

Практическая Работа

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ

I. Цель работы

Изучение структуры и свойств различных групп алюминиевых сплавов и процессов их термической обработки.

II. Теоретическое обоснование

Алюминий из-за невысокой прочности ($\sigma_B \leq 140$ МПа даже в наклепанном состоянии) как конструкционный материал практически не используется. Сплавы на основе алюминия, сохраняя присущие ему достоинства (низкую плотность, 2700 кг/м³ (2,7 г/см³), высокую коррозионную стойкость), обладают достаточно высокой прочностью (после термической обработки) и хорошими технологическими свойствами: способностью свариваться, подвергаться различным видам механической обработки; литейными и т.п. Это обусловило выдвигание алюминиевых сплавов на второе место после стали по объему производства.

Алюминиевые сплавы классифицируются по двум признакам: по технологическим свойствам, определяющим способ изготовления полуфабрикатов и деталей; по способности эффективно упрочняться в результате термической обработки.

По первому признаку алюминиевые сплавы подразделяются на **деформируемые** и **литейные**. Из деформируемых сплавов методами холодной и горячей пластической деформации получают полуфабрикаты в виде листов, профилей, прутков и т.п. Литейные сплавы предназначены для отливки деталей.

Деформируемые и литейные алюминиевые сплавы по их способности упрочняться в результате термической обработки классифицируются на **упрочняемые** и **не упрочняемые термической обработкой**.

Деформируемые сплавы, упрочняемые термической обработкой, легируют медью, магнием, марганцем, цинком, литием. Эти элементы образуют с алюминием твердые растворы (α) с ограниченной растворимостью и промежуточные фазы, например, CuAl_2 , Mg_2Al_3 , MnAl_6 , Al_3Li .

Характерной особенностью α -твердого раствора на основе алюминия является значительное увеличение растворимости легирующих элементов с повышением температуры (например, в системе Al-Cu максимальная растворимость меди в алюминии возрастает почти в 30 раз при нагреве в интервале 20...548 °С - см. рис. 1).

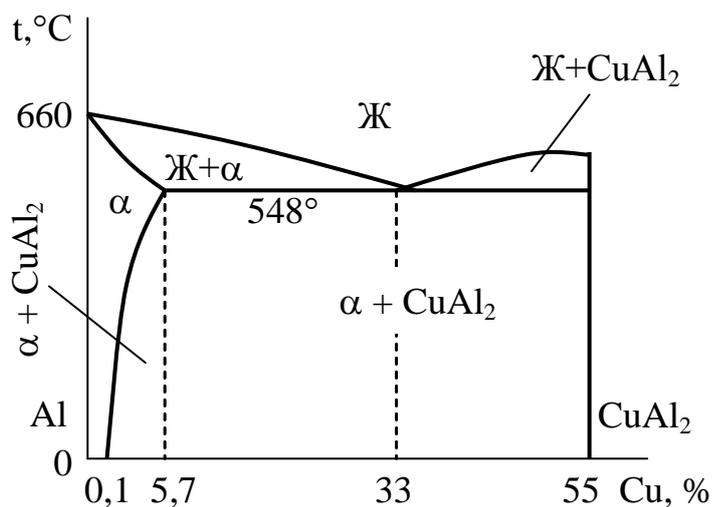


Рис. 1. Диаграмма состояния алюминий-медь

Содержание легирующих элементов в сплавах данной группы приближается к составу, отвечающему предельной растворимости в α -растворе, но не превосходит его, т.е. структура этих сплавов в равновесном состоянии: α -твердый раствор с включениями соответствующих промежуточных вторичных фаз. Это, с одной стороны, обеспечивает сохранение деформируемости сплава, так как его основа - пластичный α -раствор, с другой - создает возможность эффективного упрочнения термической обработкой.

Основы теории термической обработки алюминиевых сплавов могут быть рассмотрены на примере **дуралюминов** - сплавов системы Al-Cu-Mg. Эти сплавы содержат около 4...5 % Cu, поэтому согласно диаграмме Al-Cu (рис. 1), их структура в равновесном состоянии: α -твердый раствор с включениями промежуточной фазы CuAl_2 , называемой θ -фазой.

Упрочняющая термическая обработка состоит из двух этапов: закалки и старения.

Для закалки сплав нагревается выше линии предельной растворимости, так что θ -фаза полностью растворяется.

Быстрое охлаждение до комнатной температуры фиксирует однофазную структуру пересыщенного медью α -раствора. Прочность при этом изменяется мало (сравните с закалкой стали, практическая работа № 3). Существенное увеличение прочности происходит в результате старения - процессов, протекающих при длительной выдержке неравновесного, закаленного сплава при комнатной или повышенной температуре. В зависимости от природы сплава и режима старения структура сплава в той или иной мере приближается к равновесному ($\alpha + \theta$) состоянию.

Длительная выдержка закаленного сплава при комнатной температуре (“естественное старение”) не приводит к образованию θ -фазы. В отдельных плоскостях решетки α -раствора начинают скапливаться атомы меди, однако их концен-

трация еще не достигает той, которая необходима для образования зародышей θ -фазы (55,4 % Cu). Из-за разницы атомных радиусов меди (0,128 нм) и алюминия (0,143 нм) решетка α -раствора в местах скопления меди сильно искажается. Эти области искажений называются **зонами Гинье-Престона** или зонами ГП. Являясь искажениями решетки, зоны ГП препятствуют скольжению дислокаций и эффективно упрочняют сплав (рис. 2).

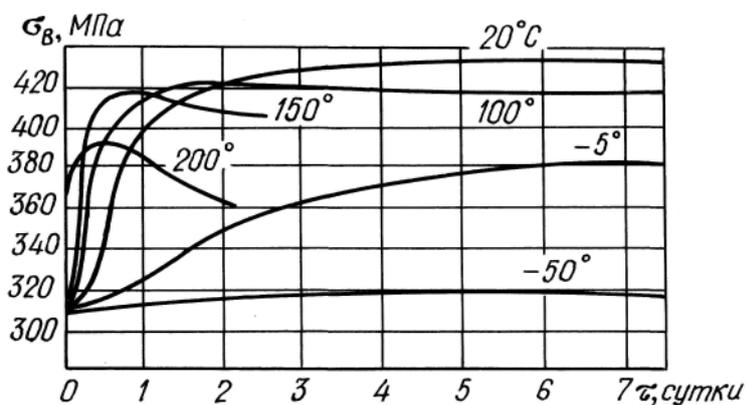


Рис. 2. Зависимость прочности дуралюмина от режима старения

В результате “искусственного старения” при 100...150 °С в местах скопления меди в α -растворе образуются метастабильные θ' - и θ'' - фазы, отличающиеся от равновесной θ -фазы типом решетки. Решетка метастабильной фазы еще не отделена от решетки α -раствора (когерентная связь), а так как параметры этих решеток различны, то в местах образования θ' - и θ'' -фаз решетка α -раствора искажается. Степень искажения однако меньше, чем в случае образования зон ГП, поэтому меньше и эффект упрочнения (рис. 2).

Еще меньше величина упрочнения при старении в интервале 200...250 °С. При этих температурах образуется равновесная θ -фаза, ее решетка полностью отделена от решетки α -раствора. В результате снимаются искажения решетки α -раствора и понижается степень упрочнения; на этом этапе оно обусловлено торможением дислокаций мелкодисперсными выделениями θ -фазы. Из рис. 2 видно, что длительная выдержка при 200...250 °С, приводящая к коагуляции упрочняющих частиц θ -фазы, вызывает уменьшение прочности (“перестаривание”).

Промышленные деформируемые сплавы, упрочняемые термической обработкой - это главным образом, дуралюмины - сплавы системы Al-Cu-Mg. Кроме того, в них вводится марганец для повышения коррозионной стойкости.

В табл. 1 приведены состав и свойства наиболее распространенных дуралюминов, а также относящихся к этой группе высокопрочных (В95, ВАД23),

Таблица 1

Химический состав и механические свойства деформируемых алюминиевых сплавов, упрочняемых термической обработкой (ГОСТ 4784-97)

Марка сплава	Химический состав, % (остальное Al)				d, г/см ³	Упрочняющая термообработка	σ_b , МПа	δ , %
	Cu	Mg	Mn	Другие элементы				
Д16	3,8...4,9	1,2...1,8	0,3...0,9	Fe 0,5; Si 0,5	2,8	Закалка 500°C, старение 20°C, 96 часов	470(220)	17(18)
Д18	2,2...3,0	0,2...0,5	0,2	Fe 0,5; Si 0,5	2,76	То же	300(160)	24(24)
01420	—	5,0...6,0	0,3	Li 1,9...2,3 Zr 0,09...0,15	2,5	Закалка 500°C, старение 170°C, 10...12 ч	450	4...5
В95	1,4...2,0	1,8...2,8	0,2...0,6	Zn 5,0...7,0 Cr 0,1...0,25	2,85	Закалка 470°C, старение 130°C, 16...24 ч	500...580	7...5
ВАД23	4,8...5,8	—	0,4...0,8	Li 0,9...1,4 Cd 0,1...0,25	2,72	Закалка 520°C, старение 170°C, 10...12 ч	550...580	4
АК8	3,9...4,8	0,4...0,8	0,4...1,0	Si 0,6...1,2	2,8	Закалка 500°C, старение 160°C, 6...15 ч	450...460	10
АК4-1	1,9...2,7	1,2...1,8	—	Fe 0,8...1,4 Ni 0,8...1,4; Si 0,35	2,8	Закалка 530°C, старение 190°C, 10 часов	430	13

В скобках указаны значения σ_b и δ дуралюминов в отожженном состоянии.

ковочных (АК8) и жаропрочных (АК4) сплавов. Отличительной чертой сплавов этой группы является высокая **удельная прочность** (отношение прочности к плотности сплава), обусловившая их широкое применение в авиации, транспортном машиностроении и приборостроении.

Деформируемые сплавы, *не упрочняемые термической обработкой*, в равновесном состоянии имеют структуру α -твердого раствора, либо α -раствора, с включениями промежуточных фаз. При двухфазной структуре упрочнение термической обработкой, в принципе, возможно (если промежуточные фазы растворимы в α -растворе), однако его эффект мал из-за небольшого количества упрочняющей фазы. Поэтому сплавы данной группы упрочняющей термообработке не подвергаются, их можно упрочнять пластической деформацией (наклеп).

К этой группе относятся сплавы системы Al-Mn (маркируются АМц) и Al-Mg (АМг), они имеют невысокую прочность, легко обрабатываются, хорошо свариваются и обладают высокой коррозионной стойкостью. Состав и свойства сплавов этой группы приведены в табл. 2.

Таблица 2

Химический состав и механические свойства алюминиевых сплавов, не упрочняемых термической обработкой (ГОСТ 4784-97)

М а р к а с п л а в а	Химический состав, % (остальное Al)		$\sigma_{в}$, МПа	δ , %
	Mn	Mg		
АМц	1,0...1,6	—	130(220)	25(23)
АМг2	0,6...0,6	1,8...2,8	200	23
АМг6	0,5...0,8	5,8...6,8	300	18

Свойства приведены для отожженного состояния, в скобках - в нагартованном состоянии

Литейные алюминиевые сплавы различны по химическому составу и структуре. Наилучшими по литейным свойствам (жидкотекучести, плотности отливок) являются сплавы, состав которых приближается к эвтектическому. К таким сплавам относятся силумины (система Al-Si), диаграмма состояния которых показана на рис. 3. Промышленные сплавы содержат 10...13 % Si. Эвтектика (α +Si) имеет грубое игольчатое строение (за счет кристаллов Si); помимо эвтектики в структуре обычно имеются избыточные первичные кристаллы Si (рис 5). Сплавы с такой структурой характе-

ризируются низкой пластичностью. В связи с этим **силумины подвергают модифицированию** (обычно введением в расплав солей натрия), в результате чего температура эвтектического превращения понижается (штриховая линия на рис. 3) и сплав становится доэвтектическим.

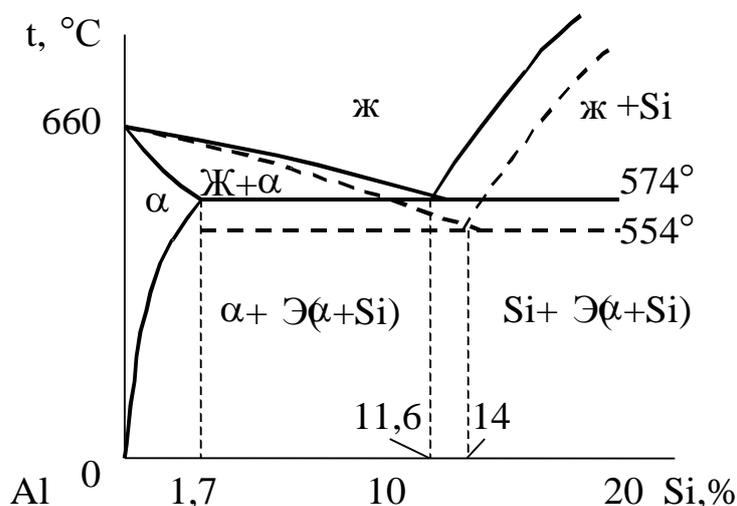


Рис. 3. Диаграмма состояния алюминий-кремний (штриховые линии – после модифицирования)

Вместо твердых и хрупких избыточных кристаллов кремния в его структуре появляются пластичные включения α -раствора (почти чистый Al), а эвтектика становится более дисперсной. Вследствие этого повышается прочность, пластичность возрастает почти в 3 раза.

Литейные алюминиевые сплавы могут упрочняться термической обработкой (закалка и искусственное старение, обычно 8...10 часов при 180 °C), однако эффект упрочнения гораздо ниже, чем в дуралюминах.

Кроме силуминов применяются сплавы систем Al-Cu, Al-Mg; они имеют более высокие прочностные свойства, чем силумины, но их литейные свойства ниже (это видно из соответствующих диаграмм состояния).

Литейные алюминиевые сплавы имеют малую плотность и применяются для изготовления фасонных отливок. Состав и свойства некоторых сплавов этой группы приведены в табл. 3.

Химический состав и механические свойства
литейных алюминиевых сплавов (ГОСТ 1583-93)

Марка сплава	Химический состав, % (остальное Al)				Вид термо- обработки	σ_B , МПа	δ , %
	Mg	Si	Mn	Cu			
АЛ2 (АК12)	—	10...13	—	—	T2	130	2
	м о д и ф и ц и р о в а н н ы й					180	6
АЛ4 (АК 9)	0,17...0,3	8...10,5	0,25...0,5	—	T6	260	4
АЛ7 (АМ 4,5)	—	—	—	4...5	T5	260	3
АЛ8 (АМГ 10)	9,5...11,5	—	—	—	T5	350	10

T2 - отжиг (300 °С в течение 5...10 часов);

T5 - закалка и кратковременное старение (150...175 °С в течение 2...3 час);

T6 - закалка и полное искусственное старение (200 °С в течение 3...5 часов).

В скобках - маркировка по ГОСТ 1583-89Е.

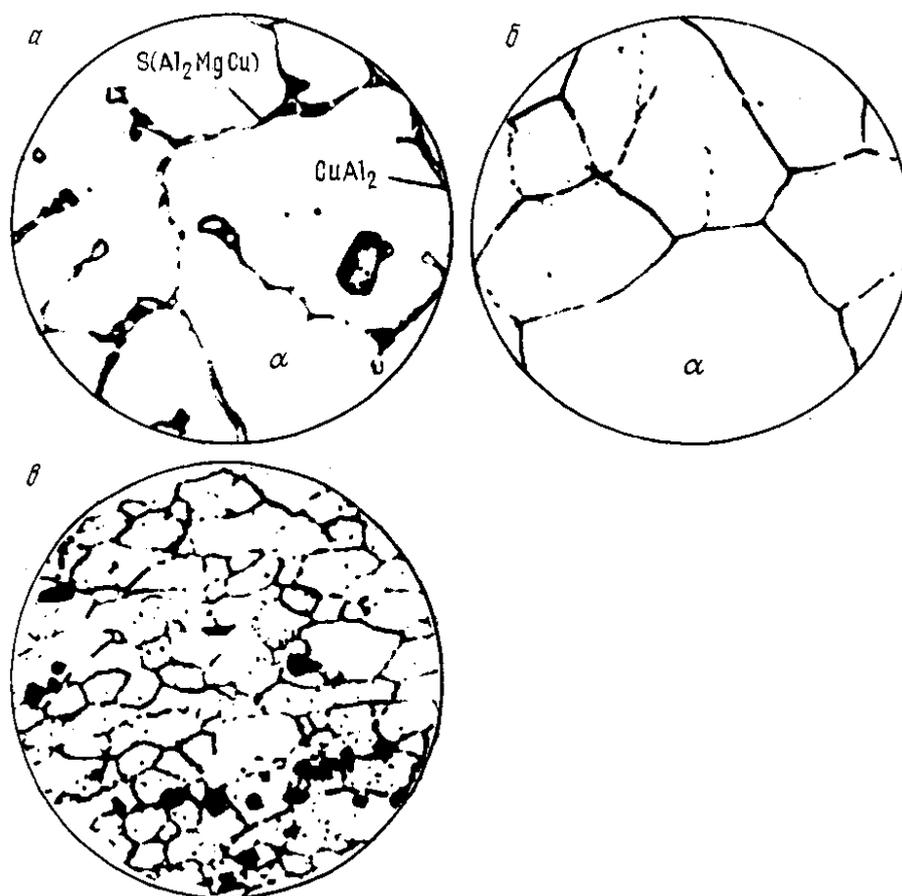


Рис. 4. Микроструктура дуралюмина Д16 ($\times 300$):

а – литой сплав (α -раствор, $CuAl_2$, Al_2MgCu – фаза S); *б* – деформируемый сплав после закалки (пересыщенный α -раствор); *в* – сплав после закалки и старения



Рис. 5. Микроструктура эвтектики немодифицированного сплава АЛ2 (× 300)

III. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с принципами классификации алюминиевых сплавов.
2. Изучить микрошлифы сплава Д16 в различных состояниях, изучить их структуры, зарисовать, обозначить структурные составляющие.
3. Изучить микрошлиф немодифицированных сплавов АЛ2. Изучить структуру, зарисовать.
4. По последней цифре шифра выбрать задачи, найти решения с помощью материалов практической работы и ответы к ним занести в табл. 4.

IV. Содержание отчета

1. Классификация алюминиевых сплавов.
2. Диаграмма состояния Al-Si. Описать процессы, происходящие на отдельных этапах термической обработки дуралюмина. Кривые старения дуралюмина (рис. .2).
3. Структура дуралюмина в исходном и закаленном состояниях.
4. Химический состав, свойства и области применения нескольких деформируемых сплавов, упрочняемых и не упрочняемых термической обработкой.
5. Диаграмма состояния Al-Si, краткое описание процесса модифицирования силуминов; структура немодифицированного силумина.
6. Химический состав, свойства и области применения некоторых литейных алюминиевых сплавов.
7. Условия двух задач и таблица с вариантом их решения.

Таблица 4

Решение задач

	Марка сплава	Химический состав (основные элементы, их содержание в)					Механические свойства	
		%	%	%	%	%	σ_B , МПа	δ , %
Задача 1		Термическая обработка:						
		Другая информация:						
Задача 2		Термическая обработка:						
		Другая информация:						

ЗАДАЧИ

Вариант 1

Задача 1. Выбрать сплав высокой удельной прочности (отношение предела прочности [МПа] к плотности [г/см^3] около 300) для изготовления нагруженных деталей самолетов. Указать марку сплава и химический состав, механические свойства сплава. Назначить режим термической обработки для достижения указанного значения удельной прочности. Привести окончательную структуру сплава.

Задача 2. Выбрать сплав, из которого можно изготовить легкие ($\gamma \approx 2,7 \text{ г/см}^3$) фасонные отливки с прочностью $\sigma_{\text{в}} \approx 220 \text{ МПа}$. Привести марку и химический состав сплава. Назначить способ улучшения структуры такого сплава; указать, какие изменения в структуре и свойствах происходят в результате его применения.

Вариант 2

Задача 1. Выбрать прочный ($\sigma_{\text{в}} \approx 420 \text{ МПа}$) и легкий ($\gamma \approx 2,7 \text{ г/см}^3$) сплав для обшивки самолетов. Указать марку химический состав, роль легирующих элементов. Описать механические и технологические свойства сплава. Назначить режим упрочняющей термической обработки, объяснить причину повышения прочности. Привести окончательную структуру сплава.

Задача 2. Выбрать экономичный материал для литых деталей автомобилей (блоков цилиндров, картеров, тормозных барабанов) и подъемно-транспортных машин (корпусов редукторов, блоков, барабанов), не испытывающих при работе больших нагрузок ($\sigma_{\text{в}} \approx 200 \dots 250 \text{ МПа}$). Привести марку сплава, описать его структуру и свойства. Указать пути повышения механических свойств сплавов этой группы.

Вариант 3

Задача 1. Оборудование для бурения скважин в труднодоступных районах доставляется на вертолетах. Это вызывает необходимость резкого сни-

жения веса оборудования при сохранении его прочностных характеристик, т.е. применения материалов с высокой удельной прочностью. Выбрать сплав с удельной прочностью $\sigma_b / \gamma \approx 190$ (σ_b в МПа, γ в г/см³) для изготовления несущих конструкций буровой установки. Указать марку сплава, химический состав, роль легирующих элементов; привести механические и технологические свойства. Назначить режим термической обработки, обеспечивающий заданную величину удельной прочности. Описать изменения структуры и механических свойств сплава на отдельных этапах термообработки.

Задача 2. Литые детали (корпус, крышка, седло, тарелка) дыхательного клапана резервуара для хранения нефтепродуктов изготавливают из сплава с плотностью $\approx 2,7$ г/см³ и прочностью $\sigma_b \approx 180$ МПа. Привести марку сплава с такими характеристиками, указать его химический состав и свойства. Описать способ улучшения структуры сплава, обеспечивающий достижение заданной прочности.

Вариант 4

Задача 1. Нагруженные детали несущих конструкций приборов летательных аппаратов должны иметь высокую удельную прочность. Выбрать сплав для штампованных корпусных деталей приборов с удельной прочностью $\sigma_b / \gamma \approx 190$ (σ_b в МПа, плотность γ в г/см³). Указать марку, химический состав, роль легирующих элементов. Привести механические и технологические свойства сплава. Назначить режим термической обработки, обеспечивающий заданную величину удельной прочности. Описать, как изменяется структура и механические свойства сплава на отдельных этапах термической обработки.

Задача 2. Многие детали несущих конструкций приборов изготавливают методом холодной пластической деформации. Указать основное требование, предъявляемое к материалам таких изделий. Выбрать экономичный сплав для деталей стационарных приборов, изготавливаемых глубокой вытяжкой (корпусов, кожухов, колпачков, стаканов). Привести марку, химиче-

ский состав и механические свойства сплава. Объяснить влияние данного способа изготовления деталей на механические свойства используемого материала.

Вариант 5

Задача 1. Выбрать сплав для изготовления малонагруженных легких отливок ($\gamma \approx 2,7 \text{ г/см}^3$). Привести марку сплава, химический состав, назначение легирующих элементов. Описать механические и технологические свойства сплава.

Задача 2. Выбрать легкий ($\gamma \approx 2,7 \text{ г/см}^3$) сплав для изготовления малонагруженных сварных и клепаных конструкций с высоким сопротивлением коррозии (трубопроводы и емкости для нефтепродуктов, палубные надстройки и т. п.). Привести марку, химический состав и свойства сплава. Объяснить, как меняются механические свойства сплавов этой группы в зависимости от их состава. Указать способ повышения прочности таких сплавов.

Вариант 6

Задача 1. Выбрать легкий ($\gamma \approx 2,7 \text{ г/см}^3$) сплав для изготовления малонагруженных отливок (картеров сцепления, коробок передач). Привести марку сплава, химический состав, назначение легирующих элементов. Описать механические и технологические свойства сплава.

Задача 2. Обосновать выбор легкого (плотность $\approx 2,7 \text{ г/см}^3$) сплава для изготовления штампованного футляра для микрохирургического инструмента. Привести марку, химический состав, механические и технологические свойства сплава. Объяснить, как (и почему) влияет способ изготовления такого изделия на механические свойства сплава. Какая термическая обработка должна предшествовать штамповке изделия?

Вариант 7

Задача 1. Выбрать легкий ($\gamma \approx 2,7 \text{ г/см}^3$) сплав с прочностью $\sigma_b \approx 220...260 \text{ МПа}$ для изготовления сложных отливок (головок и блоков цилинд-

ров автомобильных двигателей, картеров коробки передач и сцепления). Привести марку сплава, химический состав, назначение легирующих элементов. Описать механические и технологические свойства сплава. Указать способ улучшения структуры сплава, повышающий его эксплуатационные свойства.

Задача 2. Литой корпус прибора, используемого в космическом аппарате, должен быть легким и иметь достаточную прочность ($\sigma_{\text{в}} = 320...360$ МПа). Привести марку пригодного для этой цели сплава, его химический состав, назначение легирующих элементов. Указать механические и технологические свойства. Описать способ достижения максимальной прочности в сплаве данного химического состава.

Вариант 8

Задача 1. Выбрать легкий ($\gamma \approx 2,7$ г/см³) и достаточно прочный ($\sigma_{\text{в}} \approx 200$ МПа) сплав для отливки поршней автомобильных двигателей, работающих при температурах до 200...300 °С. Привести марку, химический состав сплава, назначение легирующих элементов. Указать режим упрочняющей термической обработки. Описать структуру и свойства сплава.

Задача 2. Выбрать наиболее экономичный сплав для изготовления штампованного кожуха стационарного медицинского прибора. Привести марку, химический состав и механические свойства сплава. Отметить связь между его химическим составом и технологическими свойствами. Объяснить влияние способа изготовления кожуха на механические свойства сплава.

Вариант 9

Задача 1. Выбрать легкий ($\gamma \approx 2,7$ г/см³) деформируемый сплав, сохраняющий механические свойства до 200...300 °С, для штамповки поршней двигателей внутреннего сгорания. Привести марку, химический состав, назначение легирующих элементов. Описать режим термической обработки и связанные с ним изменения в структуре и механических свойствах сплава.

Задача 2. Малоагруженные литые детали авиационных приборов

(например, корпуса редукторов) изготавливают из материалов, позволяющих снизить массу прибора. Выбрать промышленный сплав с малой плотностью. Привести его марку, химический состав, назначение легирующих элементов. Описать механические и технологические свойства сплава. Указать способ повышения его прочности.

Вариант 10

Задача 1. Отдельные детали двигателя и ходовой части гоночных автомобилей должны наряду с высокой прочностью иметь возможно малый вес, т.е. обладать большой удельной прочностью (отношение предела прочности σ_b [МПа] к плотности γ [г/см³]). Выбрать для этой цели подходящий сплав ($\sigma_b / \gamma > 200$). Привести марку сплава, химический состав, назначение легирующих элементов. Описать механические и технологические свойства сплава. Указать режим термической обработки, окончательную структуру и свойства сплава.

Задача 2. Литые детали переносных медицинских приборов (например, корпус тонометра) изготавливают из легких сплавов (плотность $\approx 2,7$ г/см³) с прочностью $\sigma_b \approx 180...260$ МПа. Выбрать марку сплава, привести химический состав. Описать механические и технологические свойства сплава. Указать способ улучшения структуры сплава, повышающий его эксплуатационные свойства.