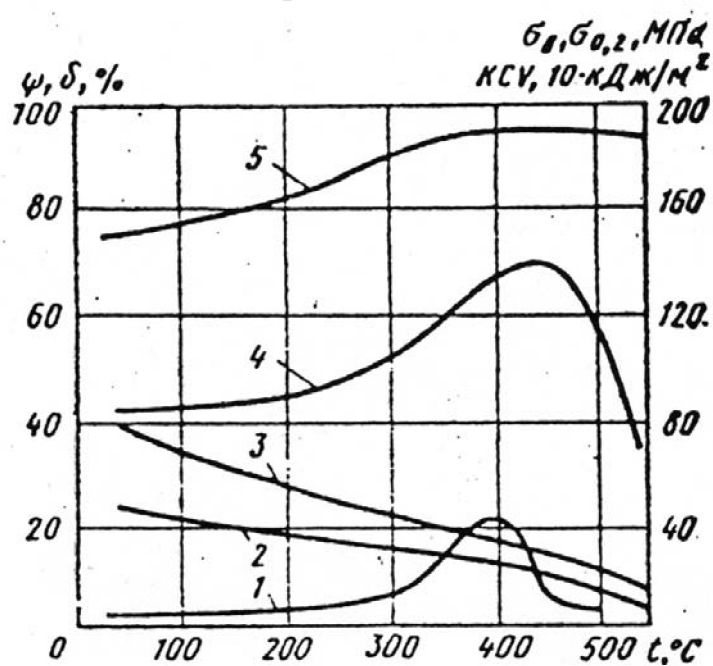
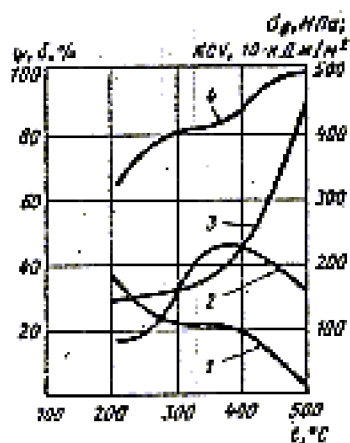


Рис. 32

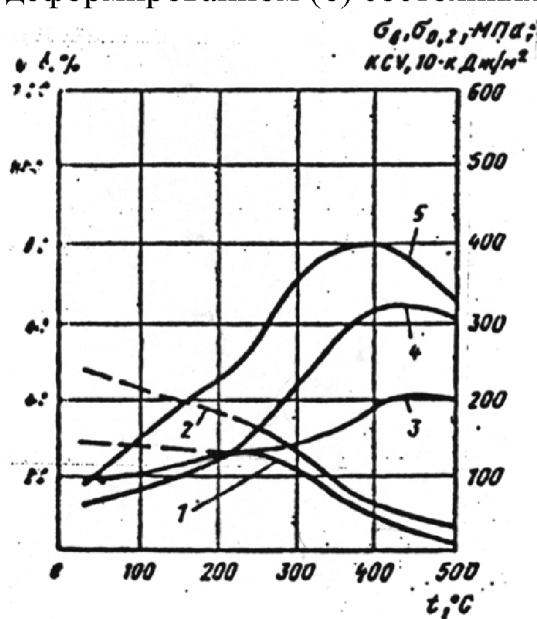
Диаграмма деформирования сплава АМг2 в литом
гомогенизированном состоянии



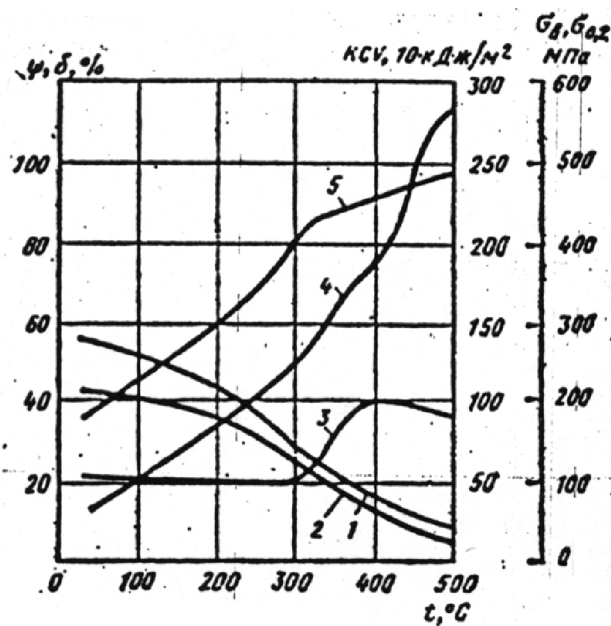
1 - σ_B ; 2 - KCV; 3 - δ ; 4 - ψ

Рис.33

Диаграмма деформирования сплава АМг3 в литом (а), деформированном (б) состояниях



а)

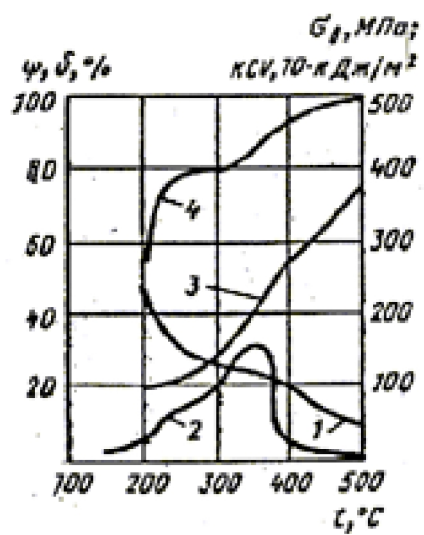


б)

1- $\sigma_{0.2}$; 2 - σ_B ; 3 - KCV; 4 - δ ; 5 - ψ

Рис. 34

Диаграмма деформирования сплава В93 в деформированном состоянии



1 - σ_B ; 2 - KCV; 3 - δ ; 4 - ψ

Рис. 35

Диаграмма деформирования сплава АМгб в литом негомогенизированном (а), литом гомогенизированном

(б) и деформированном (в) состояниях

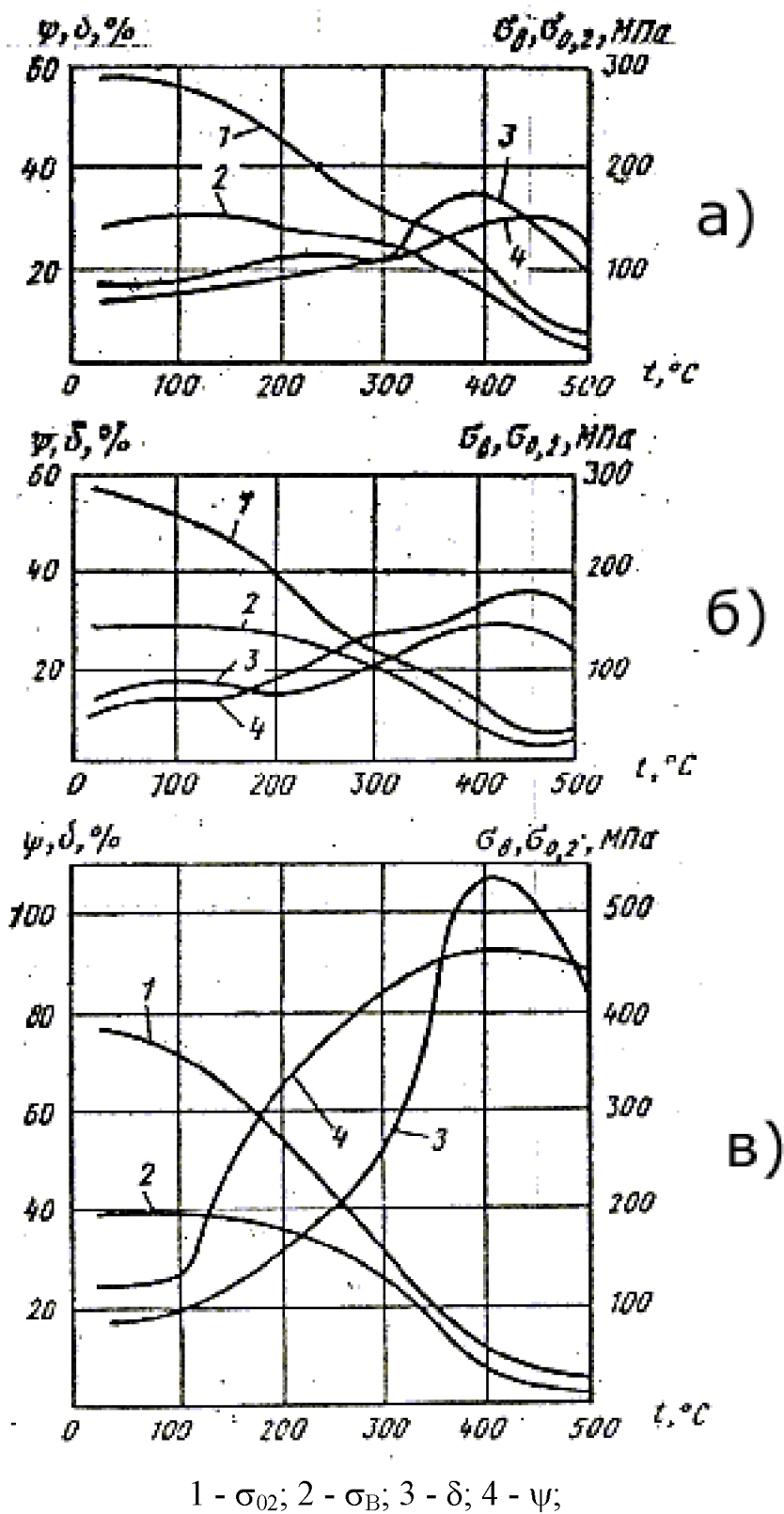
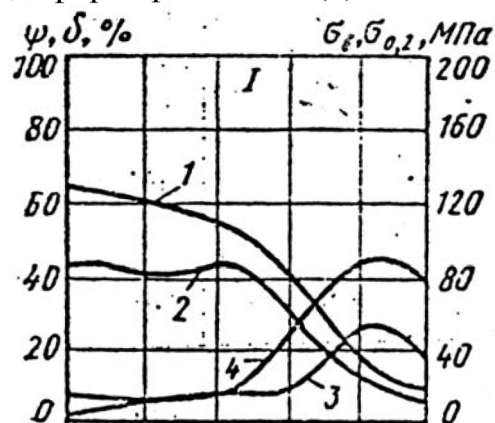


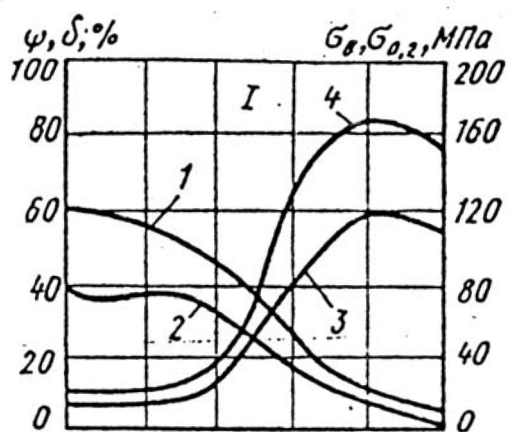
Рис.36

Диаграмма деформирования сплава Д 1 в литом неомогенизированном (а), литом гомогенизированном

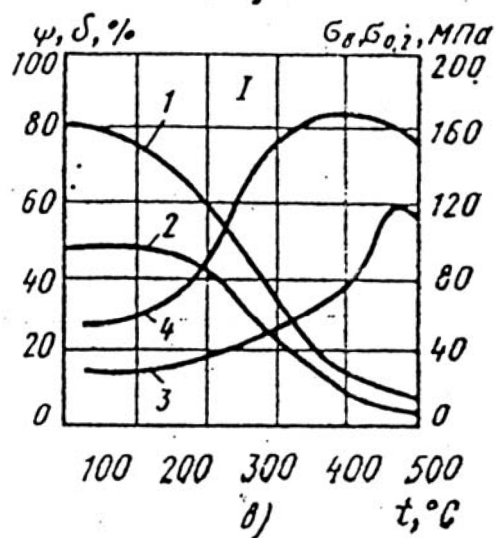
(б) и деформированном (в) состояниях



а)



б)

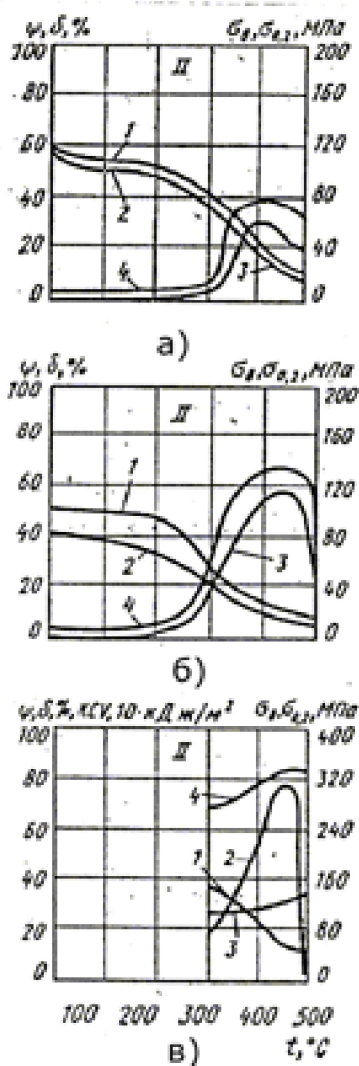


1 - σ_B ; 2 - $\sigma_{0.2}$; 3 - δ ; 4 - ψ ; 5 - KCV;

Рис.37

Диаграмма деформирования сплава Д 16 в литом

негомогенизированном (а), литом гомогенизированном (б) и деформированном (в) состояниях

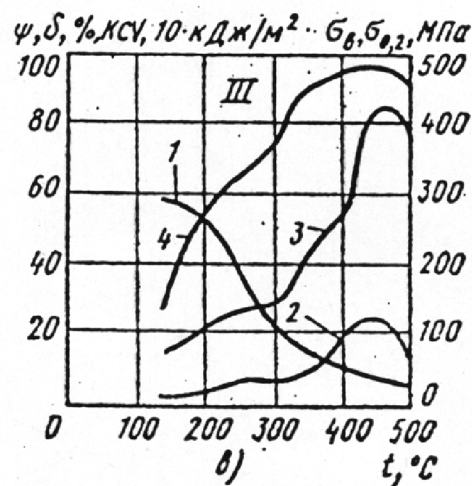
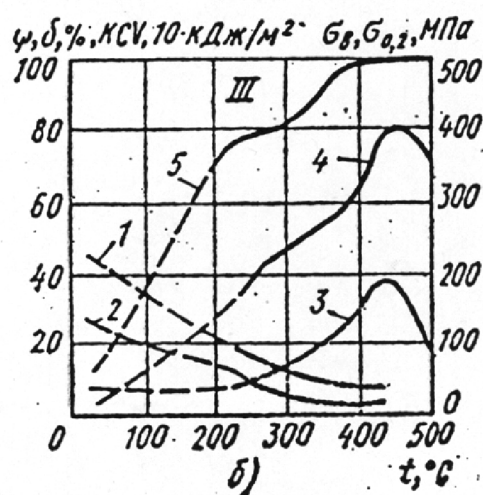
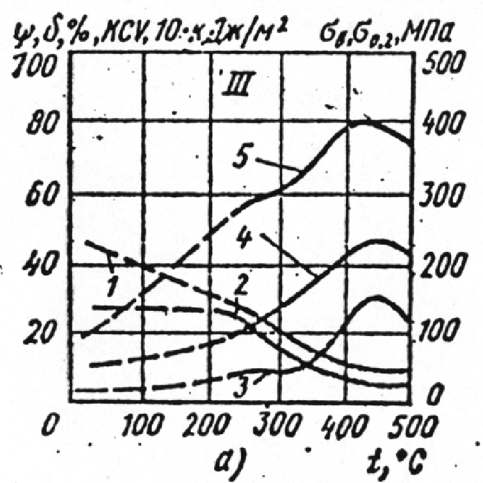


1 - σ_B ; 2 - $\sigma_{0.2}$; 3 - δ ; 4 - ψ ; 5 - KCV;

Рис.38

Диаграмма деформирования сплава Д 20 в литом негомогенизированном (а), литом гомогенизированном

(б) и деформированном (в) состояниях

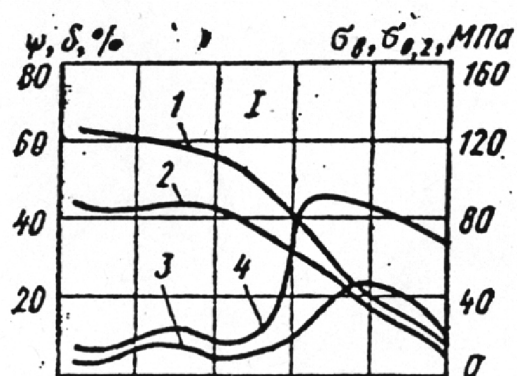


1 - σ_B ; 2 - $\sigma_{0.2}$; 3 - δ ; 4 - ψ ; 5 - KCV;

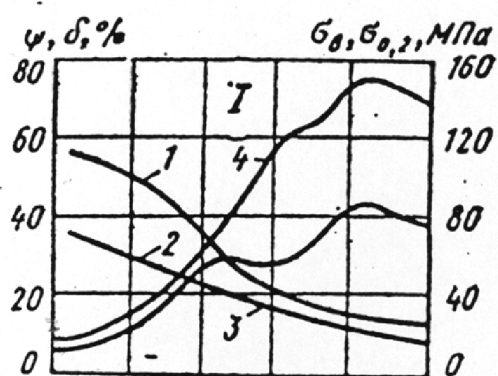
Рис.39

Диаграмма деформирования сплава АВ в литом негомогенизированном (а), литом гомогенизированном

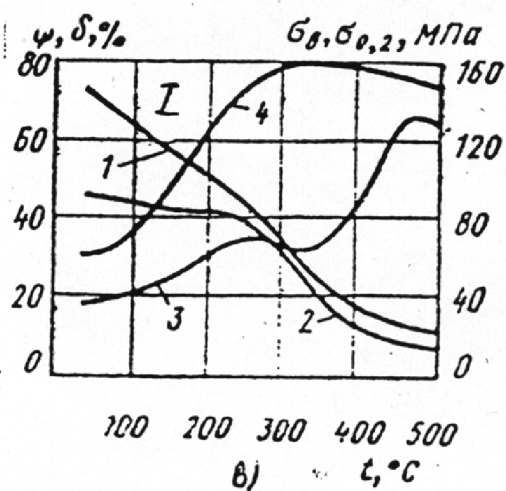
(б) и деформированном (в) состояниях



а)



б)



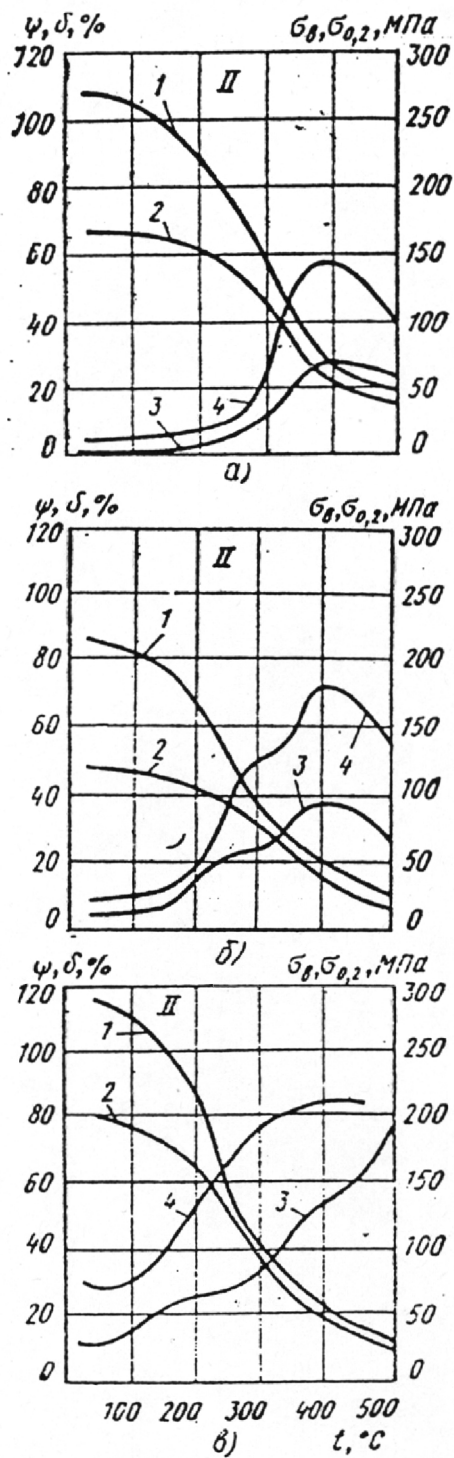
в)

1 - σ_B ; 2 - $\sigma_{0.2}$; 3 - δ ; 4 - ψ ;

Рис.40

Диаграмма деформирования сплава АК 8 в литом негомогенизированном (а), литом гомогенизированном

(б) и деформированном (в) состояниях

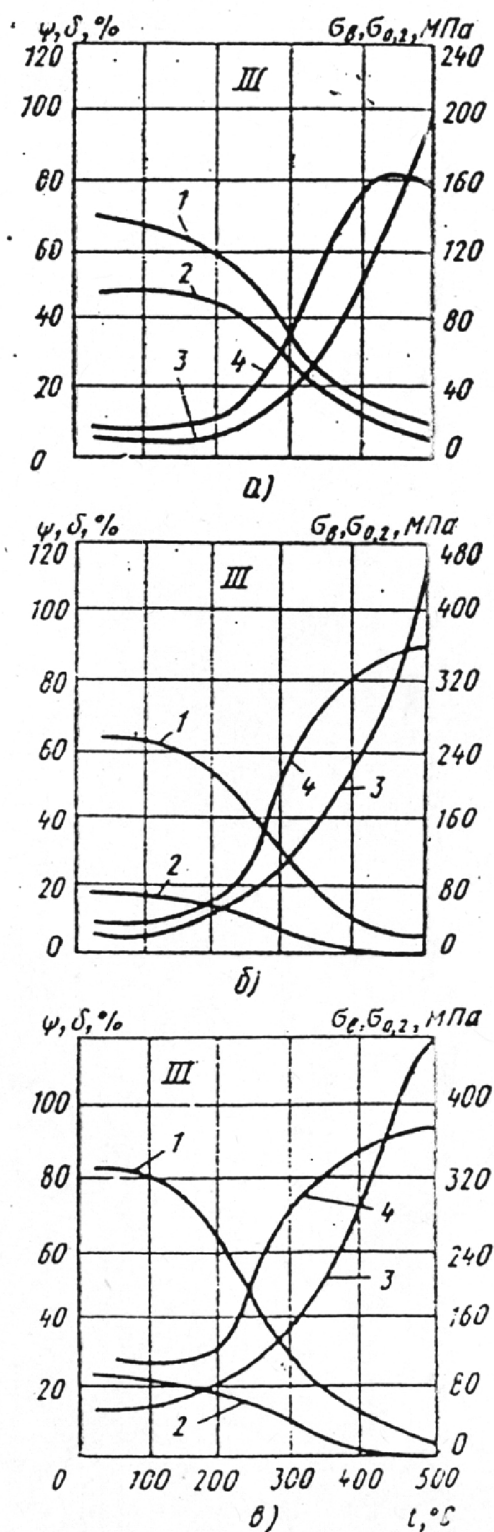


1 - $\sigma_{\text{в}}$; 2 - $\sigma_{0.2}$; 3 - δ ; 4 - ψ ;

Рис.41

Диаграмма деформирования сплава АК4-1 в литом негомогенизированном (а), литом гомогенизированном

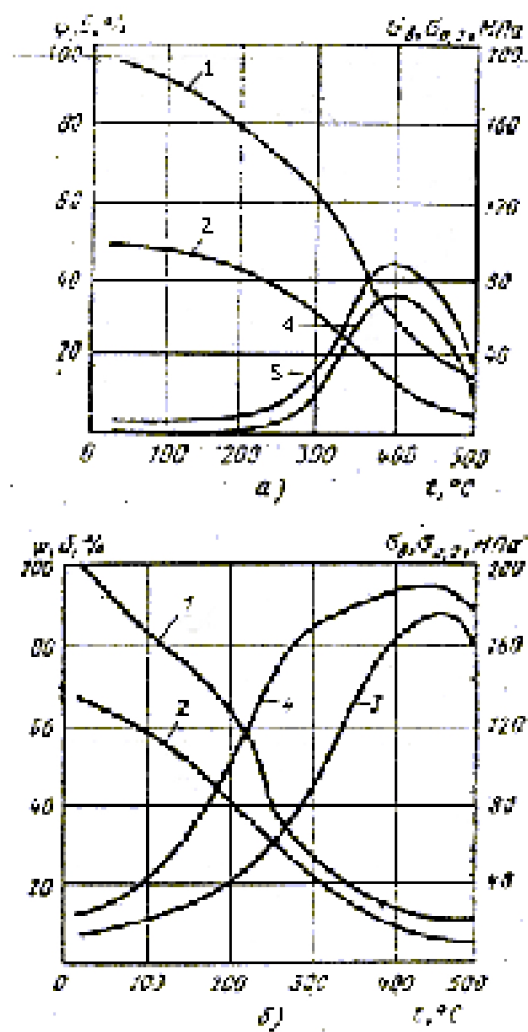
(б) и деформированном (в) состояниях



1 - $\sigma_{\text{в}}$; 2 - σ_{02} ; 3 - δ ; 4 - ψ ;

Рис.42

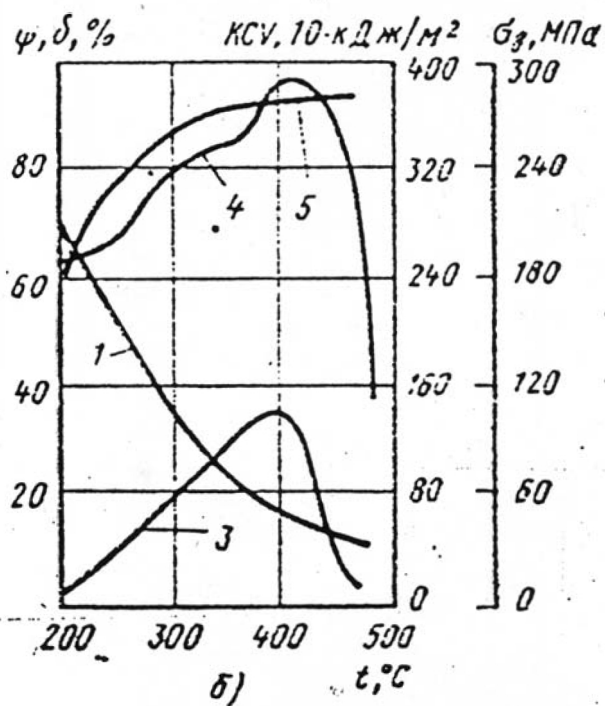
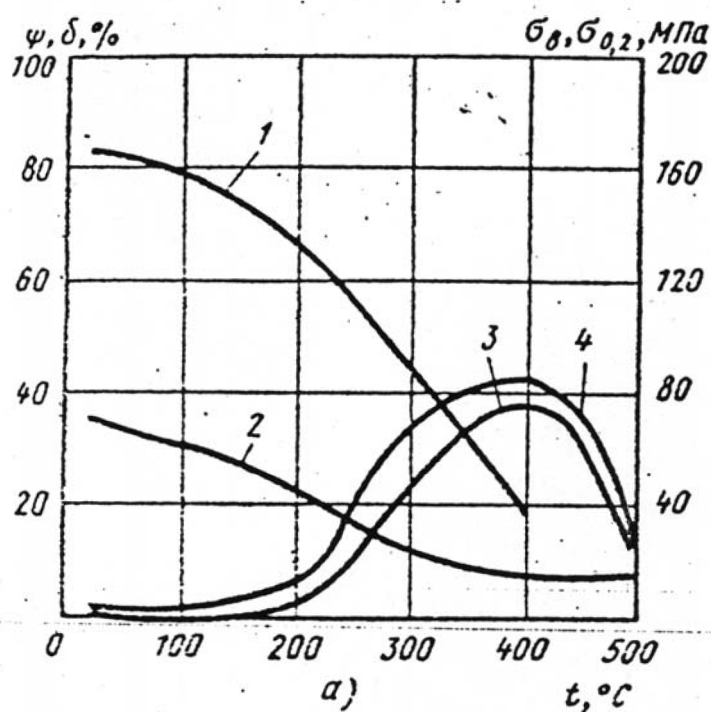
Диаграмма деформирования сплава В95 в литом
гомогенизированном (а) и деформированном (б) состояниях



1 - σ_{δ} ; 2 - $\sigma_{0.2}$; 3 - δ ; 4 - ψ ;

Рис.43

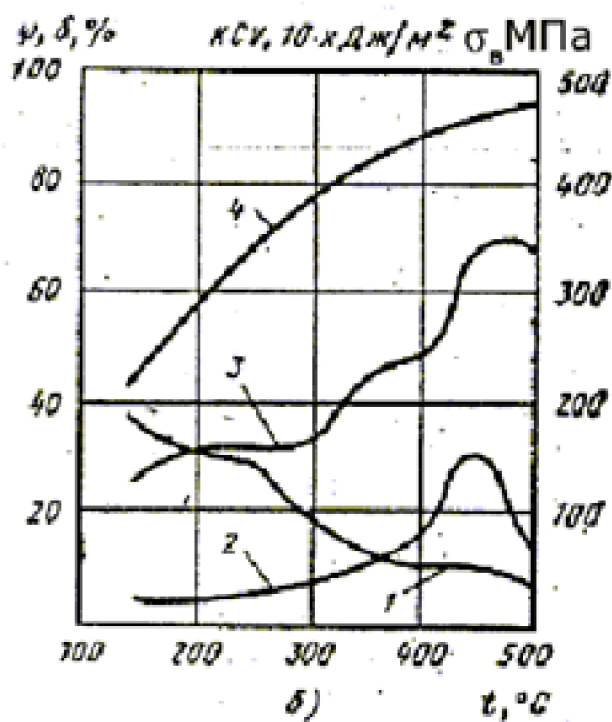
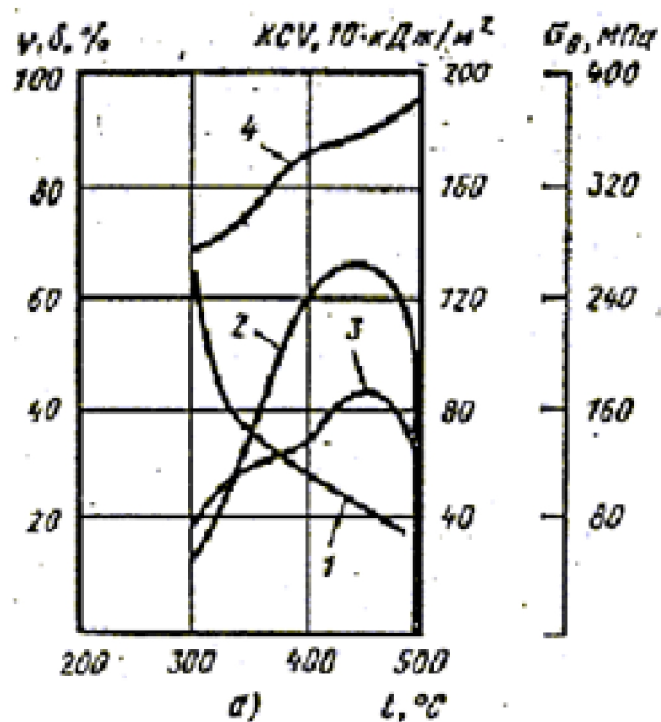
Диаграмма деформирования сплава В96 в литом негомогенизированном (а) и деформированном (б) состояниях



1 - σ_B ; 2 - $\sigma_{0.2}$; 3 - KCV; 4 - δ ; 5 - ψ ;

Рис.44

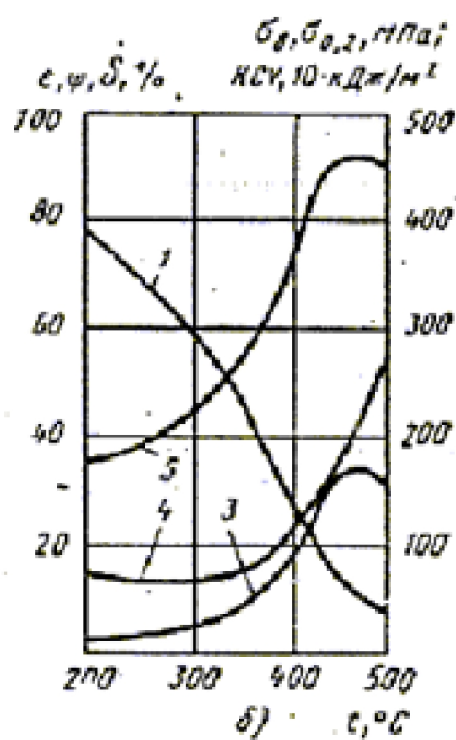
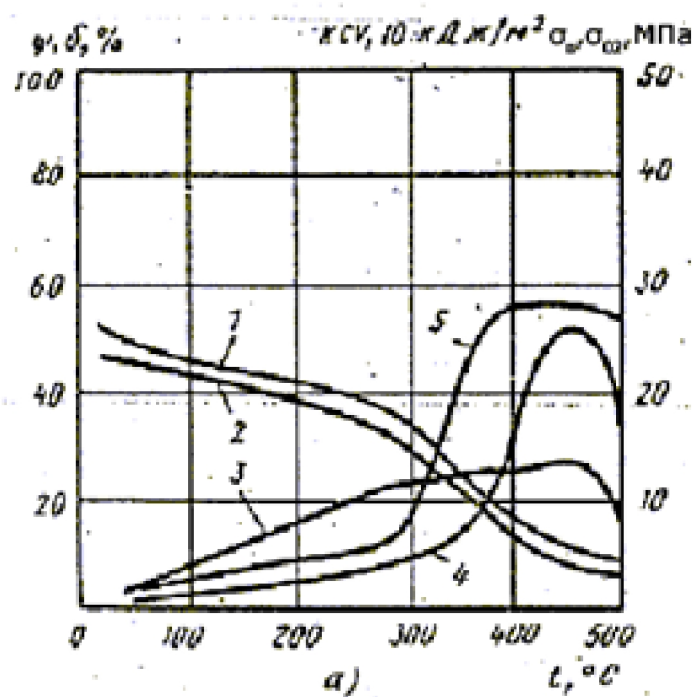
Диаграммы деформирования сплавов ВД 17 (а),
и Д 19 (б) в деформированном состоянии



1 - σ_B ; 2 - KCV; 3 - δ ; 4 - ψ ;

Рис.45

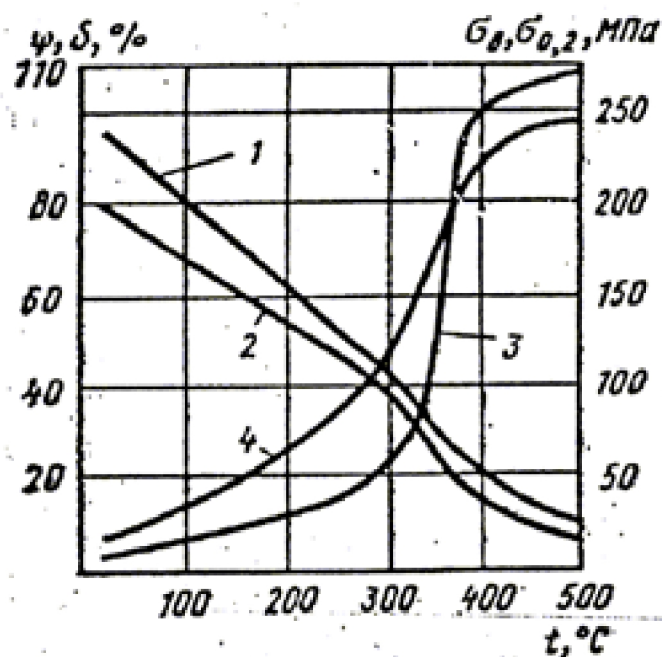
Диаграмма деформирования сплава Д 21 в литом и
гомогенизированном (а) и деформированном (б) состояниях



1 - σ_B ; 2 - $\sigma_{0.2}$; 3 - KCV; 4 - δ ; 5 - ψ ;

Рис.46

Диаграмма деформирования сплава АК4 в литом
гомогенизированном состоянии



1 - σ_B ; 2- $\sigma_{0.2}$; 3 - δ ; 4 - ψ ;

Рис.47

Таблица 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. Её 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.

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

Отжиг- термическая обработка, заключающаяся в нагреве металла или сплава до определенной температуры, выдержке и последующем, как правило, медленном охлаждении. Он 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 разделяют на гомогенизирующий, рекристаллизационный и отжиг для снятия упрочненного состояния, полученного в результате термической обработки.

Отжиг применяется для повышения пластичности и снижения прочности сплавов в целях облегчения последующей холодной обработки давлением, для устранения остаточных напряжений, вызывающих коробление деталей а также для повышения их коррозионной стойкости.

Температура нагрева, длительность выдержки, скорость нагрева и охлаждения выбираются в зависимости от природы сплава и требований предъявляемых к уровню механических свойств сплава.

Как правило, желательно достигать максимально высокой скорости нагрева деталей и полуфабрикатов при отжиге, чтобы избежать роста зерна. Однако при нагреве тонкостенных деталей сложной формы скорость нагрева следует ограничивать, чтобы избежать коробления, вызванного неравномерным нагревом.

Скорость охлаждения при отжиге ограничивают в тех случаях, когда необходимо избежать частичной закалки сплава, а также когда необходимо избежать коробления полуфабрикатов.

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

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

Закалка и старение применяются только для термически упрочняемых 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 отожжённым состоянием, сохраняют высокую пластичность. Процесс старения заключается в выдержке закалённого 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 при термообработке заключается в основном в конкретных режимах, что зависит от химического состава сплава, сам же набор операций термообработки примерно одинаковый.

В начале технологической схемы производства как правило 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.

Таблица 15

Рекомендуемые режимы гомогенизации слитков

Марка сплава	T, °C	Выдержка, ч
Д1, Д16, Д19, Д17, АК6, АК8, АК4	480-500	6-36
АК4-1, АМг6, АМг5	510-530	8-24
АД33, АМг, АМг3	540-550	8-12
АВ, АД31	610-630	6-10
АМц, АД		

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 не упрочняемых термообработкой рекристаллизационный отжиг подразделяют на высокий (полный) и низкий (неполный).

Высокий отжиг проводят при температурах превышающих температуру конца рекристаллизации достаточных для полного разупрочнения материала вызванного нагартовкой. Длительность выдержки должна быть такой, чтобы избежать собирательной рекристаллизации и укрупнения зерна. Росту зерна способствует и неравномерное распределение легирующих элементов внутри зерен, а также неравномерная степень деформации.

Таблица 16

Режимы высокого отжига сплавов не упрочняемых термической обработкой

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

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 1/2П.

Таблица 17

Режимы низкого отжига сплавов не упрочняемых термической обработкой

Марка сплава	Допустимый интервал температур отжига, °С	Длительность выдержки для всех толщин, ч
АД00, АД0, АД1, АД	150-300	1-3
АМц	200-300	1-3
АМг1, АМг2	150-180	1-3
АМг3	250-300	1-3
Амг4, Амг5, Амг6	310-335	1-3

Для полуфабрикатов из термически упрочняемых сплавов применяют высокий (полный), сокращенный и неполный отжиг.

Полным называется отжиг, при котором обеспечивается полное протекание процессов рекристаллизации, распада твердого раствора в сплаве и коагуляция упрочняющих фаз. Такой вид отжига может применяться для снятия упрочнения полученного в результате термообработки. После такого отжига металл способен выдержать холодную деформацию с высокими степенями обжатия. Этот вид отжига может быть использован как промежуточный и как окончательный вид термообработки.

При отжиге плакированных полуфабрикатов длительность выдержки следует устанавливать минимально необходимой, чтобы ограничить диффузию меди и магния в плакирующий слой. Рекомендуется, чтобы суммарное время всех выдержек при повторных отжигах не превышало 10 минут на каждые 40 мкм номинальной толщины плакировки.

Таблица 18

Режимы высокого отжига сплавов упрочняемых термической обработкой

Марка сплава	Допустимый интервал температур отжига, °С	Длительность выдержки для всех толщин, мин	Скорость охлаждения
АД31, АД33, АД35, АВ, АК6, АК6ч, АК8, АК4, АК4-1, АК4-1ч, Д1, Д1ч, Д1П, 1161, Д16, Д16ч, Д16П, 1163, ВД17, 1193, Д19, Д19ч, Д19П, ВАД1, Д20, 1201, Д21, ВАД23, ВАД23пч	380-420	10-60	Не более 30 град/ч до температуры 260°С, затем на воздухе
М40	395-425	10-40	На воздухе
1915, 1925, 1911	350-420	10-60	Не более 30 град/ч до температуры 200°С, затем на воздухе
В92Ц	350-430	60-90	Не более 30 град/ч до температуры 200°С, затем на воздухе
В91, В93, В93пч, 1933, В95, В95пч, В95оч, В95П, В96Ц, В96Цпч, В96Ц-1, В96Ц-3	350-430	10-60	Не более 30 град/ч до температуры 150°С, затем на воздухе

Сокращенным отжигом сплавов, упрочняемых термообработкой, называется отжиг при температурах минимальной устойчивости переохлажденного твердого раствора, при которых обеспечивается наибольшая скорость распада твердого раствора и разупрочнения материала. Быстрое охлаждение после сокращенного отжига для всех сплавов кроме 1915, 1933, В93, В95, В96ц не приводит к частичной закалке. В результате обеспечивается достаточную пластичность, обеспечивающая возможность продолжения холодной деформации.

Допустимый интервал сокращенного отжига приведен в табл.19

Таблица 19

Режимы сокращенного отжига сплавов упрочняемых термической обработкой

Марка сплава	Допустимый интервал температуры отжига, °С
АД31, АД33, АД35, АВ, АК6, АК6ч, АК8, АК4, АК4-1, АК4-1ч, Д1, Д1ч, Д1П, 1161, Д16, Д16ч, Д16П, 1163, ВД17, 1193, Д19, Д19ч, Д19П, ВАД1, Д20, 1201, Д21, ВАД23, ВАД23пч, В91, В93, В93пч, 1933, В95, В95пч, В95оч, В95П, В96Ц, В96Цпч, В96Ц-1, В96Ц-3	350-370
1915, 1911, 1925, В92Ц	290-320

Неполным отжигом называется отжиг при температурах, лежащих ниже температуры рекристаллизации, при которой частичное снятие наклепа происходит за счет процессов возврата. Для этого рекомендуется применять отжиг при температурах 250-280 °С в течение 1-4 часов с охлаждением на воздухе или в воде. Отжиг при этих температурах не вызывает рекристаллизации и поэтому можно не ограничивать степень пластической деформации перед отжигом. Пластичность полуфабрикатов после такого отжига несколько ниже, чем после полного или сокращенного, но позволяет проводить холодную деформацию в ограниченных пределах.

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. Пластическая деформация положительно влияет на процессы, проходящие при термообработке, обеспечивает более высокие свойства, чем одна термообработка.

Закалкой называется термическая обработка, заключающаяся в нагреве сплава до заданной температуры, выдержке и последующем быстром охлаждении с целью получения метастабильного состояния, т.е. получения

пересыщенного твердого раствора на основе алюминия, способного к последующему упрочнению при старении.

При нагреве под закалку протекает процесс диффузионного перехода легирующих элементов из избыточных фаз в твердый раствор, вызывающий растворение избыточных фаз, образованных в результате взаимодействия легирующих элементов (Cu, Mg, Zn, Si, Li) друг с другом и с алюминием. Длительность выдержки при нагреве под закалку обуславливается как природой, размером и характером распределения растворимых избыточных фаз в твердом растворе на основе алюминия, так и скоростью растворения, определяемой коэффициентом диффузии легирующих элементов в алюминии, повышающимся с ростом температуры. Чем выше температура, тем больше скорость растворения.

В деталях, предварительно подвергавшихся пластическому деформированию, при нагреве под закалку наряду с процессом растворения протекает процесс рекристаллизации. Величина рекристаллизованного зерна в основном зависит от степени пластической деформации и скорости нагрева под закалку. Кроме того, в некоторых случаях может иметь место рост зерна при увеличении длительности выдержки при температуре нагрева под закалку.

Чтобы не вызывать значительного роста зерна, нагрев под закалку необходимо проводить с возможно большей скоростью и избегать критических степеней деформации при обработке деталей перед закалкой.

Температура нагрева под закалку выбирается с учётом природы сплава. Верхний и нижний пределы температуры нагрева под закалку обусловлены расположением границ области твердого раствора сплава на диаграмме состояния, а также возможным наличием в сплаве неравновесных легкоплавких составляющих. Верхним пределом температуры нагрева под закалку является температура, нагрев выше которой может вызывать пережог сплава. Нижний предел температуры нагрева под закалку определяется положением кривой предельной растворимости легирующих элементов в твердом растворе на диаграмме состояния и необходимостью обеспечения высокой скорости растворения, а также требуемых механических и коррозионных свойств сплава.

Температура нагрева под закалку полуфабрикатов из алюминиевых сплавов приведена в таблице 20. Охлаждающая среда для всех сплавов – вода, а для сплава 1420 – воздух или вода.

Таблица 20

Температура нагрева под закалку полуфабрикатов из алюминиевых сплавов

Марка сплава	Вид полуфабриката	Температура начала отсчета длительности выдержки, °С	Допустимый интервал температуры нагрева под закалку, °С	Особенности при нагреве под закалку
АД31	Все виды полуфабрикатов и деталей	520	525-535	Прессованные полуфабрикаты толщиной до 10мм для заковки можно охлаждать на столе прессы, на спокойном воздухе
АД33	Все виды полуфабрикатов и деталей, кроме вертолетных профилей.	520	525-535	
	Вертолётные профили	505	510-530	
АД35, АК-4 АК4-1 АК4-1ч АВ АК6, АК6ч АК8 Д1, Д1ч	Все виды полуфабрикатов и деталей.	520	525-535	
		505	510-530	
		500	505-525	
		490	495-505	
		490	495-510	
Д16ч, Д16	Прессованные полуфабрикаты, плиты и детали из них.	485	490-498	

	Холоднодеформирован ный трубы, листы и детали.	490	492-500	В случае содержания основных легирующих элементов ближе к нижнему пределу по решению главного металлурга допускается повышение верхнего предела температуры нагрева под закалку до 503 °C
ВД17	Все виды полуфабрикатов и деталей	490	495-505	Закалку полуфабриката в и деталей рекомендуется проводить с температуры не ниже 500 °C
Д19, Д19ч	Прессованные полуфабрикаты, плиты и детали из них.	490	495-505	
	Холоднодеформирован ный трубы, листы и детали из них.	495	500-508	
Д20 1201 Д21 ВАД23 ВАД23пч	Все виды полуфабрикатов и деталей	525 530 515 510	530-540 530-540 520-530 515-525	

01420	Все виды полуфабрикатов и деталей	450	450-465	Полуфабрикаты закаливаются в воде и на воздухе. Закалка в воде является промежуточной операцией, закалка на воздухе - окончательной. Листы и профили, предназначенные для изготовления деталей деформированием, рекомендуется закаливать в воде для обеспечения наибольшей пластичности сплава. Готовые детали, изготовленные из листов и профилей на заводах-потребителях, перезакаливается с охлаждением на воздухе для обеспечения удовлетворительной коррозионной
-------	-----------------------------------	-----	---------	--

				стойкости. Охлаждение на воздухе следует проводить в россыпи.
1915, 1911, 1925	Все виды полуфабрикатов и деталей	440	440-460	Прессованные полуфабрикат ы из сплавов 1915 и 1925 толщиной до 10 мм для заковки можно охлаждать на столе пресса, на спокойном воздухе
B93, B93пч	Все виды полуфабрикатов и деталей	445	450-465	
B95, B95пч, B95оч, B96Ц, B96Цпч		460	465-475	

Таблица 21

Ориентировочная длительность выдержки при нагреве под закалку

Виды полуфабрикатов	Толщина , мм	Длительность выдержки при нагреве в воздушной печи с зачеканенным спаем термоэлектричес кого термометра в металл или при нагреве в селитровой ванне, мин	Длительность выдержки по показаниям термоэлектрическог о термометра, замеряющего температуру воздуха в наиболее холодной зоне рабочего пространства печи, мин
Листы плакированные	До 1,4 1,5-1,9	5	10
		7	15

	2,0-4,0	10	25
	4,1-6,0	15	35
	6,1-10	20	40
Листы не плакированные, трубы холоднодеформированные, плиты горячекатанные, профили, прутки, полосы, панели и втулки горячепрессованные	До 1,2	5	15
	1,3-3,0	10	20
	3,1-5,0	15	30
	5,1-10	20	40
	11-20	25	50
	21-30	30	70
Штамповки и поковки	До 2,5	10	20
	2,6-5,0	15	30
	5,1-15	25	40
	16-30	40	50
	31-50	50	70
	51-75	60	100
	76-100	90	150
	101-150	120	200
	151-200	180	250
	201-250	220	300
	251-300	270	350

При нагреве под закалку плакированных листов медь и магний из сплава диффундирует в плакирующий слой, что может привести к снижению защитных свойств плакирующего слоя и к ухудшению внешнего вида листа. Поэтому длительность пребывания плакированного металла при температуре нагрева под закалку должна быть допустимо минимальной.

Ориентировочно считается, что диффузия меди в алюминий при температуре 500°C идёт со скоростью 1мкм/мин и что необходимо обеспечить чистую (без следов диффузии) плакировку с толщиной не менее 20 мкм.

Изделия, изготавливаемые механической обработкой из массивных поковок, штамповок и крупногабаритных прессованных прутков, рекомендуется подвергать закалке после черновой механической обработки.

Длительность выдержки при нагреве под закалку берется исходя из максимальной толщины полуфабрикатов, из которых изготовлена деталь. При выполнении предварительной механической обработки особое внимание необходимо обратить на обеспечение плавности переходов от массивных элементов детали к тонким.

Для обеспечения наилучших механических и коррозионных свойств полуфабрикатов и деталей время переноса садки из нагревательной среды в закалочный бак не должно превышать 15 с.

При толщине полуфабрикатов и деталей от 50 до 200 мм время переноса садки из селитровой ванны или шахтной печи в закалочный бак может быть увеличено до 30 с, а при больших толщинах деталей — до 45 с.

Замедленное перемещение садки из нагревательного устройства в закалочный бак может приводить к частичному распаду твердого раствора и в связи с этим к снижению механических свойств и коррозионной стойкости деталей.

При выгрузке садки из селитровой ванны ее необходимо выдержать 2—3 с. над ванной (дать стечь селитре), после чего перенести в закалочный бак.

Закалочные баки, наполненные водой, по своим размерам должны обеспечивать полное и быстрое погружение всей садки в воду. Охлаждение деталей и полуфабрикатов из сплава В93, В93пч проводить только в нагретой воде. Для сплавов типа дуралюмин (Д1, Д16) применять охлаждение в горячей воде (с температурой более 40°C) при закалке строго запрещается.

Для надежного и равномерного охлаждения полуфабрикатов и деталей необходимо энергично перемешивать воду в закалочном баке или переменить детали в течение всего процесса охлаждения. Перемешивание воды в баке необходимо начинать раньше, чем выгрузку садки из печи. Перемешивание проводить сжатым воздухом, перекачкой воды в закалочном баке или другими способами.

Для повышения коррозионной стойкости полуфабрикатов, особенно труб, закаливаемых из воздушной печи, закалка должна проводиться в воде, содержащей 0,05-0,4% бихромата или хромата калия или натрия (ГОСТ 2652-78, ГОСТ 2651-78). Допускается загрузку полуфабриката в вертикальную печь для нагрева под закалку производить через закалочный бак с раствором бихромата или хромата калия или натрия.

При укладке деталей или полуфабрикатов в приспособления необходимо между ними выдерживать зазоры, достаточные для свободного прохождения охлаждающей воды и обеспечивающие быстрое и равномерное охлаждение деталей в закалочном баке.

Трубы авиационного и специального назначения из сплавов марок Д1, Д1ч, Д16, Д16ч, АД33, АК4-1, АК4-1ч, В96Ц, В96Цпч подвергать нагреву под

закалку только в вертикальных воздушно-циркуляционных печах. Скорость погружения садки в воду должна быть не меньше 0,9 м/с. Садка труб должна быть небольшая и рассредоточенная, чтобы обеспечить свободное омывание труб водой снаружи и внутри в процессе закалки.

Старение - термическая обработка сплава, подвергнутого закалке, заключающаяся в нагревании и выдержки его при повышенной температуре с последующим охлаждением на воздухе (искусственное старение) или в выдержке при комнатной температуре (естественное старение) с целью получения более равновесного состояния и требуемого комплекса свойств.

Таблица 22

Режимы старения полуфабрикатов и деталей из алюминия

Марка сплава	Вид полуфабриката	Вид старения	Допустимый интервал температуры старения, °С	Продолжительность старения, ч	Рекомендации по применению режимов термообработки
АД31	Все виды полуфабрикатов	Естественное	Комнатная	240-360	Для обеспечения повышенной пластичности
		Искусственное	160-170	10-12	Для получения повышенной прочности
АД33	Все виды полуфабрикатов, кроме вертолетных профилей	Естественное	Комнатная	240-360	Для обеспечения повышенной пластичности
	Листы, плиты, проволока.	Искусственное	160-170	18-20	
	Прессованные полуфабрикаты, поковки, штамповки.	Искусственное	170-180	8-10	
	Вертолетные профили	Искусственное	165-175	10-12	
АД35	Все виды полуфабрикатов	Естественное	Комнатная	240-360	Для обеспечения повышенной пластичности
		Искусственное	160-170	10-12	Для получения повышенной прочности

АВ	Все виды полуфабрикатов	Естественное	Комнатная	240-360	Для обеспечения повышенной пластичности и коррозионной стойкости
		Искусственное			
		1-й режим	150-165	10-12	Применяется для вертолетных конструкций
		2-й режим	160-170	10-12	Для всех видов полуфабрикатов кроме вертолетных профилей
АК6, АК6ч	Все виды полуфабрикатов	Естественное	Комнатная	>96	Пластичность и коррозионная стойкость выше, а прочностные свойства ниже, чем в искусственно состаренном состоянии
		Искусственное			
		1-й режим	155-165	10-15	
АК8	Штамповки, паковки	Естественное	Комнатная	>96	Пластичность и коррозионная стойкость выше, а прочностные свойства ниже, чем в искусственно состаренном состоянии
		Искусственное			
		1-й режим	155-165	10-15	
		2-й режим	195-205	11-13	Применяется по согласованию с ВИАМ, обеспечивает повышение сопротивления коррозионному растрескиванию при некотором снижении механических свойств

	Листы, прессованные полуфабрикаты	Естественное	Комнатная	>96	Пластичность и коррозионная стойкость выше, а прочностные свойства ниже, чем в искусственно состаренном состоянии
		Искусственное	165-175	10-12	
АК4	Прессованные полуфабрикаты	Искусственное	165-180	10-16	
	Штамповки, паковки	Искусственное			
		1-й режим	165-180	10-16	
		2-й режим	190-00	16-18	2-й режим старения обеспечивает более высокую коррозионную стойкость, повышенный предел текучести и более низкое относительное удлинение по сравнению с 1-м режимом старения
АК4-1 АК4-1ч	Листы	Искусственное			Применяется в тех случаях, когда после закалки следует правка с остаточной деформацией ~ 2%
		1-й режим	185-195	9-14	
		2-й режим	185-195	24	
	Профили, прутки	1-й режим	190-200	12-16	Для неправленных после закалки с остаточной деформацией ~ 2%
		2-й режим	190-200	24	Для неправленных после закалки

	Трубы	1-й режим	195-205	24	Для правленных после заковки
	Плиты	1-й режим	190-200	7-9	
	Поковки, штамповки	1-й режим	185-195	8-12	
Д1, Д1ч	Все виды полуфабрикатов	Естественное	Комнатная	>96	Пластическое деформирование в свежезакаленном состоянии оказывает влияние на последующее старение и приводит к снижению значений предела прочности на 2-3 кгс/мм ² против значений, полученных после старения без деформирования в свежезакаленном состоянии.
Д16, Д16ч, 1163	Все виды полуфабрикатов, листы, листы полунагартованные на 5-7%	Естественное	Комнатная	>96	После естественного старения детали приобретают наилучшее сочетание механических свойств
		Искусственное	185-195	11-13	
			185-195	7-9	
	Прессованные полуфабрикаты	1-й режим	185-195	11-13	Правленные после заковки
		2-й режим	185-195	15-17	Неправленные после заковки
	Плиты	Искусственное	185-195	11-13	Правленные после заковки
	Прессованные полуфабрикаты	Естественное	Комнатная	>96	
1161		Искусственное	185-195	8-10	
ВД17	Прессованные полуфабрикаты	Искусственное			2-й режим старения
		1-й режим	165-175	15-17	

	Штамповки, паковки	2-й режим	190-200	16-18	прессованных полуфабрикатов, поковок и штамповок обеспечивает удовлетворительную коррозионную стойкость под напряжением при пониженной пластичности и вязкости разрушения
		Искусственное			
		1-й режим	180-190	10-12	
		2-й режим	195-205	8-12	
Д19, Д19ч	Все виды полуфабрикатов	Естественное	Комнатная	120-240	
		Искусственное			
		1-й режим	185-195	12-14	Для правленных после закалки
		2-й режим	185-195	15-17	Для неправленных после закалки
ВАД1, 1193	Все виды полуфабрикатов	Естественное	Комнатная	120-240	Детали приобретают наилучшее сочетание механических и коррозионных свойств
		Искусственное	185-195	12-14	Крупные поковки и штамповки применяются только в искусственно состаренном состоянии
1193	Листы	Искусственное	185-195	23-25	
М40	Листы	Искусственное			2-й режим старения
		1-й режим	170-180	18-22	

		2-й режим	195-205	8-10	приводит к повышению предела текучести на 4-6 кгс/мм ² с одновременным снижением относительного удлинения в 1,5-2 раза по сравнению с 1-м режимом старения
	Листы нагартованные	Искусственное	145-155	10-12	
	Прессованные полуфабрикаты	Искусственное	170-180	18-22	
	Штамповки, паковки	Искусственное	190-205	6-10	
Д20	Все виды полуфабрикатов	Искусственное			
		1-й режим	165-175	16-24	Применяется для деталей и полуфабрикатов, предназначенных для кратковременной работы при повышенных температурах.
		2-й режим	200-220	8-12	Применяется для деталей и полуфабрикатов, предназначенных для длительной работы при повышенных температурах.
1201	Листы	Искусственное			1-й режим
		1-й режим	185-195	20-36	применяется для направленных и ненагартованных после закалки полуфабрикатов и деталей

		2-й режим	175-185	18-20	2-й режим для правленных со средней величиной остаточной деформацией 1,5-3% для листов и плит, 1-3% для прессованных полуфабрикатов и 1-5% для поковок и штамповок
		3-й режим	165-175	16-24	3-й режим для нагартованных со средней величиной деформации 7-10% полуфабрикатов и деталей
	Прессованные полуфабрикаты	Искусственное			
		1-й режим	185-195	20-36	
		2-й режим	185-195	18-20	
	Плиты	Искусственное			
		1-й режим	185-195	20-36	
		2-й режим	175-185	18-20	
		3-й режим	175-185	16-18	
	Поковки, штамповки	Искусственное			
		1-й режим	185-195	22-30	
		2-й режим	175-185	18-20	
Д21	Все виды полуфабрикатов	Искусственное	180-195	15-17	
ВАД23, ВАД23пч	Все виды полуфабрикатов	Искусственное			Применяется для деталей и полуфабрикатов, предназначенных для работы при комнатной температуре
		1-й режим	140-150	18-36	

		2-й режим	160-170	8-16	Применяется для деталей и полуфабрикатов, предназначенных для кратковременной работы при повышенных температурах, обеспечивает высокую коррозионную стойкость под напряжением
		3-й режим	200-220	6-15	Применяется для деталей и полуфабрикатов, предназначенных для длительной работы при повышенных температурах, обеспечивает высокую коррозионную стойкость под напряжением
01420	Все виды полуфабрикатов	Искусственное	115-125	5-12	Для обеспечения получения высоких механических свойств, повышенной пластичности и удовлетворительной коррозионной стойкости
1915	Все виды полуфабрикатов	Естественное	Комнатная	>720	
		Искусственное ступенчатое			
		1-й режим Т1			Применяется для деталей и полуфабрикатов, не
		I Ступень	95-105	23-25	

		II Ступень	145-155	10-12	подвергавшихся сварке, обеспечивает предел прочности и текучести на 2-3 кгс/мм ² выше по сравнению со 2-м режимом старения
		2-й режим T1			Применяется для полуфабрикатов, предназначенных для изготовления сварных изделий, обеспечивает повышение коррозионной стойкости и стабильности механических свойств
		I Ступень	95-105	23-25	
		II Ступень	170-180	4-6	
1925	Все виды полуфабрикатов	Естественное	Комнатная	>720	
		Искусственное ступенчатое			
		Режим T1			
		I Ступень	95-105	24	
		II Ступень	170-180	4	
B93, B93пч	Поковки, штамповки, плиты, профили	Режим T1			Обеспечивает предел прочности для всех видов полуфабрикатов в 3 направлениях
		I Ступень	115-125	6-10	

		II Ступень	165-175	4-8	не ниже 48 кгс/мм ² . Для плит толщиной 40-50 мм вдоль и поперек волокна предел прочности не ниже 50 кгс/мм ² , по толщине не ниже 46 кгс/мм ² . Относительное удлинение штамповок и поковок 6; 3,5 и 2% соответственно вдоль, поперек и по толщине.
		Режим T2			Данный режим старения приводит к снижению предела прочности на 3-4 кгс/мм ² с одновременным повышением относительного удлинения на 1% в каждом направлении по сравнению с режимом старения T1; обеспечивает повышение сопротивления коррозионному растрескиванию
		I Ступень	115-125	6-10	
		II Ступень	170-180	6-12	
		Режим T3			Данный режим старения приводит к снижению предела прочности на 6-8 кгс/мм ² с
		I Ступень	115-125	6-10	

		II Ступень	180-190	4-10	одновременным повышением относительного удлинения на 2% в каждом направлении по сравнению с режимом старения T1. Данный режим старения рекомендуется для деталей, работающих при низких температурах, а также в случае замены АК6 сплавами В93 и В93пч; обеспечивает повышение сопротивления коррозионному растрескиванию
В95, В95пч, В95оч	Листы	Искусственное			В случае, если полуфабрикаты из сплава В95, В95пч, В95оч имеют достаточный запас прочности и удлинения по сравнению с требованиями, можно применить старение по режиму T1 для пресованных полуфабрикатов или старение по двухступенчатому режиму: I ступень при 115-125°C, 3ч; II
		Режим T1	115-125	23-25	
		Искусственное ступенчатое			
		Режим T2			
		I Ступень	110-120	5-10	
		II Ступень	160-170	14-18	
		Режим T3			
		I Ступень	110-120	5-10	
		II Ступень	160-170	25-35	
	Пресованные профили, прутки	Искусственное			
		Режим T1	135-145	15-17	
		Искусственное ступенчатое			
		Режим T2			
		I Ступень	110-120	5-10	
		II Ступень	160-170	8-20	
		Режим T3			
		I Ступень	110-120	2-10	

		II Ступень	170-180	6-16	ступень при 157-165°C, 3ч. Оба этих режима обеспечивают повышение коррозионной стойкости.
	Штамповки, паковки	Искусственное			В случае, если полуфабрикаты имеют достаточный запас прочности и удлинения по сравнению с требованиями, можно применить старение по режиму T1: I ступень при 115-125°C, 3ч; II ступень при 157-165 °C, 3ч
		Режим T1	135-145	15-17	
		Искусственное ступенчатое			
		Режим T2			
		I Ступень	110-120	5-10	
		II Ступень	165-175	10-20	
		Режим T3			
		I Ступень	110-120	5-10	
		II Ступень	175-185	8-18	
В96Ц, В96Цпч, В96Ц-1	Прессованные полуфабрикаты, штамповки	Искусственное			Ступенчатое старение по режиму T1 и T2 применять только для сплава В96Ц-1
		Режим T1	135-145	15-17	
		Искусственное ступенчатое			
		Режим T1			
		I Ступень	110-125	3-10	
		II Ступень	155-170	3-10	
		Режим T2			
		I Ступень	110-125	3-10	
		II Ступень	170-180	3-20	

“Смягчающее” старение (перестаривание) по сравнению с режимом T1 обеспечивает повышенное сопротивление коррозионному растрескиванию, расслаивающей и межкристаллитной коррозии, а также повышенные характеристики конструкционной прочности при незначительном (до 7% в состоянии T2 и до 14% в состоянии T3) снижении уровня прочностных свойств материала. Применение полуфабрикатов в состояниях T2 и T3 приводит к существенному повышению надежности и долговечности конструкций.

Благоприятное сочетание прочностных, коррозионных свойств и характеристик вязкости разрушения в состояниях T2 и T3 обеспечивается регламентированием структуры распада твердого раствора. Назначение первой ступени старения (зонного старения), которую проводят при температурах ниже T_k (температуры растворения ЗГП) заключается в

создании большого числа центров зарождения упрочняющей фазы для обеспечения высоких конечных свойств полуфабрикатов.

Вторую, коагуляционную ступень старения проводят при температурах выше T_k . При увеличении температуры и времени старения на этой ступени получают различные стадии перестаривания сплавов и соответствующее повышение коррозионной стойкости, вязкости разрушения и электропроводности.

6.2. Фазовые превращения при термообработке алюминиевых сплавов

Структура и свойства слитка в значительной степени определяет 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 слитка 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, связанная, например, с ликвацией; пористость и неметаллические включения; величина и ориентировка зерен; размеры ветвей дендритов; неравновесность фазового состава. Влияние этих параметров на свойства слитков и полуфабрикатов, а также меры по улучшению качества слитков приведены в источнике / 5 /.

В алюминиевых промышленных сплавах наблюдается только один вид фазовых превращений. При нагреве интерметаллидные фазы растворяются в алюминии, образуя твёрдый 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 зависит 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 распределённые по всему объёму слитка. Происходит и изменение структуры. Крупные дендритные зёрна сменяются более мелкими, равноосными. Всё 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 твёрдого раствора. С этой целью сплав нагревают до температуры ниже линии солидус во избежание пережога, по возможности до более высокой температуры, чтобы обеспечить максимально возможное растворение избыточных фаз в твёрдом растворе. Поэтому температура закалки должна находиться выше линии переменной растворимости. Скорость растворения избыточных фаз определяет время выдержки при температуре нагрева под закалку. Чем более сложнолегированный сплав, тем больше избыточных фаз, тем больше время выдержки. После закалки все сплавы, обладая повышенной прочностью по сравнению с отожжённым состоянием, сохраняют высокую пластичность.

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

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

2. Выделение из твёрдого раствора частиц промежуточной фазы с химическим составом, соответствующим составу фазы CuAl_2 но, с метастабильной кристаллической решёткой отличной от решётки этой фазы и всё ещё когерентно связанной с решёткой твёрдого раствора.

3. Образование стабильной θ -фазы (CuAl_2) со своей кристаллической решёткой, отделённой от твёрдого раствора поверхностью раздела.

4. Рост и коагуляция θ -фазы.

По подобной схеме (табл.23) происходит распад твёрдых растворов и других, промышленных термически упрочняемых сплавов. Отличие заключается в том, что в каждом сплаве образуются свои упрочняющие фазы.

Таблица 23

Стадии распада пересыщенного твёрдого раствора
промышленных сплавов

Система	Марка сплава	Превращения твёрдого раствора
Al-Cu	АЛ 7	ЗГП - θ'' - θ' - θ (Cu Al_2)
Al-Mg	АЛ 8	ЗГП - β' - β ($\text{Al}_3 \text{Mg}_2$)
Al-Cu-Mg	Д 16	ЗГП - S' - S ($\text{Al}_2 \text{CuMg}$)
Al-Cu-Mg-Fe-Ni	АК 4-1	ЗГП - S' - S ($\text{Al}_2 \text{CuMg}$)
Al-Mg-S	АД 31	ЗГП - $(\text{Mg}_2 \text{Si})'$ - Mg_2 - Si
Al-Zn-Mg	1915	ЗГП - η' - η (MgZn_2)- $T(\text{Al}_2 \text{Mg}_3 \text{Zn}_3)$
Al-Zn-Mg-Cu	В 95	ЗГП - η' - η (MgZn_2)

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

Повышение температуры и увеличение продолжительности процесса старения ускоряют процесс распада твёрдого 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.

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 наклёпа. В зависимости от требований заказчика полуфабрикаты из этих сплавов поставляются в нагартованном, полунагартованном и отожжённом 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 наклёпа при отжиге происходит за счёт рекристаллизации, т.е. образование и рост новых зёрен взамен деформированных. В результате уменьшается плотность дислокаций на несколько порядков. Прочность и твёрдость 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 рекристаллизованного 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 крупнозернистости и разностручности в полуфабрикатах, т.к. это ведёт к ухудшению механических свойств.

Высокая температура отжига также стимулирует быстрый рост зерна за счёт процессов собирательной рекристаллизации. Однако, при этом следует иметь ввиду, что 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, Ni. Избежать крупнозернистости можно, применяя быстрый нагрев до температур на 50-150°C, превышающих температуру окончания первичной рекристаллизации, но не допуская одновременного прохождения собирательной рекристаллизации, которая может наблюдаться при чрезмерно высоких температурах и длительных выдержках.

На практике температура рекристаллизационного отжига 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.

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

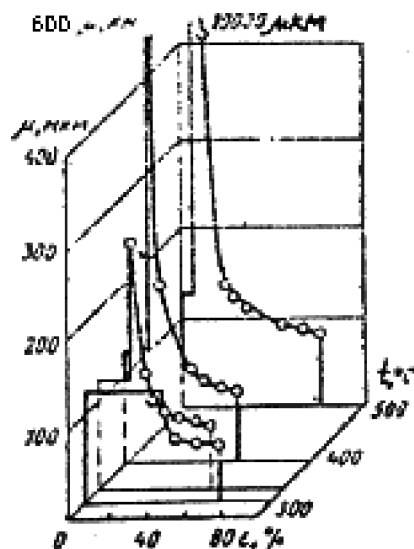


Рис.48

Диаграмма рекристаллизации сплава Д1. Отжиг при

температуре 500°C в течение 3 ч. - осадка на копре; ---осадка на прессе

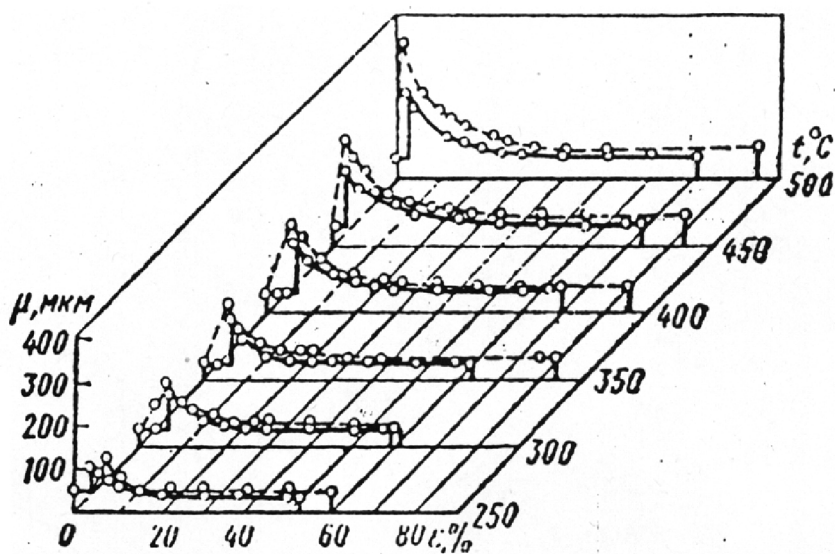


Рис.49

Диаграмма рекристаллизации сплава ВД17
осадка на прессе (а); осадка на копре

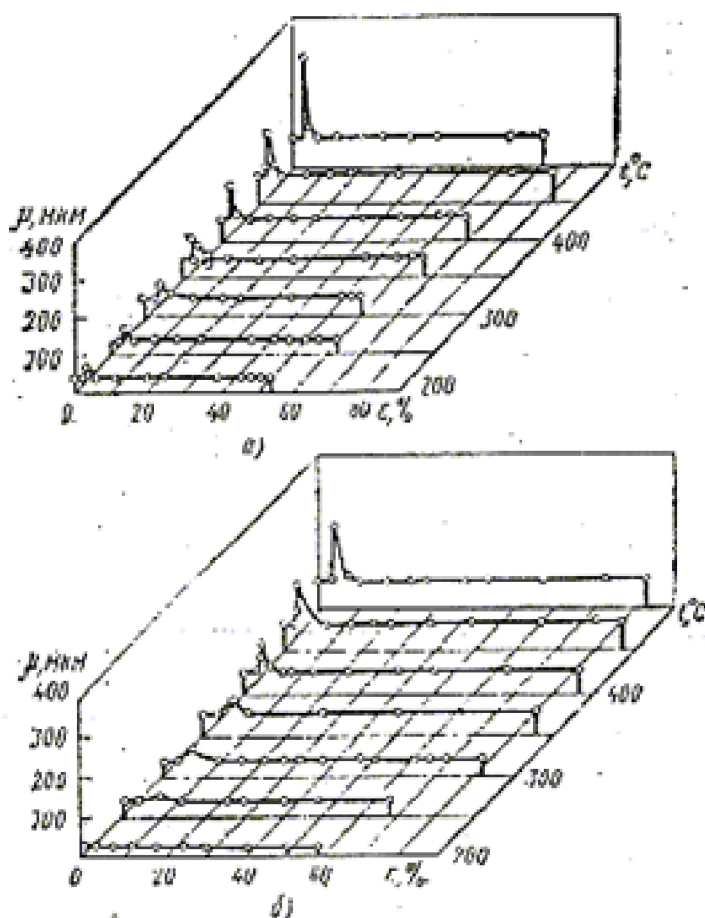


Рис.50

Диаграмма рекристаллизации сплава АК6

осадка на прессе (а); осадка на копре (б)

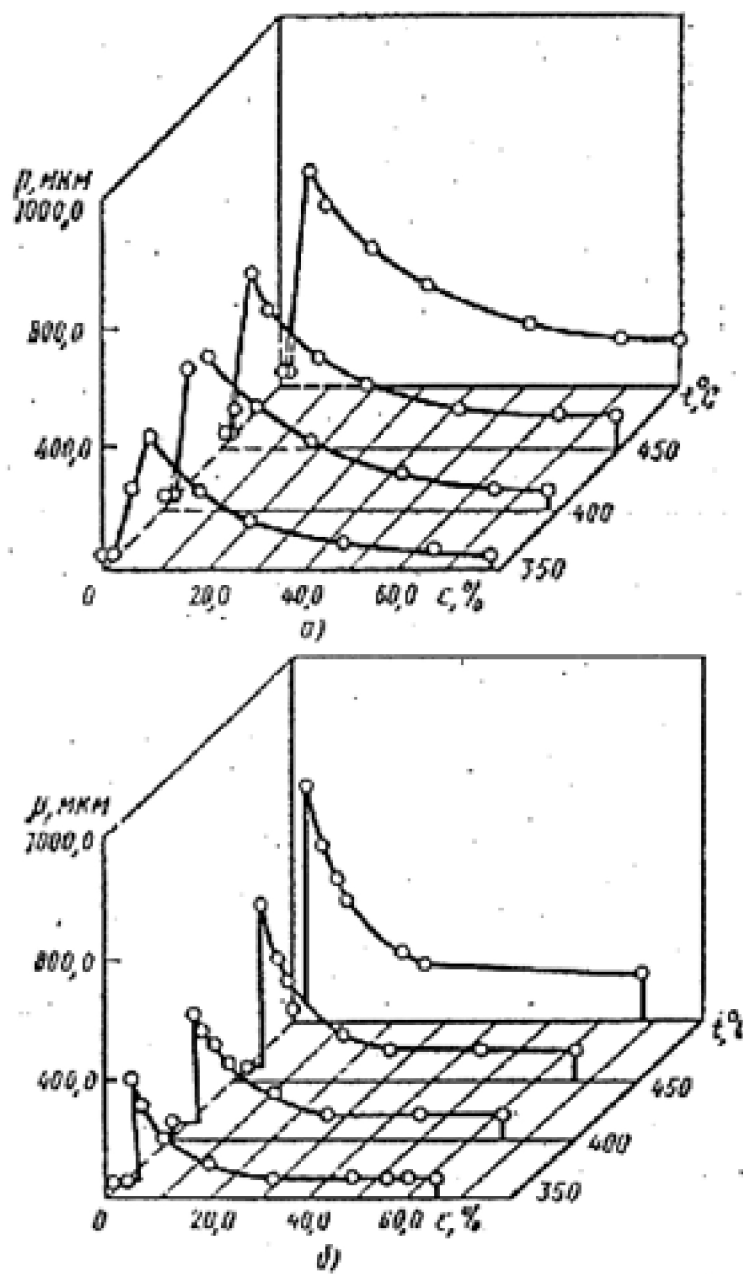


Рис.51

Диаграмма рекристаллизации сплава АК8
осадка на прессе (а); осадка на копре (б)

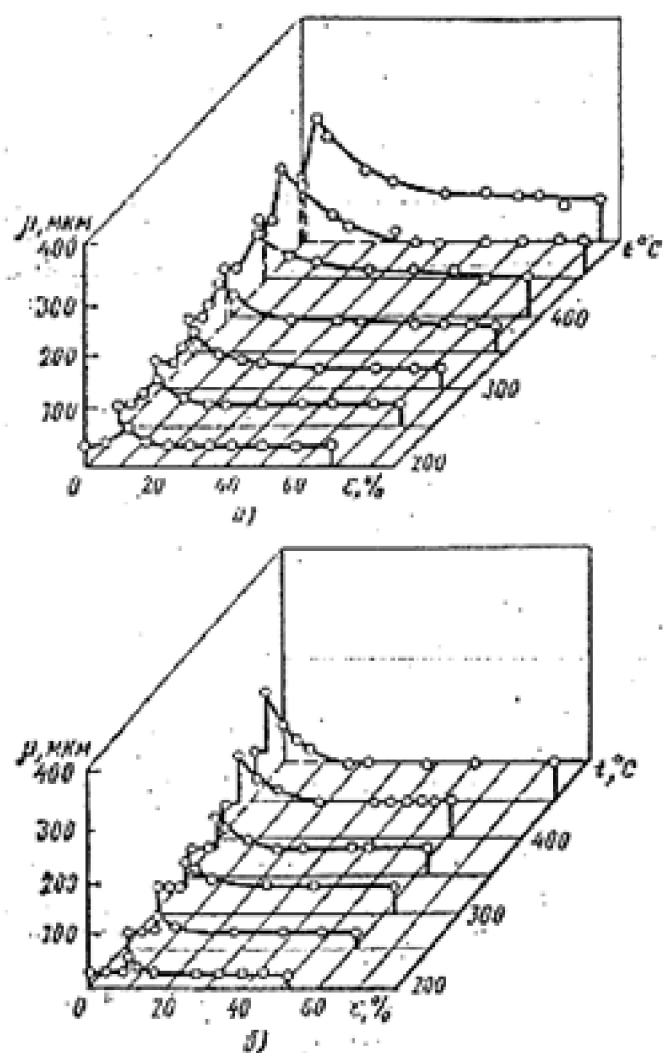


Рис.52

АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

7.1. Классификация и конструктивные особенности печей для термообработки алюминиевых сплавов

В промышленности для термообработки деталей и полуфабрикатов из алюминиевых сплавов применяются главным образом электрические печи и ванны. Эти агрегаты относятся к низкотемпературным, т.к. максимальная рабочая температура в них лежит ниже 600-700°C. В зависимости от требуемой производительности и места в технологическом процессе производства полуфабрикатов применяются 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.

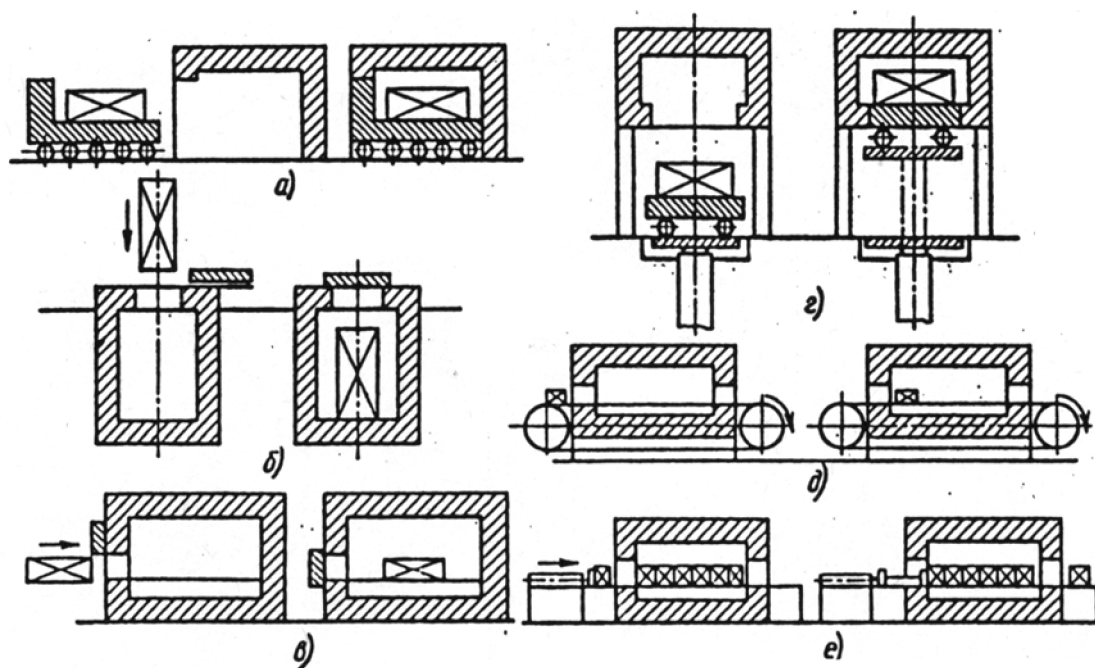
Большое значение при термической обработке цветных сплавов имеет точность регулирования температуры в рабочем пространстве печи. Для большинства алюминиевых сплавов допустимый перепад температуры перед закалкой составляет 10-15°C, т.к. температура нагрева находится очень близко от линии солидуса. Превышение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

Поддержание необходимой температуры в печи обеспечивается её 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 счёт встроенных вентиляторов, циркуляция атмосферы, которая исключает возможность неравномерного нагрева по объёму 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 объёмах 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 используемой 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 .

Схемы термических печей



а - с выдвижным подом; б - шахтная; в - камерная;
г - элеваторная; д - конвейерная ; е – толкательная

Рис.53

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-роликоконвейерная, 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,

Н - водород, О - окислительная (воздух), С-соль, селитра,

Ц - цементация, Щ - щёлочь.

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 2м, высота 1,5м, температура 300 °С.

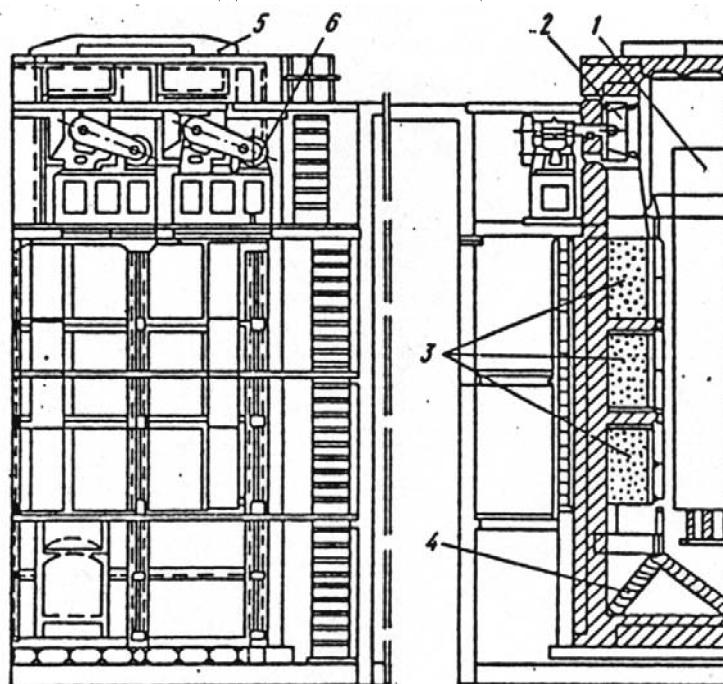
Тип печи для термической обработки выбирают с учётом ряда факторов. В первую очередь определяют необходимую рабочую температуру в зависимости от обрабатываемого материала. Затем рассматривают весь перечень деталей или полуфабрикатов, подвергаемых обработке. Окончательный выбор печи и степень её механизации зависит 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 поштучным охлаждением каждого листа или охлаждением целой стопы. Существуют также специальные агрегаты для непрерывной термообработки, движущейся ленты. Отжиг ленты, свёрнутой 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 описаны в источниках [6,11,13,16].

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.

Рис.54

Камерная печь с неподвижным подом

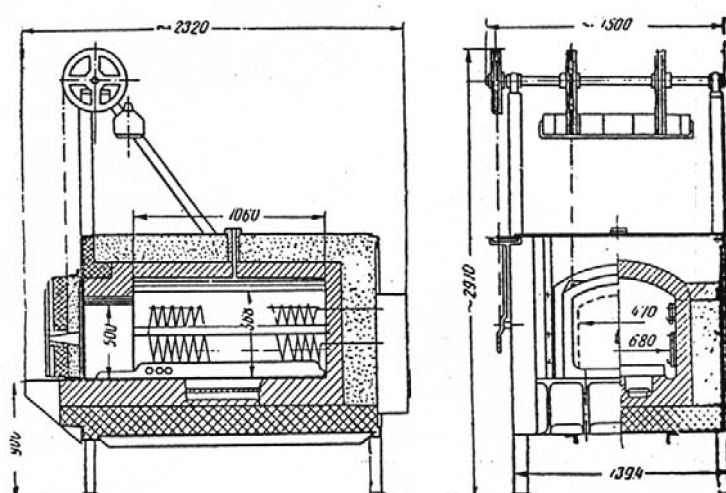
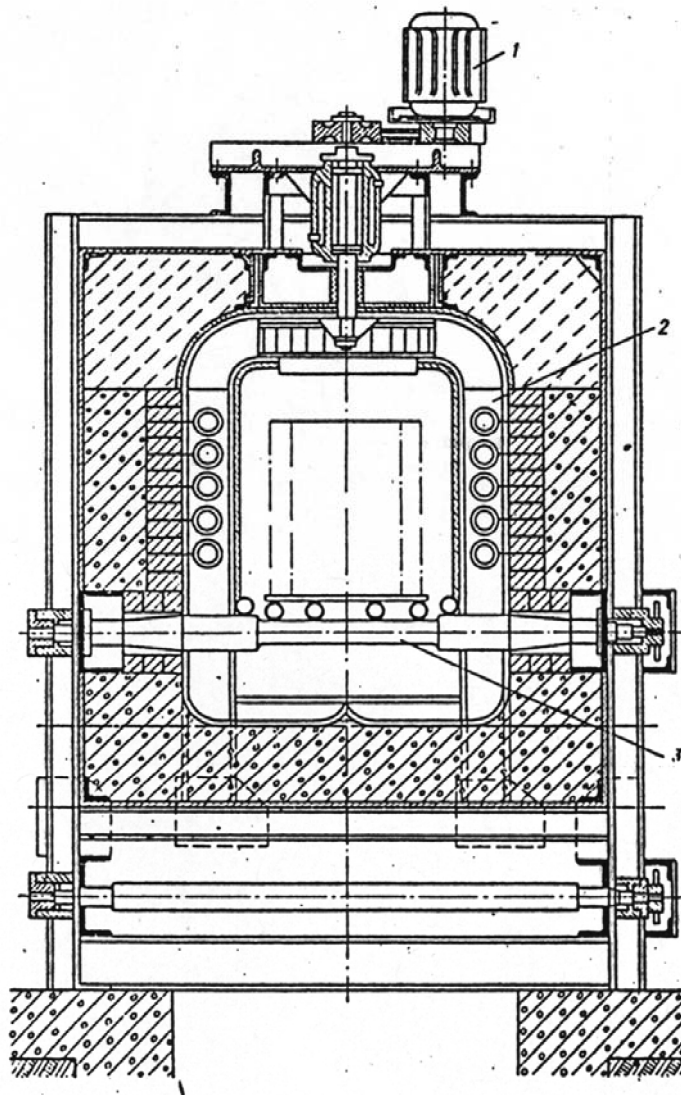


Рис.55

Поперечный разрез проходной электропечи отжига с
роликовым подом



- 1-двигатель привода вентилятора для циркуляции воздуха;
2-нагревательные элементы; 3-роликовый под

Рис.56

Электрическая солевая ванна с наружным обогревателем

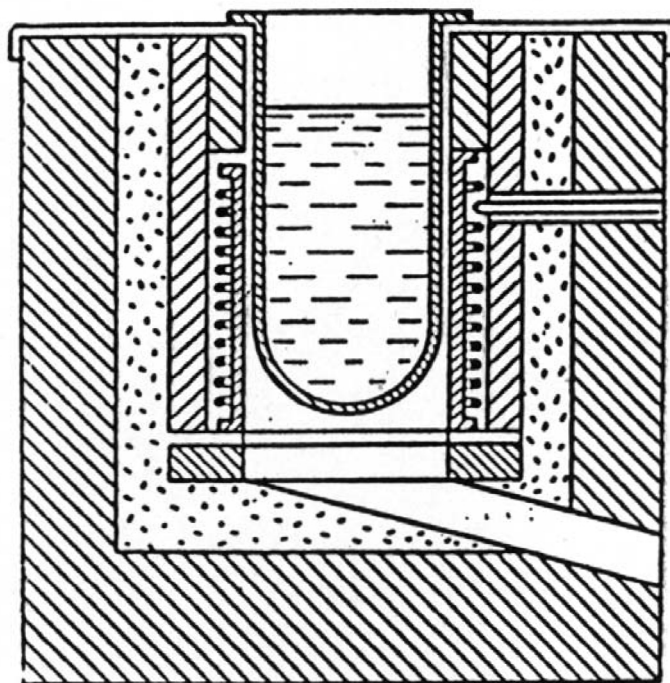


Рис.57

Шахтная электропечь с принудительной циркуляцией воздуха

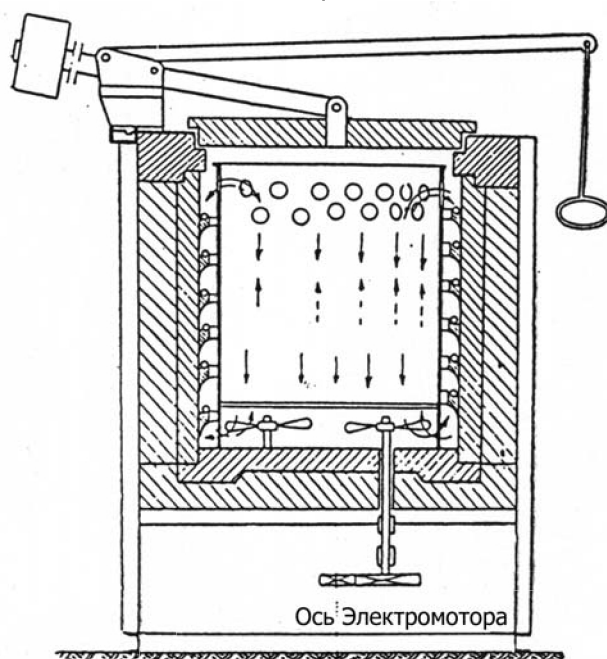


Рис.58

Электрическая соляная печь-ванна с трубчатыми электронагревателями

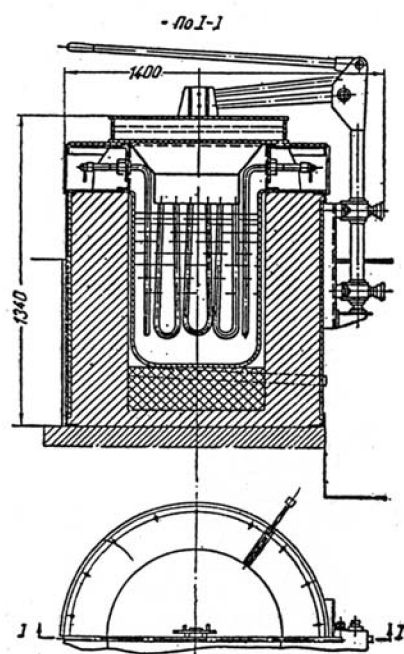


Рис.59

Установка для закалки больших листов

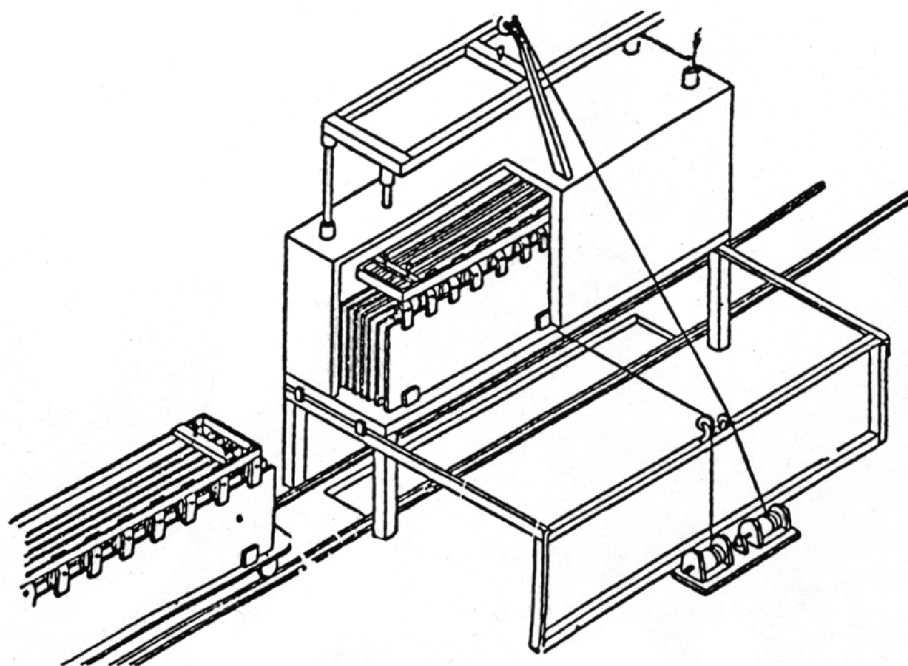
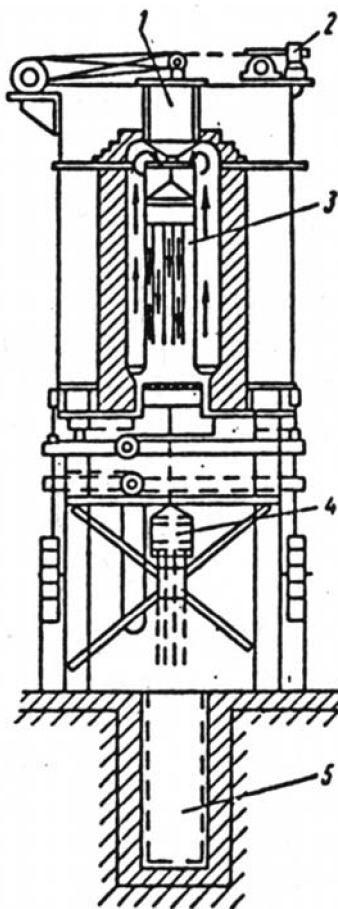


Рис.60

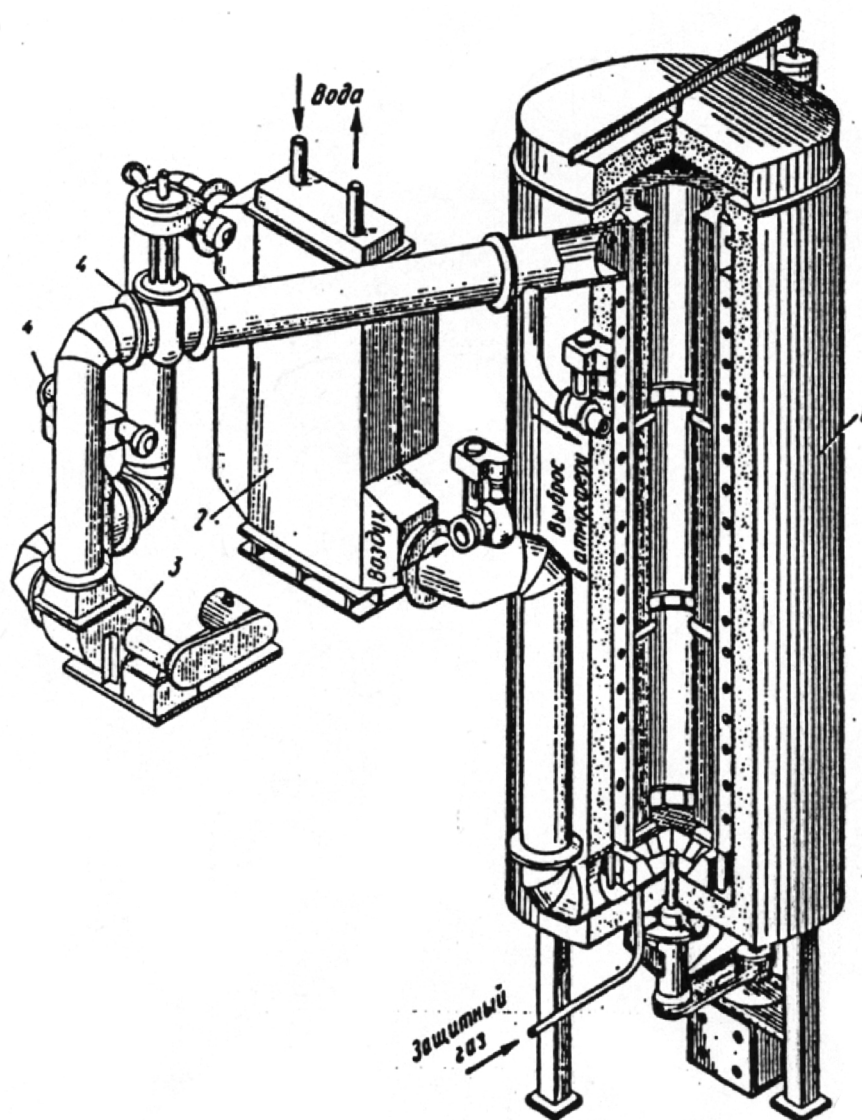
Поперечный разрез воздушной электропечи для закалки листов из алюминиевых сплавов



1-вентилятор для циркуляции воздуха; 2-лебёдка для подъёма и опускания садки; 3-садка листов в камере нагрева; 4-опускание садки в закалочный бак; 5-закалочный бак

Рис.61

Схема шахтной (колодцевой) печи



1-шахтная электропечь; 2-теплообменником; 3-охлаждающий вентилятор; 4-газопровод с запорной арматурой

Рис.62

Вертикальная электропечь для закалки профилей

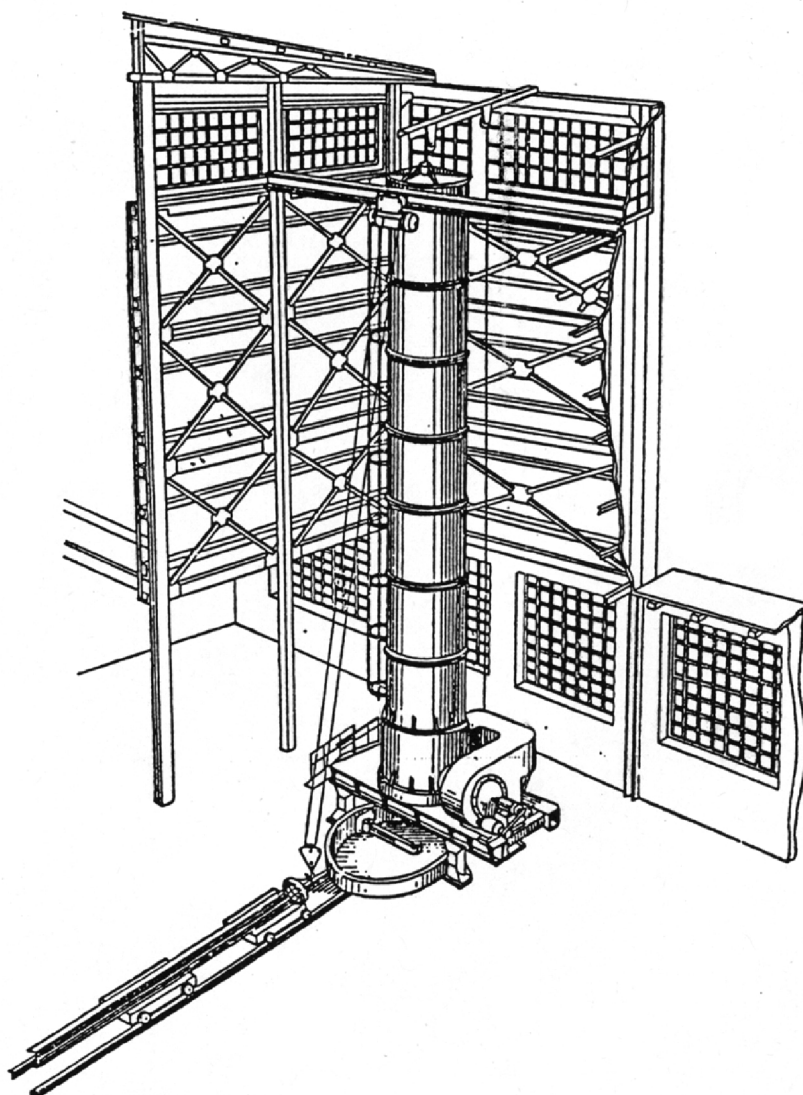
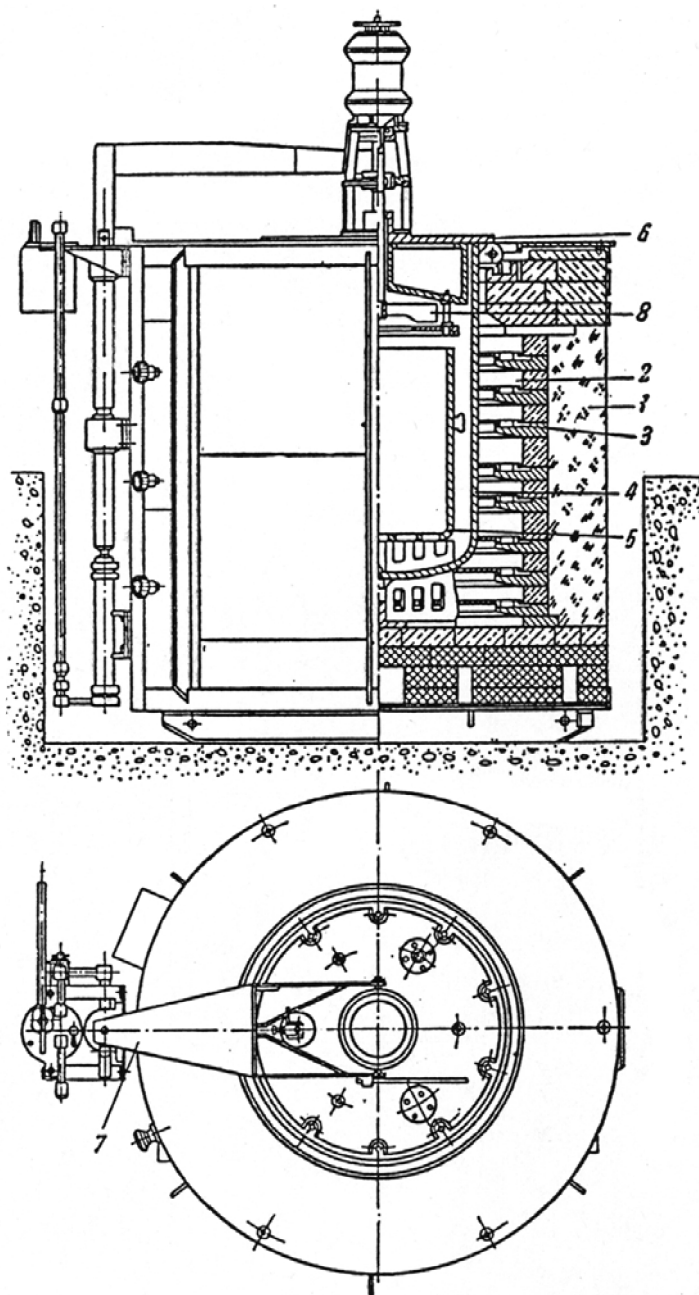


Рис.63

Шахтная электрическая печь



- 1 - металлический каркас; 2 - нагревательная камера;
 3 - нагреватели; 4 - реторта; 5 - корзина; 6 - крышка;
 7 - механизм подъёма крышки; 8 - вентилятор.

Рис.64

Индукционная печь промышленной частоты

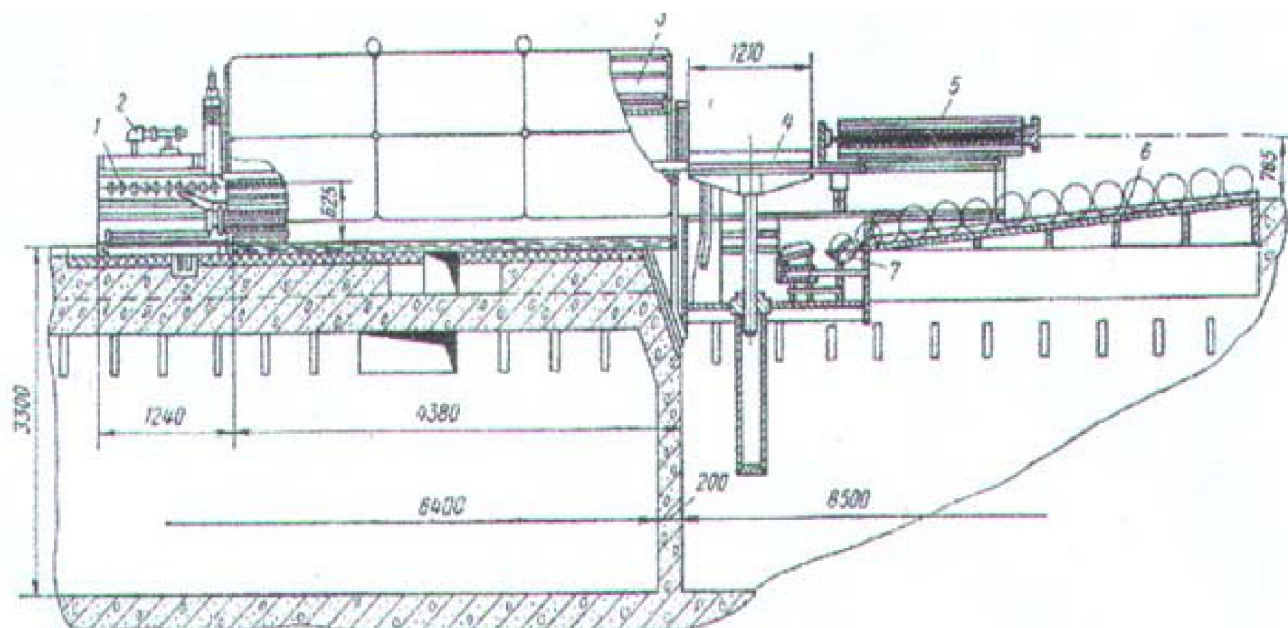
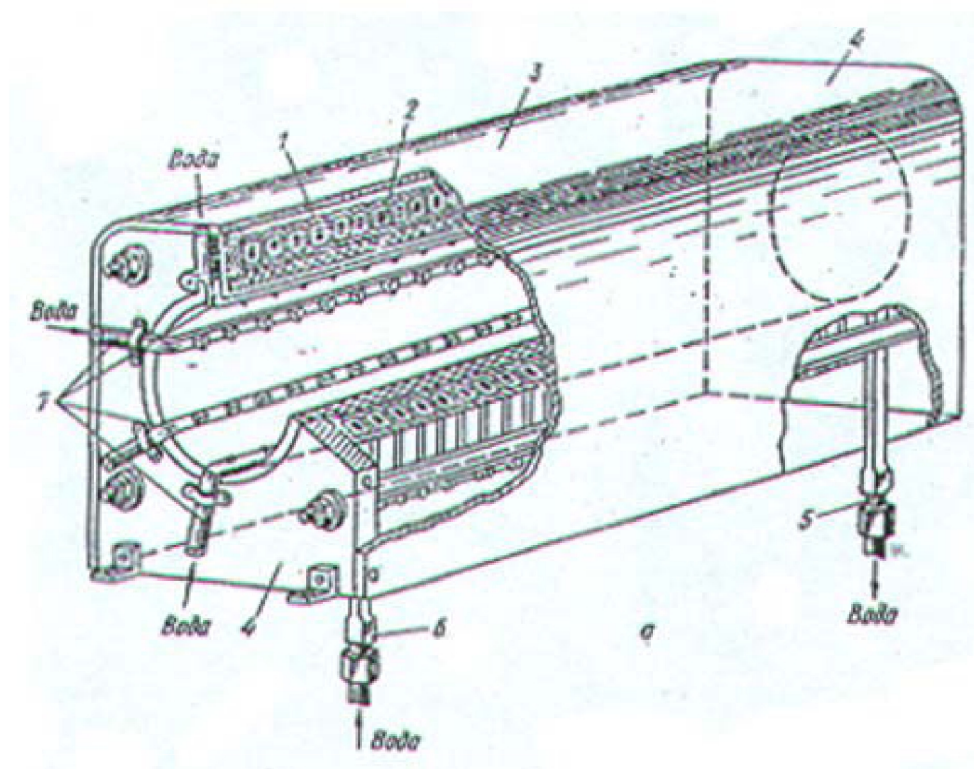


Рис. 65
Нагревательный индуктор



1 - индуктор; 2 – теплоизоляция; 3 – кожух; 4 – торцевые плиты; 5,6 – подвод тока и воды; 7 – металлические направляющие.

Рис.66

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.

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 многэтажные 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 ведётся 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 сек. 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 сек. для тонких деталей и 25-30 сек. для массивных полуфабрикатов.

При нагреве садки в воздушной среде температура садки, как правило, отстает от температуры нагревающего воздуха. Поэтому температуру садки необходимо контролировать по термопаре заложенной в садку вблизи выхода нагревающего воздуха из рабочего пространства печи. Во избежание пережога 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 прессэффекта и уменьшению прочности материала, особенно в продольном направлении.

Особенно вредно длительное время выдержки при температуре закалки для плакированных полуфабрикатов, т.к. диффузия меди и магния из сердцевины 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. Энергичное 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.

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 люминесцентного, 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) пережог;

- 7) коррозия;
- 8) шиферный 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 устранимы повторной термообработкой.

Неравномерная закалка характерна для изделий со сложной конфигурацией и различной толщиной. Она проявляется в неодинаковых механических свойствах 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 резче нагрев или охлаждение, чем больше разница в толщине стенок деталей, тем больше возникающие внутренние напряжения и тем больше коробление. Усиливать внутренние напряжения могут и фазовые превращения, проходящие при термообработке. Остаточные напряжения меньше предела упругости 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 закрепленными 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 и 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 селитровых ваннах вызывается примесями хлоридов, поэтому их количество не должно превышать 0,5%. Развитию коррозии способствуют также остатки селитры и для её 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 зёрен. Для её предотвращения рекомендуется повышать скорость охлаждения деталей при закалке.

Шиферная структура излома, состоящая из пластичных и грубокристаллитных слоёв, 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 твёрдого 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 счёт 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.

Подготовительные операции включают в себя комплекс мероприятий, предшествующих термообработке. Это такие операции как фрезировка 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 её приводится эскиз изделия и его основные свойства, оговорённые в технических условиях.

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

Пример заполнения технологической карты приведён ниже.

Карта технологического процесса термической обработки

Эскиз и основные размеры.				Материал			Д16	
				Твердость поверхности			Сквозное упр.	
Лист толщина 2 мм				Механические свойства			$\sigma_B=430\text{МПа}$	
№	Наименование операций	Оборудование	Садка	Режим			Наименование приспособл.	Контроль
				Т, °С	Время, ч	Среда		
1	Гомогенизация	Печт шахтная	Вертикаль	480 - 500	8	Воздух		Контроль температуры
2								

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Структура и свойства алюминиевых сплавов. Мондольфо Л.Ф. Перевод с английского. М., «Металлургия», 1979 - 640с.
2. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: в 3т./Под общей редакцией Н.П. Лякишева. - М.: Машиностроение, 1996 - 992с.
3. Конструкционные материалы: Справочник/ Б.Н. Арзамасов, В.А. Брострем и др.: - М.:Машиностроение,1990 - 688с.
4. Авиационные материалы: Справочник. В 9-ти т.: Т.4. Алюминиевые и бериллиевые сплавы /Под общ. ред. Р. Е. Шалина. Ч.1. М.:ОНТИ,1982.627 с.
5. Бунова Г.З. Деформируемые алюминиевые сплавы: Метод. разработка/ Куйбышев. авиац. ин-т; Сост. Бунова Г.З. Куйбышев,1990. 64 с.
6. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. Учебник для вузов/Колачёв Б. А., Ливанов В. А., Елагин В.И. М.:МИСИС,2001. 416 с.
7. Мальцев М.В. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов. М.:Металлургия,1970. 364 с.
8. Структура и свойства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов: Справочник/Под ред. Ливанова В.А. М: Metallurgy, 1974.408 с.
9. Колпашников А.И. Прокатка листов из лёгких сплавов. М.:Металлургия,1979. 264 с.
- 10.Мастеров В. А., Берковский В. С. Теория пластической деформации. М.:Металлургия,1989. 400с.
- 11.Полухин П.И., Хензель А., Полухин В.П. и т.д. Технология процессов обработки металлов давлением/ Под ред. Полухина П.И. М.:Металлургия,1988.408 с.
- 12.Жолобов В.В., Зверев Г.И. Прессование металлов. М.:Металлургия,1971. 456 с.
- 13..Ерманок М.З., Коган Л.С., Головинов М.Ф. Прессование труб из алюминиевых сплавов. М.:Металлургия,1976.321 с.
- 14.Ковка и штамповка: Справочник.В 4-х т.:Т.1.Материалы и нагрев, оборудование, ковка/Под ред. Семёнова Е.И. М.: Машиностроение,1985.568 с.
- 15.Колачёв Б.А., Габидулин Р.М., Пигузов Ю.М. Технология термической обработки цветных металлов и сплавов. М.: Metallurgy,1980.280 с.
- 16.Долотов Г.П., Кондаков Е.А. Оборудование термических цехов и лабораторий испытания металлов. М.: Машиностроение 1988. 336 с.

- 17.Соколов К.Н.,Коротич И.К. Технология термической обработки термических цехов. М.:Металлургия,1988. 384 с.
- 18.Колобнев И.Ф. Термическая обработка алюминиевых сплавов. М.:ГНТИ,1961. 416 с.
- 19.Фиргер И.В. Термическая обработка сплавов: Справочник. Л.:Машиностроение,1967. 304 с.
- 20.Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов. 2-е изд. М., Metallurgy, 1973, 224 с.
- 21.Кроха В.А. Кривые упрочнения металлов при холодной деформации .М., Машиностроение, 1968, 131 с.
- 22.Юшков А.В. Механические свойства и показатели деформируемости некоторых промышленных металлов и сплавов. Куйбышев, КуАИ, 1974, 224 с.